

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE
CO Y CO₂ , POR MEDIO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL DE UN FILTRO DE
ALUMINIO**

**CAMILO ANDRES GIL PINZON
OSCAR JAVIER CAICEDO PULIDO**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERÍA AMBIENTAL
PROYECTO DE GRADO
BOGOTÁ D.C.
2016**

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE
CO Y CO₂, POR MEDIO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL DE UN FILTRO DE
ALUMINIO**

**CAMILO ANDRES GIL PINZON
OSCAR JAVIER CAICEDO PULIDO**

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO
AMBIENTAL**

**Director
Jairo A. Páez R.
Ingeniero ambiental y sanitario
Esp. Gerencia de Proyectos en Ingeniería**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERÍA AMBIENTAL
PROYECTO DE GRADO
BOGOTÁ D.C.
2016**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado 1

Firma del jurado 2

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestros padres por brindarnos su apoyo incondicional, confiando siempre en nuestras capacidades y creyendo siempre en nosotros a lo largo de nuestra formación profesional.

Al ingeniero Jairo A. Páez R nuestro director de tesis, por su colaboración en el diseño experimental durante la realización de las pruebas en el laboratorio y brindarnos sus conocimientos en química del aire.

A la Universidad Santo Tomás por facilitarnos el espacio de laboratorio y los equipos e implementos necesarios para el desarrollo de este proyecto, también agradecemos a nuestro compañero de formación Johnatan Hernández, por su colaboración en el diseño de la columna.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	13
INTRODUCCIÓN.....	15
1. OBJETIVOS.....	16
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	16
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2. MARCO DE REFERENCIAS.....	17
2.1. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1.1. Aluminio.....	17
2.1.2. Monóxido de carbono.....	19
2.1.3. Dióxido de carbono.....	20
2.1.4. Espontaneidad de las reacciones químicas del aluminio con el CO y CO ₂ (Energía libre de Gibbs).....	22
2.1.5. Tecnologías de reducción de emisiones de CO y CO ₂ por medio de filtros 28	
2.2. MARCO CONTEXTUAL.....	31
2.3. MARCO CONCEPTUAL.....	32
2.4. MARCO INSTITUCIONAL.....	35
2.5. MARCO LEGAL.....	35
3. METODOLOGÍA.....	40
3.1. ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA.....	41
3.1.1. Nivel 1: Tipo físico del aluminio.....	41
3.1.2. Nivel 2: Temperatura.....	42
3.1.3. Nivel 3: Masa del filtro de aluminio.....	43
3.1.4. Nivel 4: Replicas de muestreo.....	43
3.2. DIAGRAMA DE FLUJO.....	44
3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	45
3.4. TOMA DE DATOS.....	46

3.5. PROCEDIMIENTOS PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS.....	47
3.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	48
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	50
4.1. GRÁFICAS DE CORRELACIÓN DE LOS GASES PARA LAS CONCENTRACIONES PROMEDIO DE LA CONDICIÓN FINAL CON ALUMINIO PARA LAS TRES TEMPERATURAS.....	50
4.2. GRÁFICAS DE RELACIÓN DE LOS GASES CON LAS TRES TEMPERATURAS PARA LAS CONDICIONES FINALES CON ALUMINIO.	53
4.3. GRÁFICAS DE CONDICIONES DEL FILTRO VS TEMPERATURA	56
4.4. PRUEBA DE NORMALIDAD DE LOS DATOS.....	59
4.5. CÁLCULO DE T-STUDENT.....	60
4.6. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LAS CONDICIONES DEL FILTRO VS TEMPERATURA	60
4.7. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL TIPO Y LA MASA DE ALUMINIO ...	63
4.8. ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA CONDICIÓN FINAL DESPUÉS DEL FILTRO SIN ALUMINIO Y LAS CONDICIONES DESPUÉS DEL FILTRO CON ALUMINIO EN GRANALLA Y POLVO 300G PARA CADA TEMPERATURA. ...	65
4.9. EFICIENCIAS DE REDUCCIÓN DE LOS GASES	68
5. CONCLUSIONES.....	72
6. RECOMENDACIONES	74
7. LIMITACIONES.....	75
8. BIBLIOGRAFÍA	76
9. ANEXOS	79

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Tabla de símbolos.....	11
Tabla 2. Tabla de abreviaturas	12
Tabla 3. Casos que se pueden presentar en el cálculo de ΔG	24
Tabla 4. Entalpías y entropías de las moléculas y átomos de interés en las reacciones.....	24
Tabla 5. Resumen de energía libre de Gibbs para la reacción del CO con el aluminio.	31
Tabla 6. Resumen de energía libre de Gibbs para la reacción del CO ₂ con el aluminio para las dos reacciones.....	31
Tabla 7. Normativa a nivel de emisión.	35
Tabla 8. Normatividad a nivel de inmisión.	37
Tabla 9. Convenios.	38
Tabla 10. Tabla resumen.	49
Tabla 11. Cálculo del T-Student.....	60
Tabla 12. ANOVA para CO para las condiciones del filtro vs temperatura.	61
Tabla 13. ANOVA para CO ₂ para las condiciones del filtro vs temperatura.	62
Tabla 14. ANOVA para O ₂ para las condiciones del filtro vs temperatura.	62
Tabla 15. ANOVA para CO para el tipo y la masa de aluminio.....	63
Tabla 16. ANOVA para CO ₂ para el tipo y la masa de aluminio.....	64
Tabla 17. ANOVA para O ₂ para el tipo y la masa de aluminio.	65
Tabla 18. ANOVA para CO para la condición final sin aluminio y condición final con aluminio granalla y polvo 300g.....	66
Tabla 19. ANOVA para CO ₂ para la condición final sin aluminio y condición final con aluminio granalla y polvo 300g.....	67
Tabla 20. ANOVA para O ₂ para la condición final sin aluminio y condición final con aluminio granalla y polvo 300g.....	68
Tabla 21. Porcentajes de reducción para el CO para las condiciones del filtro con la temperatura.....	69
Tabla 22. Porcentajes de reducción para el CO ₂ para las condiciones del filtro con la temperatura.....	70
Tabla 23. Porcentajes de reducción para el O ₂ para las condiciones del filtro con la temperatura.....	71

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Diagrama dimensional del filtro de ballena. ¡Error! Marcador no definido.	
Ilustración 2. Corte de un convertidor catalítico de contacto.....	30
Ilustración 3. Filtro sin aluminio y con aluminio.	40
Ilustración 4. Esquema del diseño experimental.	41
Ilustración 5. Tipo físico del aluminio (Granalla y Polvo).....	41
Ilustración 6. Identificación de alturas y temperaturas.	42
Ilustración 7. Diagrama de flujo para la metodología.	44
Ilustración 8. Equipo medidor de gases y motor diésel.....	46
Ilustración 9. Identificación de condiciones y caracterización del diseño experimental.	47

LISTA DE GRÁFICAS

Pág.

Gráfica 1. Correlación de los gases para las concentraciones promedio de la condición final con aluminio para la temperatura T1 a 2,3 m de altura.	50
Gráfica 2. Correlación de los gases para las concentraciones promedio de la condición final con aluminio para la temperatura T2 a 1,7m de altura.	51
Gráfica 3. Correlación de los gases para las concentraciones promedio de la condición final con aluminio para la temperatura T3 a 1 m de altura.	52
Gráfica 4. Relación de CO ₂ y CO vs Temperatura.....	53
Gráfica 5. Relación de O ₂ y CO vs Temperatura.	54
Gráfica 6. Relación de O ₂ , y CO ₂ vs Temperatura.	55
Gráfica 7. Concentración CO (%) vs Temperaturas (°C). ¡Error! Marcador no definido.	
Gráfica 8. Concentración CO ₂ (%) vs Temperaturas (°C).	57
Gráfica 9. Concentración O ₂ , (%) vs Temperaturas (°C).	58
Gráfica 10. Prueba de normalidad	59

LISTA DE ECUACIONES

Pág.

Ecuación 1. Cambio de energía libre de Gibbs.....	22
Ecuación 2. Cambio de energía libre de Gibbs.....	23
Ecuación 3. Cambio en la entalpía para la reacción del CO con el aluminio.	25
Ecuación 4. Cambio en la entropía para la reacción del CO con el aluminio.....	25
Ecuación 5. Cambio de energía libre de Gibbs para la reacción del CO con el aluminio.	25
Ecuación 6. Cambio en la entalpía para la primera reacción del CO ₂ con el aluminio.	26
Ecuación 7. Cambio en la entropía para la primera reacción del CO ₂ con el aluminio.	26
Ecuación 8. Cambio de energía libre de Gibbs para la primera reacción del CO ₂ con el aluminio.....	27
Ecuación 9. Cambio en la entalpía para la segunda reacción del CO ₂ con el aluminio.	27
Ecuación 10. Cambio en la entropía para la segunda reacción del CO ₂ con el aluminio.	27
Ecuación 11. Cambio de energía libre de Gibbs para la segunda reacción del CO ₂ con el aluminio.....	28
Ecuación 12. Eficiencias de reducción de los gases CO ₂ y CO.....	68
Ecuación 13. Eficiencias del aumento de los gases O ₂	70

TABLA DE SÍMBOLOS

Tabla 1. Tabla de símbolos.

SÍMBOLOS	DESCRIPCIÓN
Al	<i>Aluminio</i>
CO	<i>Monóxido de carbono</i>
CO₂	<i>Dióxido de carbono</i>
O₂	<i>Oxígeno</i>
HC	<i>Hidrocarburos</i>
NO₂	<i>Dióxido de nitrógeno</i>
SO₂	<i>Dióxido de azufre</i>
H₂O	<i>Agua</i>
Al₂O₃	<i>Oxido de aluminio (Alúmina)</i>
C	<i>Carbono</i>
NO_x	<i>Óxidos de nitrógeno</i>
N₂	<i>Dinitrógeno</i>

Fuente: Autores.

TABLA DE ABREVIATURAS

Tabla 2. Tabla de abreviaturas

ABREVIATURAS	DESCRIPCIÓN
T1	<i>Temperatura 1</i>
T2	<i>Temperatura 2</i>
T3	<i>Temperatura 3</i>
ppm	<i>Partes por millón</i>
g	<i>Gramos</i>
°C	<i>Grados centígrados</i>
mg	<i>Miligramos</i>
IACS	<i>International Association of Classification Societies Ltd</i>
W/mk	<i>Watt por metro kelvin</i>
PM2.5	<i>Material particulado menor a 2.5 micras</i>
ΔG	<i>Cambio de energía libre de Gibbs</i>
ΔH	<i>Cambio en la entalpía</i>
ΔS	<i>Cambio en la entropía</i>
T	<i>Temperatura</i>
$\frac{KJ}{Mol}$	<i>Kilojulio sobre mol</i>
Mg/L	<i>Miligramos sobre litro</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
$\mu g/m^3$	<i>Microgramos sobre metro cúbico</i>
GEI	<i>Gases de efecto invernadero</i>

Fuente: Autores

RESUMEN

Los combustibles fósiles han suplido la demanda energética de las diferentes actividades humanas desde el inicio de la industrialización y aún siguen siendo la fuente de energía más utilizada [1], esto ha traído como consecuencias el aumento de las concentraciones de CO₂ y CO, suponiendo un problema ambiental, social y económico a nivel mundial, pues la necesidad de reducir las emisiones de gases contaminantes para satisfacer las exigencias gubernamentales de calidad de aire y minimizar el cambio climático, involucra el uso de tecnologías de reducción de emisiones que resultan en su mayoría costosas y en ocasiones poco eficiente [2].

En este trabajo de investigación se describe y evalúa a nivel experimental, la eficiencia del aluminio en la reducción de las emisiones de CO₂ (dióxido de carbono) y CO (monóxido de carbono), para esto se realizó el diseño de un filtro de aluminio que se estableció dentro de una columna hermética la cual simulaba un ambiente contaminado (ya que se alimentaba de los gases provenientes de un motor Diésel que se conectaba en la parte inferior) y permitía variar la altura en la que se ubicaba dicho filtro con el fin de controlar la temperatura a la que entraban en contacto los gases con el aluminio.

La eficiencia en la reducción de los gases se determinó en función de dos estados físicos del aluminio (granalla y polvo, debido a que poseen diferencias en sus propiedades adsorbentes), dos concentraciones en masa del aluminio (150g y 300g) y tres temperaturas diferentes T1 (36,52°C), T2 (37,85°C) y T3 (40,37°C), que se obtuvieron de los promedios de temperatura por cada una de las alturas dispuestas en la columna.

Para la medición de los gases emitidos por el motor Diésel se utilizó un equipo analizador de emisiones de automóvil NHA- 406/506/206 facilitado por la Universidad Santo Tomás, que mide la concentración de HC, CO₂, CO, O₂ y NO₂, contando con tiempos de respuesta rápidos para los diferentes contaminantes, se utilizó un termómetro digital para los datos de temperatura.

En los resultados obtenidos se observa que el aluminio tiene la capacidad de reducir las emisiones de CO₂ y CO para las tres temperaturas, siendo la altura de 1m la que presentó la mejor reducción con una temperatura T3 de 40,4 °C, de igual forma se obtuvo que el aluminio en polvo tuvo mejor reducción que el aluminio en granalla y al utilizar 300 g de masa se obtenían mejores resultados en la reducción.

Palabras clave: aluminio, temperatura, emisiones, contaminantes, reducción, eficiencia.

ABSTRACT

Fossil fuels have supplied the energy demand of the different human activities since the beginning of industrialization and still remain the energy source most commonly used [1], this has brought as a consequence the increased concentrations of CO₂ and CO, assuming an environmental, social and economic problem worldwide, as the need to reduce greenhouse gas emissions to meet government requirements for air quality and minimize climate change involves the use of technologies to reduce emissions which are mostly expensive and sometimes inefficient [2].

This research paper describes and evaluates experimental level, efficiency of aluminum in reducing emissions of CO₂ (carbon dioxide) and CO (carbon monoxide), for this design of an aluminum filter is realized was established within a tight column which simulated a contaminated environment (as it was fed by gas from a diesel engine which is connected at the bottom) and allowed to vary the height at which the filter was located in order to control the temperature at which the gases came into contact with aluminum.

The reduction efficiency of gases is determined according to two physical states of aluminum (grit and dust, because they have differences in their adsorptive properties), two mass concentrations of aluminum (150g and 300g) and three different temperatures T1 (36.52 °C), T2 (37.85 °C) and T3 (40.37 °C), which were obtained from the average temperature of the heights each arranged in the column.

For the measurement of the gases emitted by the diesel engine emissions analyzer NHA- 406/506/206 facilitated by the Universidad Santo Tomás, which measures the concentration of HC, CO₂, CO, O₂ and NO₂ equipment was used, having fast response times for different pollutants, a digital thermometer for temperature data was used.

The results obtained show that aluminum has the ability to reduce emissions of CO₂ and CO for three temperatures, the height 1m which presented the best reduction with a temperature T3 of 40.4 °C, the same way He obtained that the aluminum powder had better reduction in grit aluminum and using 300 g of mass best results were obtained in the reduction.

Keywords: aluminum, temperature, emissions, pollutant reduction efficiency.

INTRODUCCIÓN

El acelerado crecimiento urbano, acompañado de un desarrollo económico e industrial que eleva la demanda de combustibles fósiles como fuente de energía, requerirán de especial atención y grandes inversiones que compensen el impacto de la contaminación del aire hacia las personas, los ecosistemas y el planeta en general para satisfacer las exigencias de sostenibilidad que la sociedad actual reclama [1]. Este es un tema que estará sujeto a una mayor conciencia pública, a un desarrollo de políticas más estrictas y a la implementación de tecnologías que ayuden a minimizar los impactos que se desprenden de la utilización de combustibles fósiles por las diferentes actividades antrópicas [2].

El problema de la contaminación del aire se ve reflejado en los grandes centros urbanos debido a que actualmente más de la mitad de la población mundial vive en estas áreas y se espera que a futuro este porcentaje se eleve, llevando a un aumento de la demanda energética para iluminación, transporte, procesos industriales y diferentes usos domésticos, que derivan en el incremento de la concentración de gases como el CO_2 y CO , estos afectan la calidad del aire, ocasionando problemas de salud pública y colaborando en el cambio climático [3].

Los impactos a la salud que se derivan de la emisión de CO_2 y CO van desde enfermedades cardiopulmonares y respiratorias, como el asma y alergias, hasta cáncer pulmonar, siendo la población infantil y los adultos mayores los que tienen un mayor riesgo a padecer estas enfermedades [4]. Según el Clean Air Institute "En América Latina y el Caribe, al menos 100 millones de personas están expuestas a la contaminación del aire por encima de los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud" y en el caso particular de Bogotá aunque se han hecho mejoras significativas, como la aplicación del enfoque IES (Estrategias Ambientales Integradas, por sus siglas en inglés) en el sistema integrado de transporte público de Bogotá (SITP), la población todavía padecen una deteriorada calidad del aire, producto de actividades contaminantes como el transporte urbano, la generación de electricidad, la industria y la manufactura [5].

En la presente investigación se evaluó la eficiencia del aluminio como medio filtrante para reducir las emisiones de CO_2 y CO . Debido a que este posee una elevada capacidad como reductor químico [6]. Para esto se evaluó el efecto reductor del aluminio a tres diferentes temperaturas que están en función de tres alturas con diferentes condiciones para el filtro, brindando una nueva tecnología que reduzca la emisión de gases contaminantes de forma eficiente y que no recaer en grandes costos, pues el aluminio es un elemento abundante y económico.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia del aluminio para reducir las emisiones de CO y CO₂ por medio de un filtro.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar la eficiencia en la reducción de emisiones de CO y CO₂ con relación al tipo físico del aluminio (granalla y polvo).
- Determinar la correlación entre la temperatura de emisión del gas y la temperatura ambiente en la incidencia de reducción de los gases de CO y CO₂.
- Establecer la correlación entre la cantidad en masa del aluminio y la remoción del gas a nivel experimental.
- Determinar las condiciones óptimas experimentales en las que se ve favorecida la reducción de CO y CO₂.

2. MARCO DE REFERENCIAS

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Aluminio

El Al es el tercer elemento más abundante en la litosfera, constituyendo el 8,13% de la corteza terrestre, normalmente bajo formas insolubles. Su abundancia litosfera (82.000 mg/L) sobrepasa los niveles reportados de elementos esenciales para la vida, mientras en los organismos vivos su concentración es muy baja (0.9 ppm) por su poca o nula inclusión en procesos biológicos alcanzando concentraciones extremadamente bajas en la célula, las cuales son difíciles de medir acertadamente [7]. La exposición al agua, oxígeno u otros oxidantes conduce a la formación de óxido de aluminio [8].

▪ Propiedades físicas

Las propiedades físicas del aluminio han sido aprovechadas con muchos propósitos, hoy en día el aluminio ocupa el segundo lugar en cuanto a la utilización de los metales. Su empleo se ha extendido por todo el mundo gracias a que su gran diversidad de aleaciones se ocupa en los más variados propósitos, desde la hoja de papel aluminio hasta la más refinada aplicación de vanguardia en la aeronáutica y la industria espacial para reforzar las estructuras [9].

El aluminio presenta un color blanco con un tono azulado, es suave cuando esta puro, pero cuando es aleado se vuelve fuerte y duro, tiene buena maleabilidad, es buen conductor eléctrico y térmico, resistente a la corrosión por la formación de óxido de aluminio (Al_2O_3) siendo este un recubrimiento superficial [10]. Se presenta a continuación las propiedades físicas más importantes del aluminio:

Estructura atómica: el aluminio tiene como símbolo químico Al, número atómico 13, esto quiere decir que un átomo de Al se compone de 13 electrones dispuestos en tres orbitales alrededor de un núcleo altamente concentrado con 13 protones. Los tres electrones en el último orbital dan al átomo de Al una valencia de energía química de la combinación de 3 [10].

Estructura cristalina: cuando el Al cambia a estado sólido por la fundición, se asumen estructuras cristalinas. Los átomos se disponen en patrones simétricos ordenados llamados comúnmente como "enrejado". Los átomos

de Al forman las esquinas de un cubo, con un solo átomo en el centro de cada cara [10].

Densidad: una característica importante del Al es su ligereza. El metal tiene un peso atómico de 26,98 y una gravedad específica de 2,70, aproximadamente un tercio del peso de otros metales comúnmente utilizados a excepción del titanio y magnesio. A temperaturas altas la densidad disminuye. Las aleaciones no cambian su densidad apreciablemente aunque en aleaciones con litio si se debe considerar [10].

Conductividad Eléctrica y resistividad: la conductividad eléctrica del Al puro a 20°C es de 63,8% de la IACS, más del doble que la del cobre y mayor que la de cualquier otro metal. La resistencia del Al puro es mínima aproximadamente de 2,69 micro ohmios, pero cuando se realizan aleaciones, la conductividad eléctrica se reduce y aumenta la resistencia [10].

Conductividad térmica: la conductividad térmica para el Al puro es de 244 W/mk estando a una temperatura de entre 0 a 100°C de la IACS, siendo el doble de la conductividad térmica del cobre y esta disminuye cuando se hacen aleaciones [10].

Reflectancia y emisividad: la emisividad es la facilidad de una sustancia para irradiar su propia energía térmica y es inversamente proporcional con la reflectividad, el Al tiene alta reflectancia y baja emisividad dando lugar a la utilización este en papel de aluminio [10].

Resistencia a la corrosión: el aluminio tiene una mayor resistencia a la corrosión que muchos otros metales debido a la protección conferida por la película de óxido de aluminio (Al_2O_3), esta capa siempre se forma cuando se está en presencia de oxígeno. El aluminio es, sin embargo, un elemento químico muy reactivo y el éxito de su resistencia a la corrosión depende de la integridad con la que la película protectora de óxido de aluminio evita que esta actividad aparezca [10].

Temperatura de fusión: el punto de fusión del Al es sensible a la pureza, para el Al puro la temperatura de fusión es de aproximadamente 660°C y a medida que vaya bajando la pureza del aluminio por sus aleaciones, la temperatura de fusión bajara también hasta aproximadamente 500°C [10].

- **Propiedades químicas**

Entre las propiedades químicas más importantes del Al encontramos que presenta una gran resistencia a la corrosión debido a que se forma una capa fina y adherente de óxido de aluminio (Al_2O_3) sobre la superficie del metal. En determinadas aplicaciones industriales se necesita una mayor resistencia a la corrosión, esta se puede formar mediante anodizado, el cual consiste en aumentar el espesor artificialmente de la capa por un procedimiento de oxidación profunda y, posterior a esto colmatado por una inmersión en agua caliente [11].

El aluminio reacciona fácilmente con el ácido clorhídrico, fluorhídrico y sulfúrico, mientras que en soluciones de ácido nítrico, amoniacado y en la mayoría de ácidos orgánicos la reacción es más débil. La resistencia del aluminio también depende de la composición química, concentración de la solución y pureza del metal [11].

Han sido muchos los usos del aluminio a nivel mundial, siempre aprovechando las propiedades físicas de este, sin embargo el aluminio tiene propiedades químicas importantes, una de esas es que el aluminio posee una elevada capacidad como reductor químico [9].

2.1.2. Monóxido de carbono

El monóxido de carbono es un gas incoloro e inodoro, considerado uno de los mayores contaminantes de la atmósfera terrestre, y uno de los principales factores que afecta la calidad del aire en las grandes ciudades, pues está directamente relacionado con las actividades urbanas, su tiempo de residencia en la atmósfera es de aproximadamente 65 días y su presencia puede causar efectos tóxicos en la salud de las personas [4]. A temperatura ordinaria, es un producto estable. Se disocia en carbono y anhídrido carbónico, entre 400°C y 800°C y a partir de ahí la reacción se estabiliza. Quema en presencia de oxígeno con llama azul, dando anhídrido carbónico y con desprendimiento de calor, por ello es un combustible utilizado en la industria. Se trata de un agente reductor, que reacciona con diversos óxidos metálicos (de cobre, hierro, cobalto, plomo, etc.) formándose anhídrido carbónico y el metal correspondiente. Puede combinarse con el cloro en presencia de catalizadores o por acción de la luz, formándose fosgeno [12].

El monóxido de carbono, cuya fórmula química es CO , puede causar la muerte cuando se respira en niveles elevados. Se produce cuando se queman materiales combustibles como gas, gasolina, keroseno, carbón, petróleo, tabaco o madera en ambientes de poco oxígeno. Las chimeneas, las calderas, los calentadores de agua y los aparatos domésticos que queman combustible, como las estufas,

también pueden producirlo si no están funcionando correctamente. Los vehículos parados con el motor encendido también lo despiden [13].

- **Fuentes de emisión**

La principal fuente de e emisión antropogénica del CO se produce en el sector transporte debido a la combustión incompleta de gas, petróleo, gasolina, carbón y aceites. Los aparatos domésticos que queman combustibles fósiles como las estufas, hornillos o calentadores, también son una fuente de emisión común. El sector industrial también genera grandes cantidades de CO especialmente la industria metalúrgica, en la fundición de aceros, la industria de fabricación de papel y las plantas productoras de formaldehído [14].

- **Riesgos a la salud**

El monóxido de carbono también llamado “el asesino silencioso” debido a su toxicidad, tiene efectos potencialmente altos en la salud humana, ya que este gas compite con el oxígeno y altera la curva de disociación de la hemoglobina, por ubicarse en uno de los cuatro sitios de unión con el oxígeno. Una vez penetra al organismo, el monóxido de carbono se une a las enzimas del grupo Hem de la hemoglobina, desplazando al oxígeno de la misma, formando en la sangre un complejo que se denomina carboxihemoglobina, el cual dificulta el transporte de oxígeno a las células y tejidos, lo que va a producir una hipoxia celular generalizada. Esta alteración empeora la hipoxia celular producida por la formación de carboxihemoglobina. Los síntomas y signos iniciales de la intoxicación aguda se presentan muy rápidamente y se han relacionado con niveles de carboxihemoglobina en sangre superiores a 10 % [15].

- **Efectos sobre el ambiente**

El monóxido de carbono se libera al medioambiente principalmente desde fuentes naturales y por la combustión de aceites combustibles (fueoils), permanece en el aire aproximadamente 2 meses, se degrada en el atmosfera al reaccionar con otras sustancias químicas y se transforma en anhídrido carbónico, en el suelo es degradado por microorganismos a anhídrido carbónico, no se acumula en las plantas ni en los tejidos de los animales [16].

2.1.3. Dióxido de carbono

El dióxido de carbono no es inflamable y, en condiciones atmosféricas, químicamente estable e inerte. Las reacciones de combustión son inhibidas o completamente suprimidas por el CO₂. El dióxido de carbono puede reaccionar vigorosamente con determinadas sustancias, como el amoniaco o aminas. Este

gas se disuelve en agua produciendo ácido carbónico, que reacciona como un ácido débil y tiene un efecto corrosivo sobre el acero al carbono y algunos metales no ferrosos. Como gas a presión atmosférica, el dióxido de carbono es de aproximadamente 1,5 veces más pesado que el aire. El CO₂ por lo tanto, tiende a fluir hacia abajo, y se puede acumular en pozos, sótanos, o en depresiones naturales. Si hay poco movimiento de aire, estas piscinas de CO₂ pueden persistir durante muchas horas [17].

El dióxido de carbono es un gas incoloro, no inflamable, es soluble en agua a presión constante y ligeramente ácido a la humedad, se encuentra en proporciones de 325 ppm en el aire atmosférico y es obtenido por la combustión, fermentación y descomposición térmica o química de calizas. Actualmente preocupa el lento aumento de la dosis media de CO₂ de la atmósfera, que puede explicar el cambio climático [18].

- **Fuentes de emisión**

En la naturaleza, una fuente de emisión importante son los procesos fotosintéticos, específicamente el proceso de respiración, en el que los componentes alimentarios de animales y plantas se oxidan para la obtención de energía, desprendiéndose en la reacción, dióxido de carbono y agua. Los incendios forestales también constituyen un foco de liberación significativa, ya que se produce la quema de madera y biomasa fundamentalmente [19].

Entre las fuentes de emisión antropogénicas más relevantes encontramos el sector energético el cual es responsable de la mayor parte de las emisiones de dióxido de carbono, y dentro del mismo, el sector transporte debido principalmente a la quema de combustibles fósiles como la gasolina, el gas y otros derivados. La industria del cemento y las plantas de incineración así como la industria química y la industria metalúrgica también son fuentes emisoras de CO₂ aunque en menor medida que las industrias mencionadas anteriormente [20].

- **Riesgos a la salud**

Los posibles efectos a corto plazo que puede causar el CO₂ a las personas que están expuestas a este, varían de acuerdo a concentración del gas. El contacto puede irritar y quemar la piel y los ojos, el contacto directo con la forma líquida o sólida del gas, puede causar congelamiento, también pueden existir síntomas como dolor de cabeza, mareo, dificultad para respirar, temblores, confusión y tintineo en los oídos. A niveles mayores la exposición puede causar convulsiones, coma y muerte [21].

Los efectos a largo plazo sobre la salud pueden ocurrir luego de un tiempo de haber estado expuesto al CO₂ y puede durar meses o años. No se han descubierto riesgos de cáncer por la exposición al gas aunque si pueden existir riesgos para la reproducción ya que causa daño al feto en desarrollo. La

intoxicación grave por CO₂ puede afectar el cerebro y causar cambios de personalidad y daño a la visión [22].

- **Efectos sobre el medio ambiente**

La concentración de CO₂ en la atmósfera se elimina constantemente como parte del ciclo del carbono. Los mecanismos que retiran el carbono de la atmósfera se llaman “SUMIDEROS DE CARBONO”. Los bosques del mundo son un gran sumidero de carbono; deforestar implica reducir el tamaño de este sumidero, permitiendo que más dióxido de carbono permanezca en la atmósfera [23].

El CO₂ producido puede acelerar las tasas de crecimiento de las plantas y también permite que éstas crezcan en regiones más áridas. La vida animal, que depende de las plantas, también prospera, y la diversidad de vida vegetal y animal aumenta [24].

2.1.4. Espontaneidad de las reacciones químicas del aluminio con el CO y CO₂ (Energía libre de Gibbs)

- **Energía libre de Gibbs**

Para identificar la espontaneidad de las reacciones químicas del aluminio con el CO₂ y CO se necesita del cálculo de la energía libre de Gibbs en cada una de las reacciones. La única energía que pueden utilizar las células es la energía libre, porque es la única capaz de realizar trabajo durante una reacción a temperatura y presión constantes [25].

Para calcular la energía libre de Gibbs es importante tener en cuenta la entalpía, la cual nos dice si la reacción absorberá o liberará calor, y la entropía, que nos indica la forma en la que la energía de un sistema se distribuye, en otras palabras es el desorden del sistema [26].Entonces la ecuación 1 viene dada así:

Ecuación 1. Cambio de energía libre de Gibbs.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Fuente: [26].

Dónde:

- ΔG : Cambio de energía libre de Gibbs.
- ΔH : Cambio en la entalpía.
- ΔS : Cambio en la entropía.
- T : Temperatura

La energía libre de Gibbs también puede ser calculada con la ecuación 2 como:

Ecuación 2. Cambio de energía libre de Gibbs.

$$\Delta G = GP - GR$$

Fuente: [26].

Siendo GP energía libre del producto y GR energía libre del reactivo. Los resultados que se puede obtener del ΔG son los siguientes [25]:

- ✓ Si, $\Delta G < 0$, la reacción es espontanea.
- ✓ Si $\Delta G > 0$, la reacción no es espontanea.
- ✓ Si $\Delta G = 0$, la reacción esta en equilibrio.

Teniendo en cuenta que la temperatura debe estar en grados kelvin y por tanto no puede ser negativa, se pueden distinguir cuatro casos:

1. En el primer caso, si ΔH es menor a cero y ΔS es mayor a cero, se tendrá una reacción exotérmica con una energía libre de Gibbs negativa, lo cual quiere decir esta reacción ocurrirá de forma espontánea a cualquier temperatura.
2. En el segundo caso, si ΔH y ΔS son menores a cero, se tendrá una reacción exotérmica con una energía libre de Gibbs que puede ser positiva o negativa, lo cual significa que la reacción ocurrirá espontáneamente a bajas temperaturas.
3. En el tercer caso, si ΔH y ΔS son mayores a cero, se tendrá una reacción endotérmica, con una energía libre de Gibbs negativa o positiva, indicando que la reacción es espontanea a altas temperaturas.
4. En el último caso, si ΔH es mayor a cero y ΔS es menor a cero, la reacción es endotérmica con una energía libre de Gibbs positiva, indicando que la reacción nunca será espontanea.

A continuación se presenta una tabla resumen con los casos que se pueden presentar en el cálculo de la energía libre de Gibbs y la situación que conlleva los diferentes casos.

Tabla 3. Casos que se pueden presentar en el cálculo de ΔG .

Caso	ΔH	ΔS	Tipo de reacción	ΔG	Situación
1	<0	>0	Exotérmica	-	Espontanea a cualquier temperatura
2	<0	<0	Exotérmica	+/-	Espontanea a temperaturas bajas
3	>0	>0	Endotérmica	+/-	Espontanea a temperaturas altas
4	>0	<0	Endotérmica	+	No es espontanea

Fuente: Autores

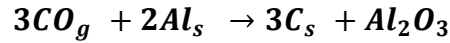
A continuación se presenta una tabla con las entalpías y entropías de las moléculas de interés así como las reacciones químicas del aluminio con el CO y CO₂, también se realizó el cálculo de la energía libre de Gibbs, con el fin de conocer la espontaneidad o no de las reacciones de interés a una temperatura de referencia (25°C).

Tabla 4. Entalpías y entropías de las moléculas y átomos de interés en las reacciones.

Átomo / Molécula	$\Delta H \left(\frac{KJ}{Mol} \right)$	$\Delta S \left(\frac{J}{Mol} \right)$
CO ₂	-393,5	213,7
CO	-110,5	197,7
Al	0	28,33
C	0	5,74
Al ₂ O ₃	-1676	50,92
O ₂	0	205,1

Fuente: Autores

- **Cálculo de la energía libre de Gibbs para la reacción del CO con el aluminio a temperatura de referencia.**



- Cálculo de ΔH :

Ecuación 3. Cambio en la entalpia para la reacción del CO con el aluminio.

$$\Delta H = \Delta H_{\text{producto}} - \Delta H_{\text{reactivo}}$$

Fuente: [26].

$$\Delta H = \left(-1676 \frac{KJ}{mol}\right) - 3\left(-\frac{110,5KJ}{Mol}\right)$$

$$\Delta H = -1344,5 \frac{KJ}{mol}$$

- Cálculo de ΔS :

Ecuación 4. Cambio en la entropía para la reacción del CO con el aluminio.

$$\Delta S = \Delta S_{\text{producto}} - \Delta S_{\text{reactivo}}$$

Fuente: [26].

$$\Delta S = \left(3\left(5,74 \frac{J}{mol}\right) + 50,92 \frac{J}{mol}\right) - \left(3\left(197,7 \frac{J}{mol}\right) + 2\left(28,33 \frac{J}{mol}\right)\right)$$

$$\Delta S = -581,62 \frac{J}{mol}$$

$$\Delta S = -0,58162 \frac{KJ}{mol}$$

- Cálculo de ΔG para la temperatura de referencia 25°C:

Ecuación 5. Cambio de energía libre de Gibbs para la reacción del CO con el aluminio.

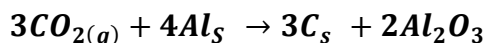
$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Fuente: [26].

$$\Delta G = -1344,5 \frac{KJ}{mol} - ((298K) \left(-0,58162 \frac{KJ}{mol} \right))$$

$$\Delta G = -1171,71 \frac{KJ}{Mol}$$

- **Cálculo de la energía libre de Gibbs para la primera reacción del CO₂ con el aluminio a la temperatura de referencia**



- Cálculo de ΔH :

Ecuación 6. Cambio en la entalpía para la primera reacción del CO₂ con el aluminio.

$$\Delta H = \Delta H_{producto} - \Delta H_{reactivo}$$

Fuente: [26].

$$\Delta H = 2 \left(-\frac{1676KJ}{mol} \right) - 3 \left(-393,5 \frac{KJ}{mol} \right)$$

$$\Delta H = -2171,5 \frac{KJ}{mol}$$

- Cálculo de ΔS :

Ecuación 7. Cambio en la entropía para la primera reacción del CO₂ con el aluminio.

$$\Delta S = \Delta S_{producto} - \Delta S_{reactivo}$$

Fuente: [26].

$$\Delta S = \left(3 \left(5,74 \frac{J}{mol} \right) + 2 \left(50,92 \frac{J}{mol} \right) \right) - \left(3 \left(213,7 \frac{J}{mol} \right) + 4 \left(\frac{28,33J}{mol} \right) \right)$$

$$\Delta S = -635,36 \frac{J}{mol}$$

- Cálculo de ΔG para la temperatura de referencia 25°C :

Ecuación 8. Cambio de energía libre de Gibbs para la primera reacción del CO_2 con el aluminio.

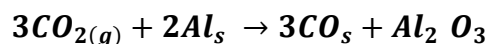
$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Fuente: [26].

$$\Delta G = -2171,5 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} - ((298\text{K}) \left(-0,63536 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right))$$

$$\Delta G = -1982,16 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$$

- **Cálculo de la energía libre de Gibbs para la segunda reacción del CO_2 con el aluminio a la temperatura de referencia**



- Cálculo de ΔH :

Ecuación 9. Cambio en la entalpia para la segunda reacción del CO_2 con el aluminio.

$$\Delta H = \Delta H_{\text{producto}} - \Delta H_{\text{reactivo}}$$

Fuente: [26].

$$\Delta H = \left(2 \left(-1676 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right) + 3 \left(-110,5 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right) \right) - 3 \left(-393,5 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right)$$

$$\Delta H = -2392,5 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$$

- Cálculo de ΔS :

Ecuación 10. Cambio en la entropía para la segunda reacción del CO_2 con el aluminio.

$$\Delta S = \Delta S_{\text{producto}} - \Delta S_{\text{reactivo}}$$

Fuente: [26].

$$\Delta S = \left(3 \left(197,7 \frac{J}{mol} \right) + 2 \left(50,92 \frac{J}{mol} \right) \right) - \left(3 \left(213,7 \frac{J}{mol} \right) + 2 \left(28,33 \frac{J}{mol} \right) \right)$$

$$\Delta S = -59,48 \frac{J}{mol}$$

$$\Delta S = -0,05948 \frac{KJ}{mol}$$

- Cálculo de ΔG para la temperatura de referencia ($25^{\circ}C$):

Ecuación 11. Cambio de energía libre de Gibbs para la segunda reacción del CO_2 con el aluminio.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Fuente: [26].

$$\Delta G = -2392,5 \frac{KJ}{mol} - ((298K) \left(-0,05948 \frac{KJ}{mol} \right))$$

$$\Delta G = -2374,7 \frac{KJ}{mol}$$

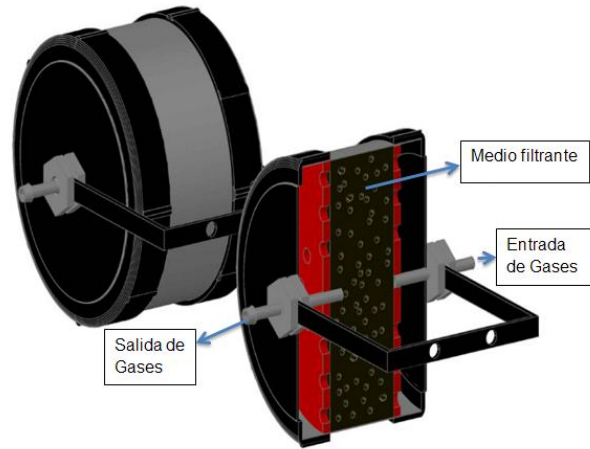
2.1.5. Tecnologías de reducción de emisiones de CO y CO_2 por medio de filtros

A continuación se presentan algunas de las tecnologías más utilizadas a nivel mundial y que están a la vanguardia en la reducción de emisiones de CO y CO_2 por medio de filtros.

- **Filtros de Ballena**

Un filtro de ballenas es un filtro de partículas diésel patentado de Sudáfrica diseñado para funcionar como un filtro diésel secundario para la eliminación de contaminantes de partículas de hasta 0,5 micras de tamaño en el combustible antes de la inyección. Se cree que la eliminación de contaminantes antes de la inyección puede mejorar la eficiencia de la inyección de combustible, promoviendo así la combustión eficiente, y que resulta en reducción de emisiones y consumo de combustible. Las pruebas de emisiones se realizaron en cuatro categorías de vehículos diferentes para validar esto [27].

Ilustración 1. Diagrama dimensional del filtro de ballena.



Fuente: [27].

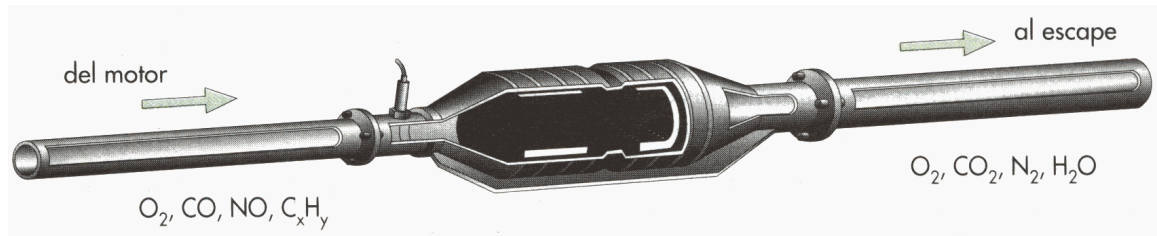
Cada prueba se llevó a cabo durante un período de aproximadamente 20 minutos en la variación de la velocidad del motor. La combinación de “Applus + AutologicAnalyser” un tecnología que se utilizó para medir las emisiones en cada etapa, y un procedimiento similar se siguió para medir las emisiones después de la instalación del filtro de ballena. Los resultados mostraron una reducción media significativa en CO monóxido de carbono (35,3%), óxidos de nitrógeno NO_x (26,1%) y de hidrocarburos HC (34,3%) de las emisiones resultantes después que se instaló el filtro de ballena en los cuatro vehículos [27].

▪ **Convertidor Catalítico**

El convertidor catalítico fue desarrollado debido a la necesidad de controlar y reducir las emisiones contaminantes, su principal función es la transformación de los gases peligrosos en otros menos nocivos para el ambiente y perjudiciales para la salud [28].

Este dispositivo empezó a ser utilizado a partir del año 1975, sufriendo considerables modificaciones con el paso de los años, lo que ha permitido reducir los niveles de emisiones contaminantes manteniéndolas dentro de los rangos establecidos en las normas, dichas mejoras han permitido la reducción de las emisiones convirtiéndolo en un dispositivo altamente efectivo que permite reducir el 90% de los gases nocivos [28].

Ilustración 2. Corte de un convertidor catalítico de contacto.



Fuente: [29]

El medio filtrante está compuesto de una película microscópica de una aleación de metales preciosos que en su mayoría son sustancias activas como óxido de aluminio, metales nobles como platino, rodio, paladio, que al entrar en contacto con los gases del motor reaccionan de tal forma que a la salida del escape se convierten en gases menos tóxicos [28].

2.2. MARCO CONTEXTUAL

Para las siguientes tablas de resumen se trabajó con los datos del “Anexo L” que corresponden a la energía libre de Gibbs que se obtuvo para las reacciones del CO y CO₂ de acuerdo a las tres temperaturas manejadas.

Tabla 5. Resumen de energía libre de Gibbs para la reacción del CO con el aluminio.

Temperatura	$\Delta G \left(\frac{KJ}{Mol} \right)$
T1 (36.5 °C)	-1164,4
T2 (37.8 °C)	-1163,4
T3 (40.4 °C)	-1162,13

Fuente: Autores

En la tabla 5, se observa que para la temperatura T1 (36.5 °C) el valor de la energía libre de Gibbs es mayor a las otras dos temperaturas, por ende se entiende que a medida que la temperatura disminuye la energía libre de Gibbs aumenta, es decir que la reacción ocurre con mayor espontaneidad a temperaturas bajas, aunque a temperaturas altas también reduce pues se ve que los valores de ΔG en las tres temperaturas son similares.

Tabla 6. Resumen de energía libre de Gibbs para la reacción del CO₂ con el aluminio para las dos reacciones.

Temperatura	$\Delta G \left(\frac{KJ}{mol} \right)$	
	Reacción 1	Reacción 2
T1(36.5 °C)	-1974,76	-2373,85
T2 (37.8 °C)	-1973,93	-2374
T3 (40.4 °C)	-1972,25	-2373,85

Fuente: Autores

En la tabla 6, se observa que para la reacción 1 temperatura T1 se obtuvo el valor más alto de ΔG dando a entender que en esta temperatura ocurre con mayor espontaneidad, y para la reacción 2 se tuvo que el ΔG fue más alto en la temperatura T2. También se observó que los valores de ΔG para las demás temperaturas en las dos reacciones presentan valores semejantes.

Se observa que las reacciones del Al con el CO₂ y CO, ocurren espontáneamente para las tres temperaturas razón por la cual se eligió al aluminio como reductor de emisiones en este trabajo.

2.3. MARCO CONCEPTUAL

Adsorción: la adsorción puede definirse como la tendencia de un componente del sistema a concentrarse en la interface, donde la composición interracial es diferente a las composiciones correspondientes al seno de las fases. El fenómeno de adsorción es de particular relevancia en la ciencia de los coloides y superficies. El proceso de adsorción de átomos y moléculas en las interfaces, es una de las principales formas en que las interfaces de alta energía pueden modificarse para disminuir la energía total del sistema [30].

Catalizador heterogéneo: el catalizador está presente en la reacción en una fase diferente a la de los reactivos. Generalmente el catalizador es un sólido y los reactivos son líquidos o gases. Uno de los inconvenientes que presenta los catalizadores heterogéneos es la desactivación, esta puede originarse por sinterizado de la superficie, envenenamiento irreversible provocado por alguna sustancia o ensuciamiento provocado por la deposición de carbón u otras sustancias [30].

Combustión: la reacción de combustión se basa en la reacción química exotérmica de una sustancia (o una mezcla de ellas) denominada combustible, con el oxígeno. Como consecuencia de la reacción de combustión se tiene la formación de una llama. Dicha llama es una masa gaseosa incandescente que emite luz y calor. En los productos de la combustión se puede encontrar N₂, CO₂, H₂O y SO₂ [30].

Combustión externa: es un cambio perjudicial en las características físicas, químicas y biológicas del ambiente, los suelos y el recurso hídrico, afectando nocivamente el bienestar de la población por efectos adversos en la salud y las especies en los ecosistemas. Los procesos industriales, el aumento de la población y las condiciones de vida del ser humano pueden malgastar y deteriorar los recursos naturales renovables por el aumento de agentes nocivos para el ambiente [31].

Combustión interna: un motor de combustión interna es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química de un combustible que arde dentro de una cámara de combustión. Su nombre se debe a que dicha combustión se produce dentro de la máquina en sí misma, a diferencia de, por ejemplo, la máquina de vapor [32].

Contaminación: es un cambio perjudicial en las características físicas, químicas y biológicas del ambiente, los suelos y el recurso hídrico, afectando nocivamente el bienestar de la población por efectos adversos en la salud y las especies en los ecosistemas. Los procesos industriales, el aumento de la población y las condiciones de vida del ser humano puede malgastar y deteriorar los recursos naturales renovables por el aumento de agentes nocivos para el ambiente [33].

Emisión: es la descarga de una sustancia o elemento al aire, en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de éstos, proveniente de una fuente fija o móvil [34].

Energía libre de Gibbs: los procesos que tienen reacciones químicas asociadas, tienen ciertos parámetros de mucha importancia, puesto que se indaga si una reacción se da sin estímulos externos (reacción espontánea), o por si el contrario si necesita alguna interacción con los alrededores para que suceda (no espontaneo). Una reacción tiene asociados tanto valores de energía (entalpía) como de entropía al momento de desarrollarse [35].

Gases de efecto invernadero: el término "efecto de invernadero" se refiere al papel que desempeña una capa de gases que retiene el calor del Sol en la atmósfera de la Tierra, haciendo que la temperatura interior sea más alta que la exterior. Este fenómeno se produce debido a que la energía generada por el sol llega a la tierra en forma de frecuencia alta, rebotando al exterior en forma de frecuencia baja. Es decir, solo una parte de la energía solar emitida desde la tierra atraviesa la capa de gases de invernadero la otra parte se queda dentro de la tierra haciendo que esta tenga una temperatura media promedio adecuada para el desarrollo del medioambiente [36].

Inmisión: es la cantidad de contaminantes presentes en una atmósfera determinada, una vez que han sido transportados, difundidos, mezclados en ella y a los que están expuestos los seres vivos y los materiales que se encuentran bajo su influencia. Si los niveles de inmisión no son los adecuados, disminuyen la calidad del aire y se origina los efectos negativos sobre los distintos receptores: el ser humano, los animales, los vegetales, los ecosistemas en su conjunto [37].

Motor Diésel: en teoría, el ciclo diésel difiere del ciclo Otto en que la combustión tiene lugar en este último a volumen constante en lugar de producirse a una presión constante. La mayoría de los motores diésel son asimismo del ciclo de

cuatro tiempos, salvo los de tamaño muy grande, ferroviario o marino, que son dedos tiempos. Las fases son diferentes de las de los motores de gasolina [32].

Oxidación-Reducción: actualmente el conocimiento de la naturaleza electrónica del átomo permite extender el concepto de oxidación-reducción a uno amplio conjunto de reacciones en las que no participa el oxígeno. Todas ellas tienen en común que algunos átomos ceden electrones y que otros los ganan. Es decir, tiene lugar una transferencia de electrones de unos átomos a otros. El concepto de oxidación va unido al concepto de reducción, ya que un átomo no puede perder electrones si no hay quien los gane, y viceversa [38].

Reacción endotérmica: la reacción endotérmica es una reacción química que absorbe energía. Casi todas las reacciones químicas implican la ruptura y formación de los enlaces que unen los átomos. Normalmente, la ruptura de enlaces requiere un aporte de energía, mientras que la formación de enlaces nuevos desprende energía. Si la energía desprendida en la formación de enlaces es menor que la requerida para la ruptura, entonces se necesita un aporte energético, en general en forma de calor, para obtener los productos [39].

Reacción exotérmica: son reacciones químicas que desprenden energía por ejemplo en la quema de combustibles y en la quema de carbón en donde ocurren varias reacciones, combinándose con el oxígeno del aire para formar dióxido de carbono. La redistribución de los enlaces químicos desprende gran cantidad de energía en forma de calor, luz y sonido. Aunque para la ruptura de los enlaces entre el carbono y el hidrógeno se requiere energía calorífica, ésta es mucho menor que la que se desprende cuando estos dos elementos se combinan con el oxígeno [39].

Tratamiento anodizado: es una técnica para modificar la superficie de un material, buscando una protección artificial que se genera sobre el metal mediante el óxido protector del metal. El anodizado también se obtiene por medio de procedimientos electroquímicos en donde se busca dar mayor resistencia y durabilidad al material. [40]

2.4. MARCO INSTITUCIONAL

- Universidad Santo Tomás

La Universidad Santo Tomás, fue fundada por la Orden de Predicadores el 13 de junio de 1580 en la ciudad de Bogotá, siendo el primer claustro universitario de Colombia. Esta cuenta con acreditación institucional de alta calidad.

El presente trabajo de grado, fue realizado en los laboratorios del cuarto piso de la universidad Santo Tomás, la cual nos facilitó el equipo medidor de gases, el motor de combustión y demás implementos necesarios para la realización del trabajo de grado. A su vez este trabajo será presentado en dichas instalaciones para otorgar el título de Ingeniería Ambiental. Esta institución se verá beneficiada con este trabajo ya que este es innovador y proponer otra alternativa tecnológica para mejorar la calidad de aire menos costosa.

2.5. MARCO LEGAL

En la Tabla 7 y 8, se presenta la normativa a nivel de emisión e inmisión y también algunos convenios internacionales relacionados con CO y CO₂.

Tabla 7. Normativa a nivel de emisión.

Norma	Resumen
Decreto 948 de 1995 (Junio 5).Presidente de la república.	Contiene reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire, establecen las normas y principios generales para la protección atmosférica, los mecanismos de prevención, control y atención de episodios por contaminación del aire generada por fuentes contaminantes fijas y móviles. Artículo 3. Tipos de Contaminantes del Aire. Son contaminantes de primer grado, aquellos que afectan la calidad del aire o el nivel de inmisión, tales como el ozono troposférico o smog fotoquímico y sus precursores, el monóxido de carbono, el material particulado, el dióxido de nitrógeno, el dióxido de azufre y el plomo. Artículo 37. Sustancias de Emisión Controlada en Fuentes Móviles Terrestres. Se prohíbe la descarga al

	<p>aire, por parte de cualquier fuente móvil, en concentraciones superiores a las previstas en las normas de emisión, de contaminantes tales como monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NOX), partículas, y otros que el Ministerio del Medio Ambiente determine, cuando las circunstancias así lo ameriten.</p>
<p>Resolución 6982 de 2011(Diciembre 27) Secretaría Distrital de Ambiente.</p>	<p>Por la cual se dictan normas sobre prevención y control de la contaminación atmosférica por fuentes fijas y protección de la calidad del aire.</p> <p>Artículo 14. Casos en los cuales se prohíben las descargas de contaminantes al aire. Prohíbese la descarga en el aire de contaminantes, tales como: material particulado, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno, por parte de cualquier persona natural o jurídica, pública o privada, que posea u opere una fuente fija de emisiones al aire, en los siguientes casos:</p> <p>a. En cantidades o concentraciones superiores a las previstas por las normas de emisión señaladas en la presente Resolución.</p> <p>b. Por medio de ductos o chimeneas que no cumplan con los requisitos y especificaciones señalados en la presente Resolución.</p>
<p>Resolución 909 de 2008(Junio 5) Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.</p>	<p>Por la cual se fijan los niveles permisibles de emisión de contaminantes producidos por las fuentes fijas de las áreas-fuente de contaminación alta Clase I; se adoptan medidas tendientes a prohibir el uso de aceites usados como combustibles en el Distrito Capital y se dictan otras determinaciones.</p> <p>Parágrafo primero. Los incineradores y hornos crematorios que se encuentren ubicados dentro del perímetro urbano del Distrito Capital, deberán cumplir con los límites permisibles de emisiones establecidos en la Resolución del Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial (MAVDT) No. 886 del 27 de Julio de 2004 ahora llamado Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.</p>

Fuente: Autores

Tabla 8. Normatividad a nivel de inmisión.

Norma	Resumen
<p>Resolución 610 de 2010 (Marzo 24).Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.</p>	<p>“Por la cual se modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006”</p> <p>Artículo 2. Modificar el Artículo 4 de la Resolución 601 de 2006 Niveles Máximos Permisibles para Contaminantes Criterio. Para el CO en un tiempo de exposición de 8 horas el nivel máximo permisible es de 10.000 (µg/m³) y para un tiempo de exposición de 1 hora el nivel máximo permisible es de 40.000 (µg/m³).</p> <p>Artículo 5.Modificar el Artículo 8 de la Resolución 601 de 2006, el cual quedará así:</p> <p>“Artículo 8. Mediciones de Calidad del Aire por las Autoridades Ambientales. Las autoridades ambientales competentes están obligadas a realizar mediciones de calidad del aire en el área de su jurisdicción, de conformidad con lo establecido en la presente resolución.</p> <p>Parágrafo Primero: Cuando las concentraciones de contaminantes en el aire puedan generar problemas a la salud de la población, las autoridades ambientales competentes informarán a las autoridades de salud, para que tomen las medidas a que haya lugar. Igualmente, la autoridad ambiental competente deberá contar con los equipos, herramientas y personal necesarios para mantener un monitoreo permanente que le permita determinar el origen de los mismos, diseñar programas de reducción de la contaminación que incluyan las medidas a que haya lugar para minimizar el riesgo sobre la salud de la población expuesta.</p> <p>Parágrafo Segundo: Las autoridades ambientales competentes están obligadas a informar al público sobre la calidad del aire de todos los parámetros e indicadores establecidos, presentando sus valores, su comparación con los niveles máximos permisibles, su significado y su impacto sobre el ambiente en el área de influencia.</p> <p>Esta información deberá ser difundida por lo menos cada tres (3) meses a través de los medios de comunicación para conocimiento de la opinión pública.</p> <p>Parágrafo Tercero: Las autoridades ambientales que usen modelos de dispersión de contaminantes deberán basarse en los modelos recomendados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) mientras el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial adopta la Guía Nacional de Modelación de</p>

	<p>Calidad del Aire.</p> <p>Artículo 6. Modificar el Artículo 10 de la Resolución 601 de 2006, el cual quedará así:</p> <p>Artículo 10. Declaración de los Niveles de Prevención, Alerta y Emergencia por Contaminación del Aire. La concentración a condiciones de referencia y el tiempo de exposición bajo los cuales se debe declarar por parte de las autoridades ambientales competentes los estados excepcionales de Prevención, Alerta y Emergencia, se establecen para CO así: para un tiempo de exposición de 8 horas se declara el estado de prevención si la concentración de CO es de 17.000 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), un estado de alerta si la concentración de CO es 34.000 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y un estado de emergencia se la concentración de CO es mayor a 46.000 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).</p>
--	---

Fuente: Autores

En la tabla 9 se presentan los convenios a los cuales Colombia se ha comprometido, para encontrar la información más detallada, ver anexo K.

Tabla 9. Convenios.

Convenio	Objeto / Ley que lo ratifica
Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono	Este convenio busca tomar las medidas apropiadas para proteger la salud humana y el medio ambiente / Ley 30 del 5 de marzo de 1990.
Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático	Su objetivo es establecer las concentraciones atmosféricas de gases efecto invernadero (GEI) / Ley 164 del 27 de octubre 1994.
Protocolo de Montreal relativo a las Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono	Su objetivo es proteger la capa de ozono adoptando medidas preventivas para controlar equitativamente el total de emisiones mundiales de las sustancias que la agotan/ Ley 29 de 1992.
Acuerdo para la Creación del Instituto Interamericano para la Investigación del	El acuerdo tiene como objetivos promover la cooperación regional para la investigación interdisciplinaria sobre aspectos del cambio global relacionados con la tierra / Ley 304 del 5 de agosto de 1996.

Cambio Global (LAL)	
Protocolo de Kioto relativo a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático	Su fin fue promover el objetivo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático / Ley 629 del 27 de diciembre de 2000.

Fuente: Autores

3. METODOLOGÍA

Se realizó una investigación exploratoria, con el fin de evaluar las propiedades reductoras del aluminio, ya que presenta una elevada capacidad como reductor químico, tal como se demostró con los cálculos de la energía libre de Gibbs para cada una de las reacciones químicas del aluminio con los gases de acuerdo a las temperaturas obtenidas (ver “ANEXO L”).

Para esto se realizó el diseño experimental de una columna donde los gases de combustión emitidos por un motor diésel entran en la parte inferior de esta y ascienden (debido las diferencias de temperatura y el gradiente térmico del gas en la troposfera) pasando por un filtro de aluminio que se ubicó en una de las tres alturas que se determinaron para las mediciones con el fin de identificar la temperatura a la que entran en contacto los gases con el aluminio y así sucesivamente para las diferentes alturas, también se varió el tipo físico del aluminio (granalla y polvo) y la cantidad en masa del filtro (150g y 300g) en cada una de las temperaturas determinadas para la columna (estando está en función de las tres alturas) y de esta forma conocer si estas variables tienen incidencia en la reducción de las concentraciones de CO y CO₂ y los cambios en las concentraciones de O₂.

El filtro de aluminio está compuesto de una tela “Cambre” la cual soportaba el aluminio y permitía el paso de los gases emitidos por el motor como se observa en la ilustración 3, además demostró una buena resistencia a las temperaturas que se manejaron. Cabe aclarar que solo se utilizó un filtro para cada altura, en cuanto a las demás alturas en el momento de la medición se encontraban descubiertas para permitir el paso de los gases dentro de la columna.

Ilustración 3. Filtro sin aluminio y con aluminio.

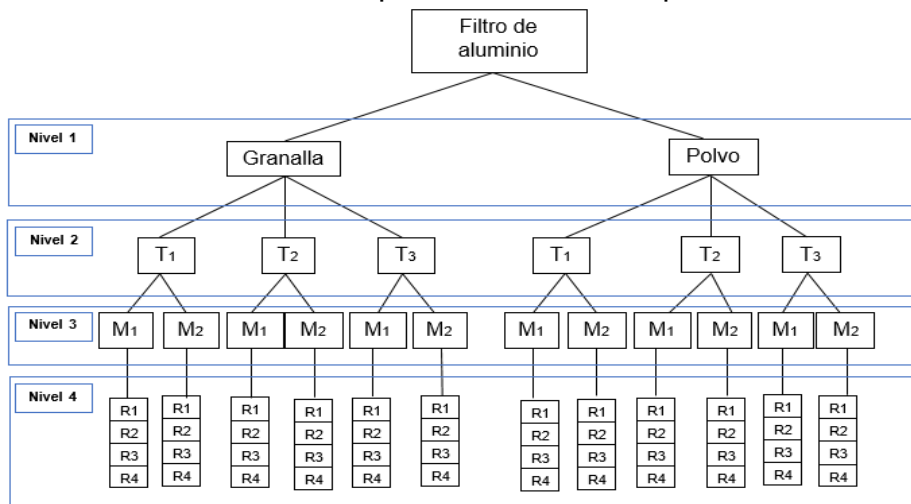


Fuente: Autores

3.1. ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA

Se planteó una metodología de diseño experimental factorial con 4 niveles como lo muestra la ilustración 4.

Ilustración 4. Esquema del diseño experimental.



Fuente: Autores

3.1.1. Nivel 1: Tipo físico del aluminio

El primer nivel representa los dos tipos físicos del aluminio que se utilizaron para realizar los filtros (granalla y polvo) como se observa en la ilustración 5, con el fin de identificar cuál de estas dos presentaciones tiene una mayor incidencia en la reducción de emisiones de CO y CO₂, ya que tienen propiedades adsorbentes diferentes.

Ilustración 5. Tipo físico del aluminio (Granalla y Polvo).



Fuente: Autores

3.1.2. Nivel 2: Temperatura

El segundo nivel corresponde a las tres temperaturas promedio que se obtuvieron de acuerdo a las tres alturas manejadas en la columna, entonces:

- T1: Corresponde a la temperatura promedio que se obtuvo a la altura de 2.3m, equivalente a 36,5 °C.
- T2: Corresponde a la temperatura promedio que se obtuvo a la altura de 1.7m, equivalente a 37.8 °C.
- T3: Corresponde a la temperatura promedio que se obtuvo a la altura de 1m, equivalente a 40.4 °C.

Para obtención de las temperaturas en cada una de las alturas, el motor se dejaba prendido durante cinco minutos aproximadamente y se tomaba el dato del termómetro digital en las alturas de forma individual hasta que se estabilizara la temperatura para luego realizar la medición de los gases.

A continuación se presenta la ilustración 6, en donde se identifican las tres alturas y tres temperaturas utilizadas dentro de la columna para la experimentación.

Ilustración 6. Identificación de alturas y temperaturas.



Fuente: Autores

3.1.3. Nivel 3: Masa del filtro de aluminio

Se trabajó con dos masas de aluminio para conocer el efecto de la cantidad de aluminio sobre la reducción de las emisiones de CO y CO₂, para esto, a cada altura en la que se puso el filtro también se varió la cantidad de aluminio en 150g y 300g que tendrá dicho filtro, se realizaron las mediciones con dichas cantidades y se determinó con que cantidad de aluminio se presenta la mayor reducción o por el contrario la cantidad no afecta en la reducción de los gases.

3.1.4. Nivel 4: Replicas de muestreo

Utilizando dos tipos de aluminio, tres temperaturas y dos masas de aluminio, se obtuvo un total de 12 muestras y para cada muestra se realizaron 4 réplicas con el fin de tener datos confiables, logrando así tener mayor precisión en los análisis.

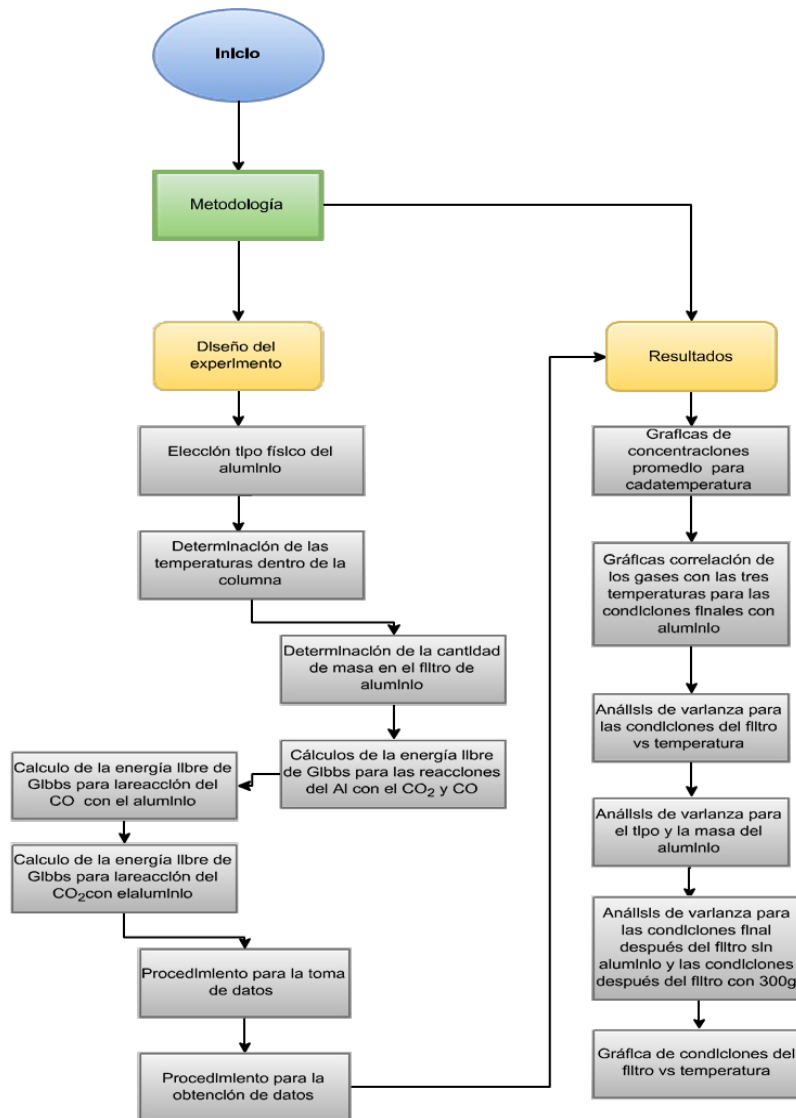
$$2 \text{ Tipo de aluminio} * 3 \text{ Temperaturas} * 2 \text{ Masas} = 12 \text{ Muestras}$$

- $4 \text{ Replicas} * 12 \text{ Muestras} = 48 \text{ replicas.}$

3.2. DIAGRAMA DE FLUJO

En la ilustración 7, se presenta el diagrama de flujo empleado en la metodología para el diseño experimental del filtro de aluminio y el análisis de los resultados.

Ilustración 7. Diagrama de flujo para la metodología.



Fuente: Autores

3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

Variables independientes (Condición del filtro):

- Condición inicial: es la condición antes del filtro de aluminio en donde se presenta la mayor concentración de gases provenientes del motor diésel.
- Condición final sin aluminio: es la condición después del filtro sin aluminio, con el fin de conocer la incidencia de la tela quirúrgica que soporta el aluminio.
- Condición final con aluminio granalla 150g: es la condición después del filtro de aluminio utilizando granalla como tipo y de masa 150g de aluminio.
- Condición final con aluminio granalla 300g: es la condición después del filtro de aluminio utilizando granalla como tipo y de masa 300g de aluminio.
- Condición final con aluminio polvo 150g: es la condición después del filtro de aluminio utilizando polvo como tipo y de masa 150g de aluminio.
- Condición final con aluminio polvo 300g: es la condición después del filtro de aluminio utilizando polvo como tipo y de masa 300g de aluminio.

Variable dependiente:

- Eficiencia de reducción (%) de las concentraciones de CO y CO₂.
- Temperatura: previamente en la ilustración 6 se visualiza la temperatura promedio en cada una de las tres alturas. Como se explicó anteriormente la temperatura se tomaba cuando esta se estabilizara en la altura que se estaba midiendo.

Variables ambientales:

- Presión: la presión que se tuvo en el experimento es de 560 mmHg para la zona de Chapinero, Bogotá.

Constantes:

- Altura: se manejaron tres alturas de 1m, 1.7m y 2.3m con el fin de obtener la temperatura promedio en cada una, dicha temperatura se calculó de forma individual con los promedios obtenidos de las diferentes replicas realizadas.

3.4. TOMA DE DATOS

Para la obtención de los datos de concentración de CO, CO₂ y O₂ dentro de la columna, se utilizó un analizador de emisiones de automóvil NHA- 406/506/206, que mide la concentración de HC, CO, CO₂, O₂ y NO₂, tal como se observa en la ilustración 8. Este equipo se utilizó ya que es de muy fácil manejo y operación, contando con tiempos de respuesta rápidos para los diferentes contaminantes evaluados y es el único medidor de gases en la Universidad Santo Tomás el cual se encuentra en las instalaciones de laboratorios, facilitando el acceso a este equipo en los días que se realizaron las mediciones.

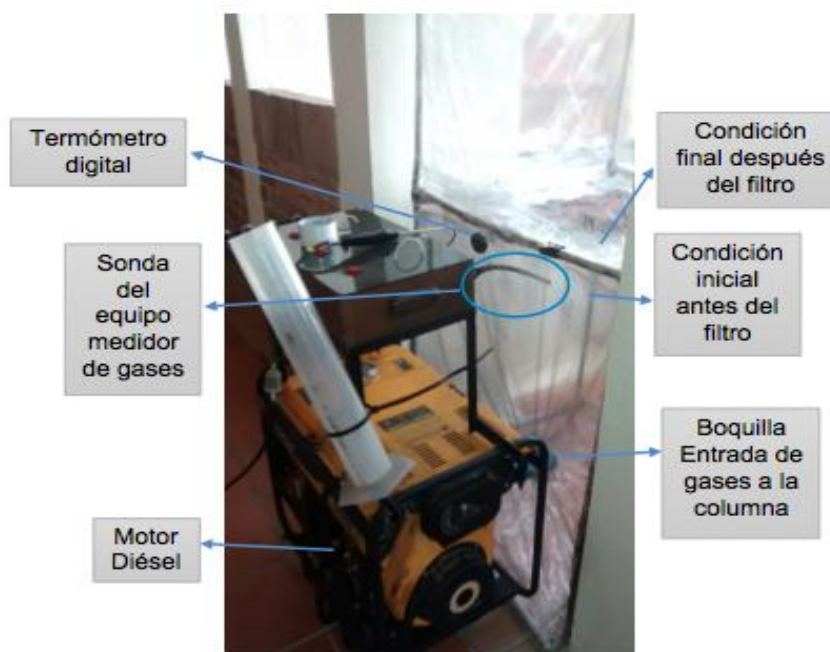
Ilustración 8. Equipo medidor de gases y motor diésel.



Fuente: Autores

Tal como se muestra en la ilustración 9, las mediciones se realizaron antes y después del filtro de aluminio con el fin de comparar los cambios en las concentraciones de CO, CO₂ y O₂, respecto a las variables planteadas. Los datos que se obtenían en porcentaje para los diferentes gases se pasaban a una base de datos para su posterior análisis.

Ilustración 9. Identificación de condiciones y caracterización del diseño experimental.



Fuente: Autores

3.5. PROCEDIMIENTOS PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS

Para obtención de los datos de las diferentes condiciones (ver ilustración 9) se establecieron las siguientes procedimientos en el laboratorio.

- Se preparaba el equipo medidor de gases NHA- 406/506/206 para las mediciones, con una fase inicial de calentamiento y posteriormente un test de fugas obligatorias para el correcto funcionamiento del equipo.
- La columna se ubicaba en el lugar establecido, verificando que esta no tuviera ninguna entrada de aire, que pudiera afectar la muestra.
- Se tomaba la muestra de la condición ambiente o blanco introduciendo la sonda del equipo medidor de gases dentro de la columna, para verificar que no existiera concentración de CO y CO₂ que pudieran alterar las muestras.

- El tubo de escape del motor diésel se conectaba a la boquilla de la columna situada en la parte inferior de esta, permitiendo la entrada de gases (ver ilustración 9).
- Se ubicaba el termómetro digital en la columna, a la altura que se fuera a realizar la medición (ver ilustración 9), para establecer la temperatura promedio en dicha altura.
- Se ubicaba el filtro sin aluminio a la altura que se fuera a realizar la medición.
- Se prendía el motor dejándolo aproximadamente 5 minutos hasta que la temperatura se estabilizara dentro de la columna y se procedía a medir la condición inicial antes del filtro y la condición final después del filtro sin aluminio para CO, CO₂ y O₂ (ver ilustración 9).
- Una vez realizada la medición se abría una parte de la columna para dejar salir los gases completamente, con el fin de asegurar que estos no afectaran la siguiente medición, este procedimiento finalizaba una vez la columna estaba libre de gas.
- Se procedía a colocar el aluminio en el filtro y posteriormente se cerraba la columna para realizar la medición de la condición final después del filtro con aluminio
- Se realizaron los procedimientos descritos para cada una de las alturas seleccionadas.

3.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de obtener los datos de las concentraciones de los gases (CO, CO₂ y O₂,) para cada una de las condiciones del filtro, se procedió a realizar las gráficas de concentraciones promedio para cada temperatura.

Posterior a esto se realizaron diferentes graficas en donde se detalla las condiciones del filtro con relación a las concentraciones y la temperatura, para cada uno de los gases estudiados.

Se realizó una prueba de normalidad de los datos con las gráficas Q-Q normal, con el fin de reconocer si los datos obtenidos presentan un comportamiento normal y de esta forma poder realizar los ANOVA.

Se utilizó una distribución de probabilidad T-Student, con el fin observar si existían diferencias significativas entre las condiciones del filtro inicial sin aluminio y condición final con aluminio granalla 300 g, para las diferentes concentraciones de los gases.

Se realizaron tres análisis de varianza ANOVA de dos factores ya que los datos presentaron un comportamiento normal de distribución. El primero ANOVA se hizo con el fin de conocer la relación entre las condiciones del filtro y la temperatura, el segundo análisis se hizo comparando el tipo físico de aluminio y la masa en gramos de aluminio, el tercero para comparar las condiciones finales después del filtro sin aluminio y las condiciones después del filtro con aluminio de 300g, también se obtuvieron los porcentajes de reducción para cada una de las concentraciones de los gases estudiados.

Tanto para la prueba de normalidad como para los análisis estadísticos de varianza se utilizó el software “SPSS Statistics” suponiendo que:

Hipótesis nula (Ho): donde las condiciones del filtro no afectan las concentraciones de los gases ($C1=C2=C3=C4=C5=C6$).

Hipótesis alternativa (H1): Donde al menos uno de las condiciones del filtro afecta las concentraciones de los gases ($C1 \neq C2 \neq C3 \neq C4 \neq C5 \neq C6$)

Por último se calculó la eficiencia en porcentaje de reducción del aluminio con relación a los gases, de acuerdo a las condiciones del filtro final con aluminio.

Tabla 10. Tabla resumen.

Gases	Condiciones del filtro (C)					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
CO	Condición inicial antes del filtro	Final sin aluminio	Final con aluminio granalla 150 g	Final con aluminio granalla 300g	Final con aluminio polvo 150g	Final con aluminio polvo 300g
CO ₂						
O ₂						

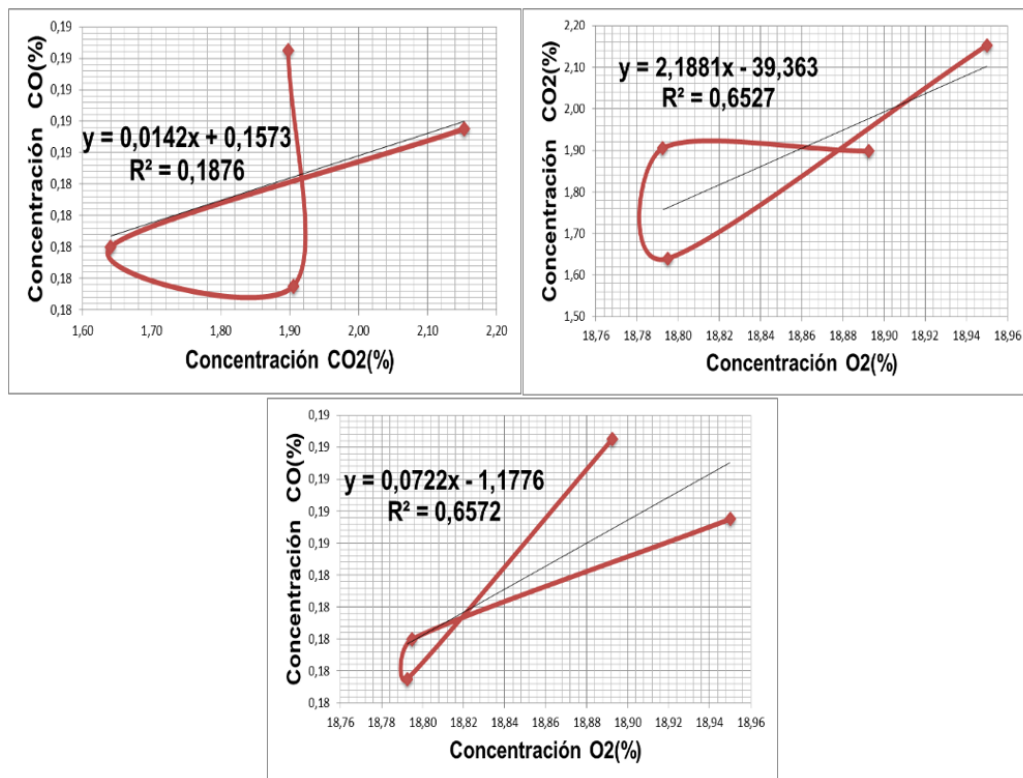
Fuente: Autores

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. GRÁFICAS DE CORRELACIÓN DE LOS GASES PARA LAS CONCENTRACIONES PROMEDIO DE LA CONDICIÓN FINAL CON ALUMINIO PARA LAS TRES TEMPERATURAS

Para identificar si existe algún tipo de correlación entre CO, CO₂ y O₂ que ayude a entender el comportamiento de estos gases de acuerdo a la condición final con aluminio para las tres temperaturas, se realizaron diferentes gráficas de correlaciones utilizando los datos de los “ANEXO D, E y F” respectivamente, teniendo en cuenta las columnas de condición final después del filtro con aluminio.

Gráfica 1. Correlación de los gases para las concentraciones promedio de la condición final con aluminio para la temperatura T1 a 2,3 m de altura.

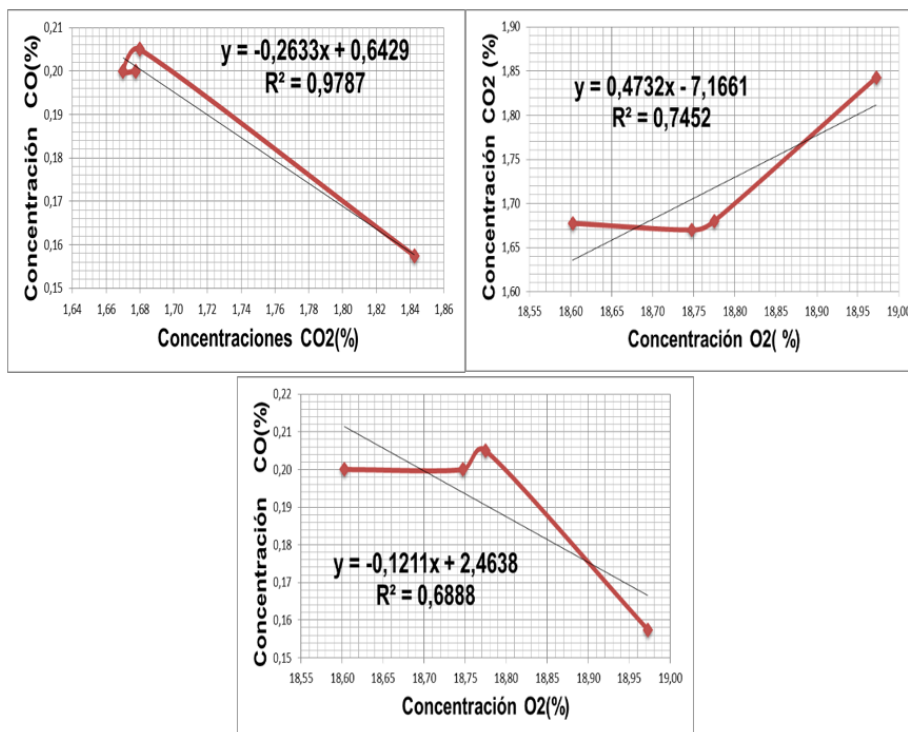


Fuente: Autores

En la gráfica 1, se observa que para las concentraciones de CO con relación al CO₂ no presentan un buen ajuste en los datos, es decir existe una baja relación ya

que el modelo no explica la dependencia entre los dos gases, afirmando que se comportan de forma independiente. Caso contrario para la relación con el O₂, este con un valor de R² mayor, explica que el modelo lineal sea el adecuado para la relación que exista con el CO, por esta razón se podría asegurar que a medida que cambien las concentraciones de CO las concentraciones del O₂, también y por tal razón se comportan de manera dependiente. En la gráfica 1 también se observa que con el valor de R² el ajuste del modelo es bueno para relación del CO₂ y el O₂, el modelo lineal explica la relación entre estos dos gases.

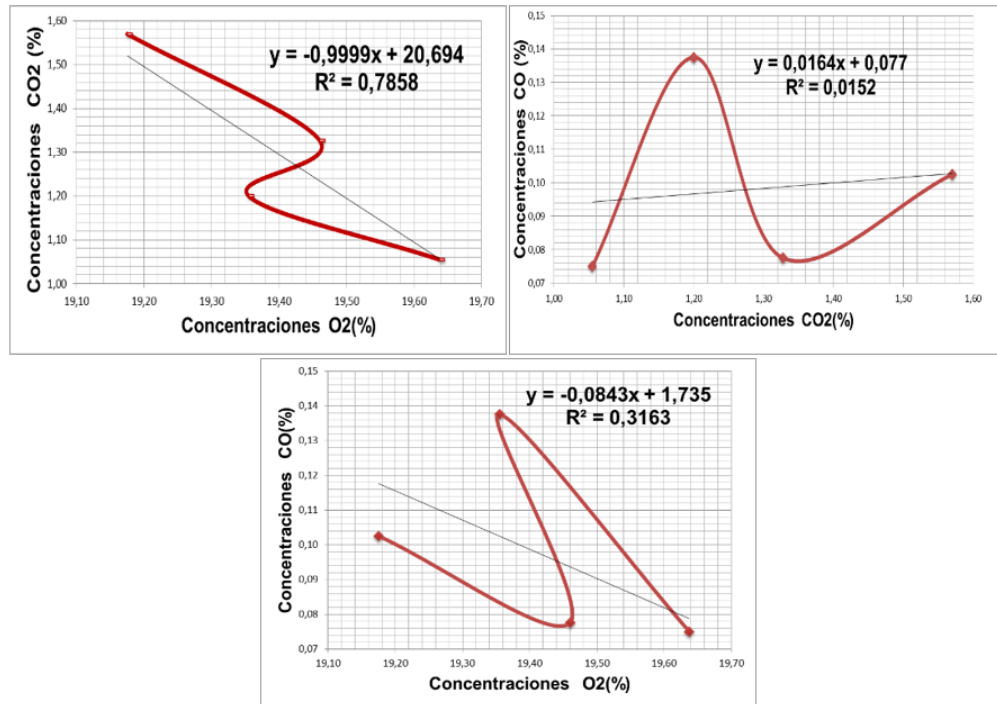
Gráfica 2. Correlación de los gases para las concentraciones promedio de la condición final con aluminio para la temperatura T2 a 1,7m de altura.



Fuente: Autores

En la gráfica 2, se observa que para las concentraciones de CO con relación al CO₂ presentan un buen ajuste en los datos, es decir existe una relación con este gas y de la misma forma para la relación con el O₂, este último con un valor de R² menor, sin embargo se explica que los modelos lineales sean los adecuados para la relación que exista entre los tres gases, por esta razón se podría asegurar que a medida que cambien las concentraciones de CO las concentraciones de los demás gases también se comportan de manera dependiente, de igual forma en la gráfica 2, se observa que con el valor de R² el ajuste del modelo es bueno para relación del CO₂ y el O₂, el modelo lineal explica la relación entre estos dos gases.

Gráfica 3. Correlación de los gases para las concentraciones promedio de la condición final con aluminio para la temperatura T3 a 1 m de altura.



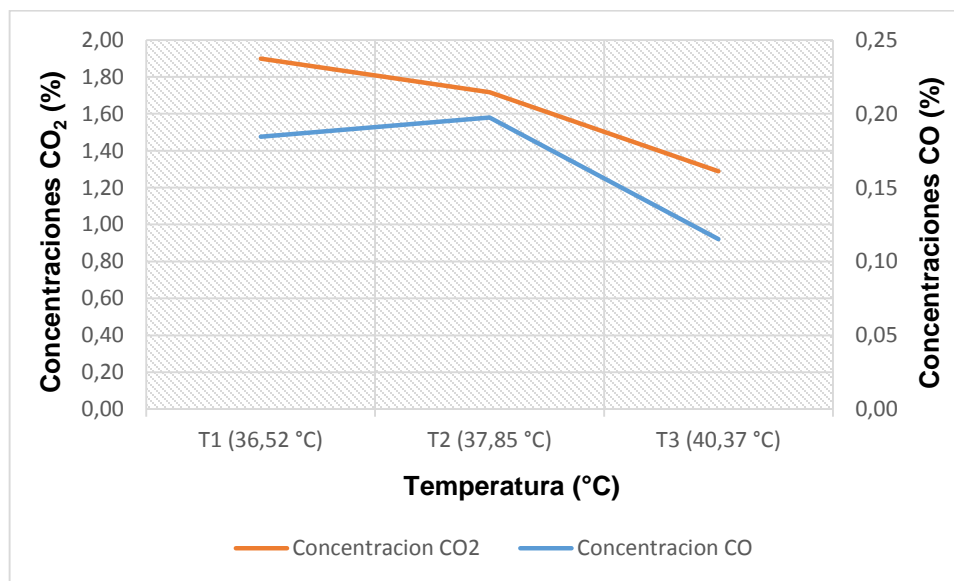
Fuente: Autores

En las gráfica 3, se observa que para las concentraciones de CO con relación al CO₂ no presentan un buen ajuste en los datos, es decir no existe una relación con este gas y de las misma forma para la relación con el O₂, ya que se obtuvo un R² que no explica que los modelos lineales sean los adecuados para la relación que exista entre los tres gases, por esta razón no se podría asegurar que a medida que cambien las concentraciones de CO las concentraciones de los demás gases también, contrario a eso se comportan de manera independiente, igualmente en la gráfica 3, se observa que con un valor de R² el ajuste del modelo es bueno para el CO₂ y el O₂, el modelo linean explica la relación entre estos dos gases.

4.2. GRÁFICAS DE RELACIÓN DE LOS GASES CON LAS TRES TEMPERATURAS PARA LAS CONDICIONES FINALES CON ALUMINIO.

Para estas gráficas, se trabajó con los datos de los “ANEXO D, E y F” respectivamente, teniendo en cuenta la condición final después del filtro con aluminio con tipo físico (granalla y polvo) y de masas (150g y 300g).

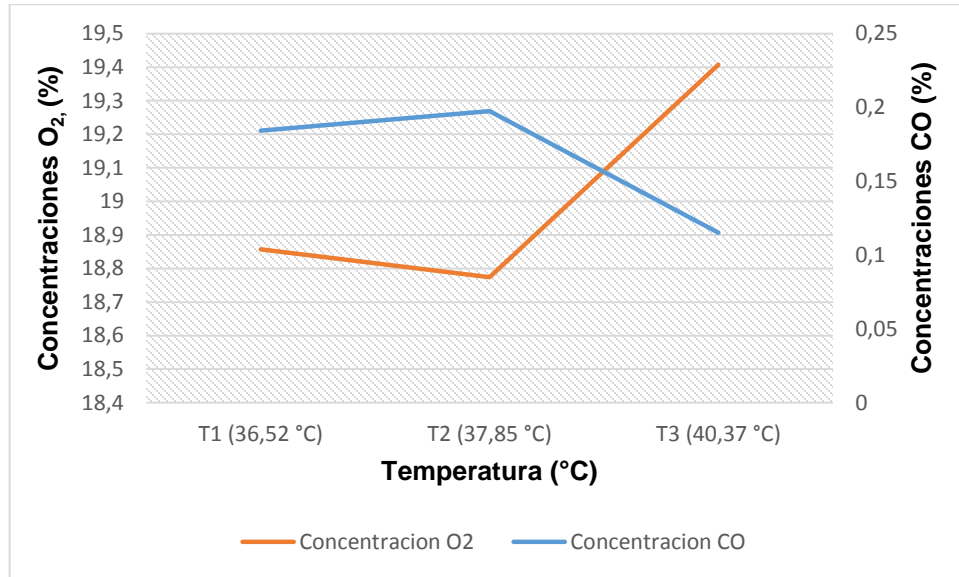
Gráfica 4. Relación de CO₂ y CO vs Temperatura.



Fuente: Autores

Para la gráfica 4, se observa que la temperatura influye en la reducción de las concentraciones de CO y CO₂, en donde el CO presenta mayores niveles de reducción de sus concentraciones con una temperatura T3, no obstante en la temperatura T2 se presenta una menor reducción de las concentraciones. En cuanto al CO₂ presento mayor reducción de sus concentraciones en la temperatura T3. La relación que presentan estos dos gases es baja ya que como se observa la reducción del CO tiene baja incidencia en la reducción del CO₂ y como se observa en la gráfica 1 estos dos gases no presentan un buen ajuste en los datos para la temperatura T1, sin embargo el aumento de las concentraciones de CO en la temperatura T2 pudo verse favorecida por el CO₂ ya que filtro de aluminio pudo incidir en la reducción de este gas generando O₂ y dejando enlaces libres para la formación de CO.

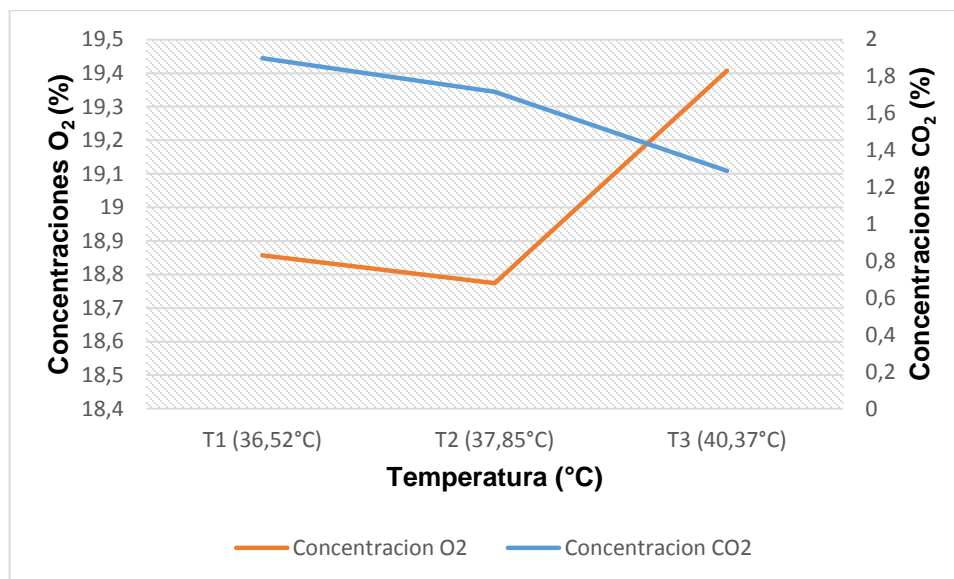
Gráfica 5. Relación de O₂ y CO vs Temperatura.



Fuente: Autores

En la gráfica 5, se observa que la temperatura influye en la reducción de las concentraciones de CO y el aumento de las concentraciones de O₂ para la temperatura T2. Además se observa que a medida que aumenta el O₂, las concentraciones de CO disminuyen, esto puede deberse a que el filtro de aluminio en el momento de entrar en contacto con el CO reduce sus concentraciones generando enlaces de O₂ y favoreciendo el aumento de las concentraciones de este gas, también como se observa en la gráfica 1 en la temperatura T1 el O₂ y CO presentan una relación significativa en el ajuste de los datos, por otro lado existe una relación significativa para los gases O₂ y CO en la temperatura T3 ya que tienden a comportarse de manera dependiente puesto que la reducción de CO favorece el aumento de las concentraciones de O₂.

Gráfica 6. Relación de O₂, y CO₂ vs Temperatura.



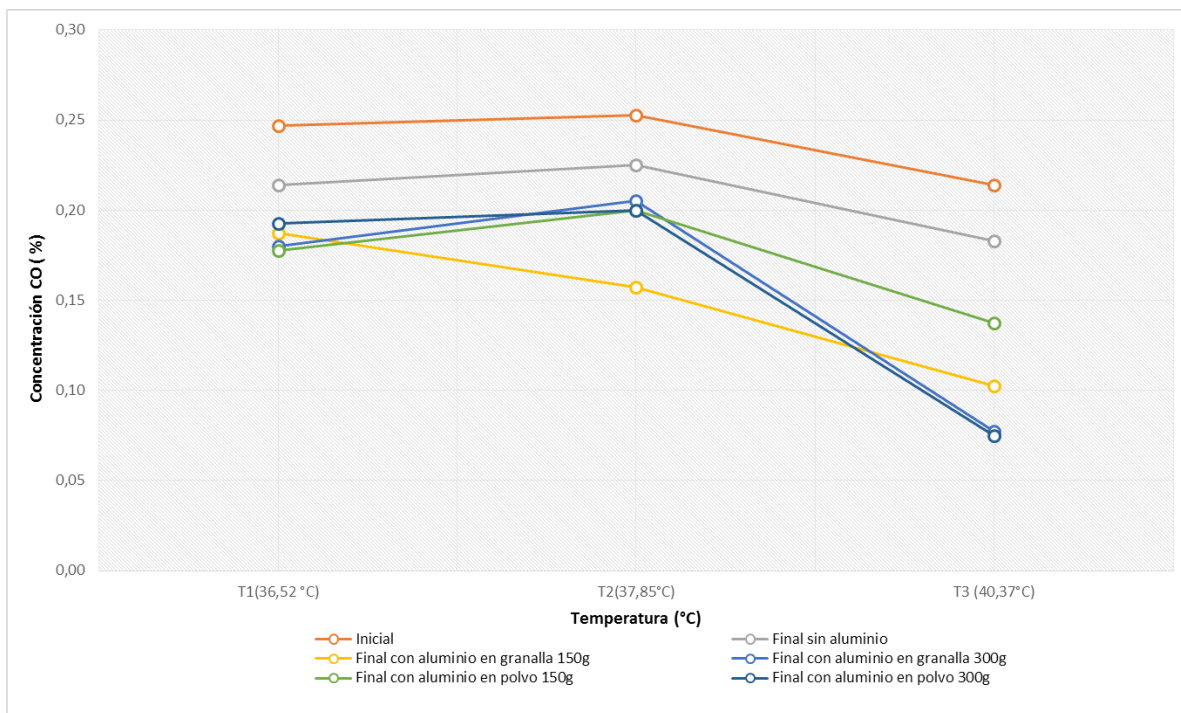
Fuente: Autores

En la gráfica 6, se observa que la temperatura influye en la reducción de las concentraciones de CO₂, siendo el rango entre las temperaturas T2 y T3 en donde se presentó la reducción de este gas y el aumento de las concentraciones de O₂, de igual forma como se observa en la gráfica 5 el CO₂, tienen un comportamiento similar a las concentraciones del CO con respecto al O₂ pues al disminuir su concentración debido a la reacción de CO con el filtro de aluminio las concentraciones de oxígeno se ven favorecidas y de igual forma se presenta para el CO₂ ya que el filtro de aluminio pudo incidir en la reducción de estos gases generando enlaces libres para la formación de O₂. La relación que presentan el CO₂ y O₂ es favorable dado que como se observa la reducción del CO₂ favorece en el aumento de las concentraciones de O₂.

4.3. GRÁFICAS DE CONDICIONES DEL FILTRO VS TEMPERATURA

Para observar gráficamente el comportamiento de los gases e identificar la condición óptima experimental, se realizaron graficas de concentración vs temperatura para cada uno de los gases, tomando los datos del “ANEXO G, H, I”.

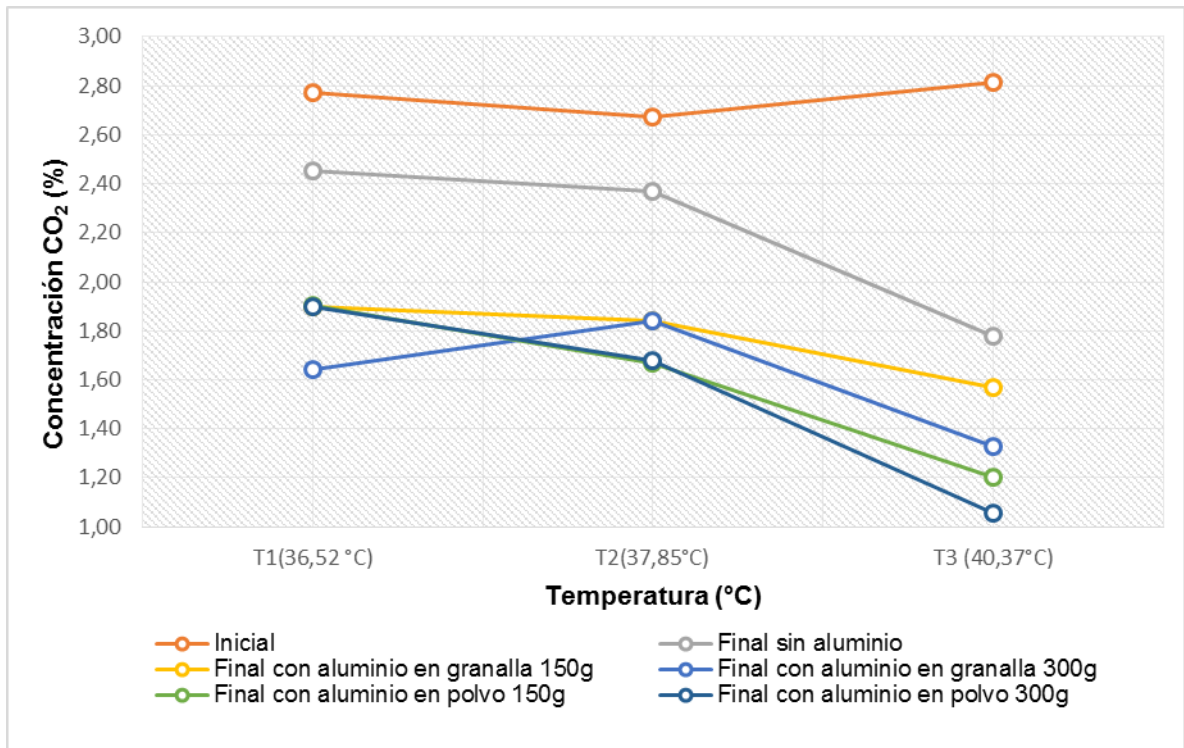
Gráfica 7. Concentración CO (%) vs Temperaturas (°C).



Fuente: Autores

En la gráfica 7, se observa una diferencia significativa en la reducción de las concentraciones de CO para la condición final del filtro con aluminio 300 g polvo , seguida por la condición final del filtro con aluminio granalla 300g, en la temperatura T3. También se observó que en la temperatura T2 las reducciones de CO fueron iguales para las condiciones finales del filtro con polvo (150g – 300g) y granalla 300 g a diferencia de la condición final con aluminio granalla 150g que presento una menor reducción en esta temperatura. En la temperatura T1 se observó que para la condición final con aluminio en polvo 150g presento mayor reducción de las concentraciones de CO en la misma manera que la condición final con aluminio en polvo 300g. También se observa que la condición final sin aluminio presento una reducción significativa en la temperatura T3, eso pudo deberse a que la tela “Cambre” utilizada para situar el aluminio, incidiera en la reducción de las concentraciones del CO.

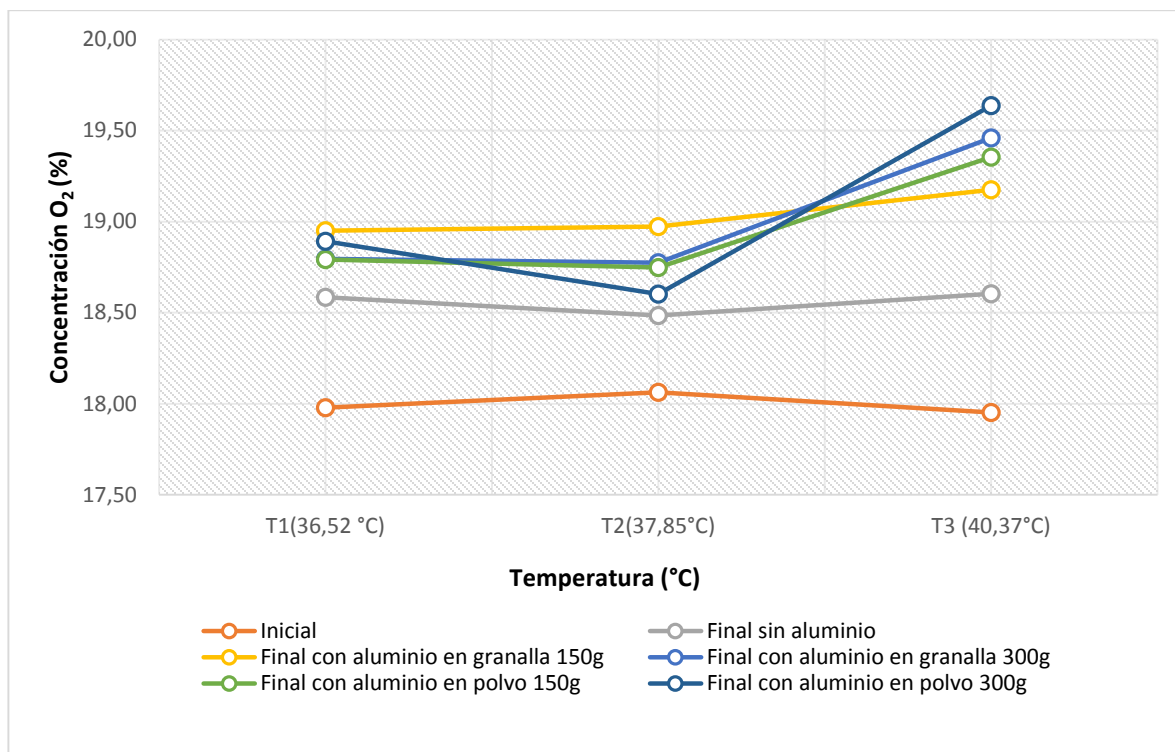
Gráfica 8. Concentración CO₂ (%) vs Temperaturas (°C).



Fuente: Autores

En la gráfica 8, se observa que la condición final con aluminio en polvo 300 g fue la que tuvo un mayor porcentaje de reducción en las concentraciones de CO₂, a la temperatura T3. En la temperatura T2 el porcentaje de reducción fue el mismo para las condiciones finales con aluminio en polvo (150g y 300g) y también el mismo para las condiciones finales con aluminio en granalla (150g y 300g), dando a entender que para la temperatura T3 la cantidad de aluminio no afecta las concentraciones de CO₂ siendo el tipo físico del aluminio la variable que influye más en esta temperatura.

Gráfica 9. Concentración O₂, (%) vs Temperaturas (°C).



Fuente: Autores

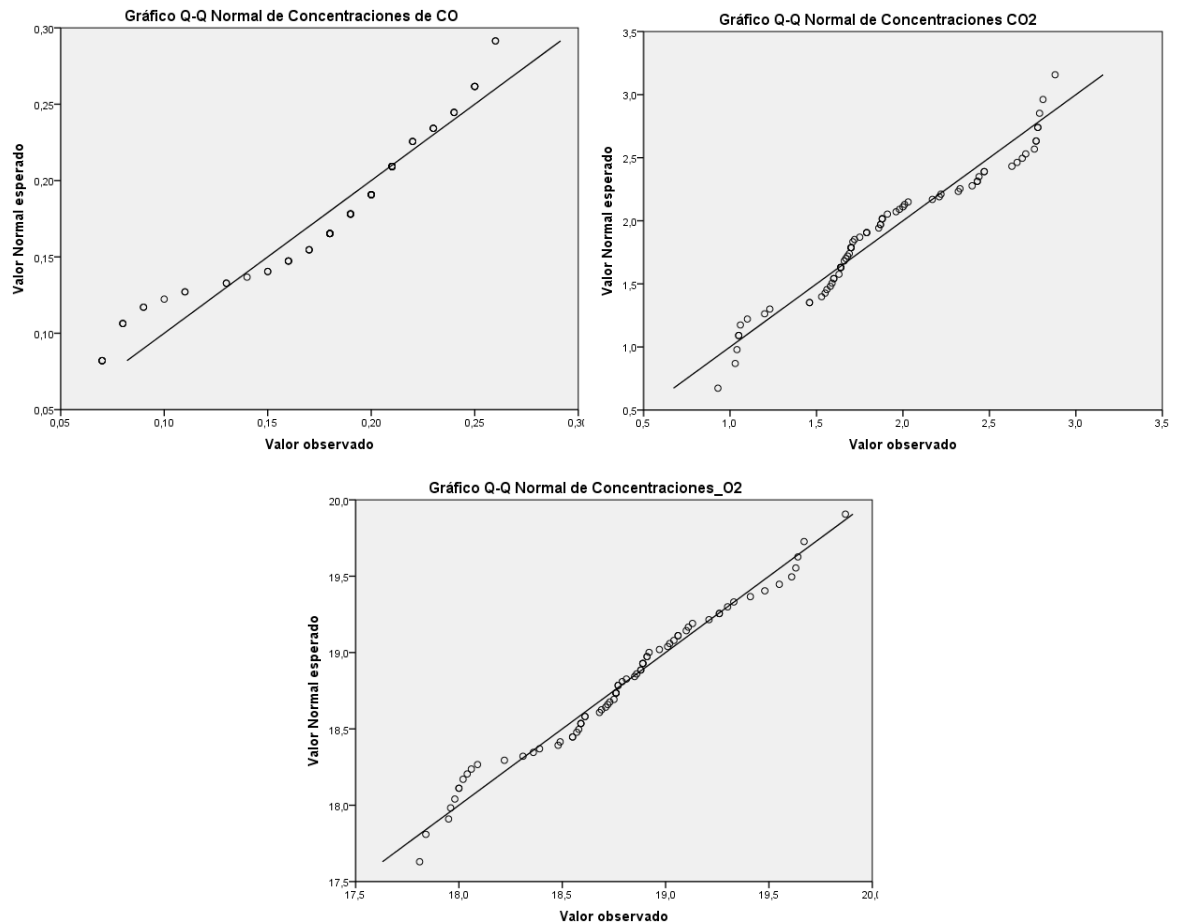
En la gráfica 9, se puede observar que las concentraciones de O₂, aumentaron en las tres temperaturas para las condiciones finales con aluminio aunque en mayor medida para la condición final con aluminio 300g para la temperatura T3. También se observa que en las temperaturas T1 y T2 hay una reducción similar con respecto a la condición final con aluminio en polvo 150 g y la condición final con aluminio en granalla 300g, esto puede suceder ya que como el aluminio en polvo reduce más, al aumentar la cantidad al doble para granalla, esta compensa la reducción.

De acuerdo a lo observado en las diferentes graficas de condiciones del filtro vs temperatura, se evidencia que el aluminio en polvo 300 g en la temperatura T3 (40,37°C) fue la que obtuvo una reducción de la concentración de los gases de CO, CO₂ mayor a comparación de las otras condiciones del filtro, entonces se deduce que esta condición es la óptima experimental en la que se ve favorecida la reducción de los gases.

4.4. PRUEBA DE NORMALIDAD DE LOS DATOS

Se realizó una prueba de normalidad para las concentraciones de CO, CO₂ y O₂, con el fin de saber si los datos tienen un comportamiento normal y así poder realizar los ANOVA. Se utilizó las gráficas Q-Q normal que muestra los datos de las concentraciones frente a los datos esperados en un comportamiento normal, tomando los datos del “ANEXO G, H, I”.

Gráfica 10. Prueba de normalidad



Fuente: Autores

En la gráfica 10, se observa que las concentraciones de CO, CO₂ y O₂, presentan un comportamiento normal y por esto es adecuado realizar los ANOVA para saber el grado de significancia de las variables estudiadas.

4.5. CÁLCULO DE T-STUDENT

El cálculo de T-Student se realizó con el fin de identificar si existe diferencia significativa en la reducción de las concentraciones de los gases por el filtro de aluminio. Se asumió un nivel de significancia del 5% y un nivel de confianza del 95%. Para los datos de la tabla 11 se trabajaron con los datos del “ANEXO J”.

Tabla 11. Cálculo del T-Student.

Gases	Estadístico t	Valor crítico de t (dos colas)	P(T<=t) dos colas
Monóxido de carbono	31,41130895	2,570581836	6,14001E-07
Dióxido de carbono	46,9732755	2,44691185	6,2388E-09
Oxígeno	-9,41135831	3,18244631	0,00254178

Fuente: Autores

Se observó que entre los gases y las diferentes condiciones del filtro existe diferencia significativa ya que el valor de P fue menor a 0.05 en cada uno de los casos, por ende el aluminio si representa una reducción en las emisiones de los gases.

4.6. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LAS CONDICIONES DEL FILTRO VS TEMPERATURA

Con el fin de identificar si las condiciones del filtro y la temperatura tienen algún efecto en las concentraciones de CO, CO₂ y O₂, se realizaron tres análisis estadísticos. Para estos análisis se trabajó con el “ANEXOS G” para el CO, el “ANEXO H” para el CO₂ y con el “ANEXO I” para el O₂, con un nivel de significancia del 5% y un nivel de confianza de 95%.

Tabla 12. ANOVA para CO para las condiciones del filtro vs temperatura.

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	,185 ^a	17	,011	111,417	,000
Intersección	2,329	1	2,329	23843,957	,000
Condición del filtro	,079	5	,016	161,519	,000
Temperatura	,083	2	,041	424,081	,000
Condición del filtro * Temperatura	,023	10	,002	23,832	,000
Error	,005	54	9,769E-5		
Total	2,520	72			
Total corregido	,190	71			

R al cuadrado = ,972 (R al cuadrado ajustada = ,964)

Fuente: Autores

En la tabla 12, se observa que para las variables condición del filtro y temperatura el estadístico F lleva asociado un valor crítico (sig.) menor a 0.05, lo cual indica que existe una diferencia significativa en la reducción de las concentraciones del CO debido a estas dos variables, y tal como se observó en la gráfica 7 la condición óptima experimental en la que se ve favorecida la reducción es a una temperatura T3 utilizando aluminio en polvo con 300g. Además, la interacción de estas variables incide en la concentración de CO, o sea que hay un efecto adicional favorable sobre la disminución de la concentración. También se observó que el valor de R^2 indica que las dos variables incluidas en modelo explican el 97% de las reducciones en las concentraciones de los gases.

Tabla 13. ANOVA para CO₂ para las condiciones del filtro vs temperatura.

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	18,613 ^a	17	1,095	81,584	,000
Intersección	264,155	1	264,155	19683,825	,000
Condición del filtro	13,959	5	2,792	208,029	,000
Temperatura	3,328	2	1,664	124,005	,000
Condición del filtro * Temperatura	1,326	10	,133	9,878	,000
Error	,725	54	,013		
Total	283,492	72			
Total corregido	19,337	71			

R al cuadrado = ,963 (R al cuadrado ajustada = ,951)

Fuente: Autores

En la tabla 13, para las variables condición del filtro y temperatura se observó que el valor crítico (sig.) es menor a 0.05, dando a entender que existe una diferencia significativa en la reducción de la concentración de CO₂ debido las variables descritas, y tal como se observa en la gráfica 8 la temperatura T3 con aluminio en polvo 300 g es la que presenta una mayor reducción. Además el valor de R² es de 96%, indicando que el modelo tiene un buen ajuste en los datos.

Tabla 14. ANOVA para O₂ para las condiciones del filtro vs temperatura.

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	15,169 ^a	17	,892	45,282	,000
Intersección	25361,273	1	25361,273	1287011,341	,000
Condiciones del filtro	10,571	5	2,114	107,285	,000
Temperatura	2,526	2	1,263	64,082	,000
Condiciones del filtro * Temperatura	2,073	10	,207	10,520	,000
Error	1,064	54	,020		
Total	25377,507	72			
Total corregido	16,233	71			

R al cuadrado = ,934 (R al cuadrado ajustada = ,914)

Fuente: Autores

La tabla 14, muestra niveles críticos (sig.) menores a 0.05 para las variables condición del filtro y temperatura, indicando que existe una diferencia significativa en el aumento de las concentraciones de O₂ debido a estas dos variables y tal como se observa en la gráfica 9 a una temperatura T3 con aluminio en polvo 300 g se presenta la mayor reducción. También se observó que el modelo explica adecuadamente el cambio de las concentraciones ya que el R² tiene un valor de 93%.

4.7. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL TIPO Y LA MASA DE ALUMINIO

Con el fin de identificar si el tipo y la masa de aluminio tienen algún efecto significativo en los cambios de las concentraciones de CO, CO₂ y O₂, se realizó el ANOVA del tipo de aluminio vs la masa. Para estos análisis se trabajó con los datos de los “ANEXOS G, H, I”, con un nivel de significancia del 5% y un nivel de confianza de 95%.

Tabla 15. ANOVA para CO para el tipo y la masa de aluminio.

Origen	Suma de cuadrados tipo III	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	,125 ^a	11	,011	99,192	,000
Intersección	1,119	1	1,119	9768,891	,000
Masa de aluminio	,000	1	,000	2,200	,147
Tipo de aluminio	,119	5	,024	207,160	,000
Masa de aluminio * Tipo de aluminio	,006	5	,001	10,622	,000
Error	,004	36	,000		
Total	1,249	48			
Total corregida	,129	47			

R cuadrado = ,968 (R cuadrado corregida = ,958)

Fuente: Autores

En la tabla 15, para la variable tipo de aluminio, el nivel crítico (sig.) es menor a 0.05, indicando que existe diferencia significativa en la reducción de las concentraciones de CO debido a esta variable. Caso contrario ocurre con la variable masa de aluminio pues su nivel crítico (sig.) Es mayor a 0.05, es decir que las reducciones de CO no se ven afectadas por la masa que se utilice.

Tabla 16. ANOVA para CO₂ para el tipo y la masa de aluminio.

Origen	Suma de cuadrados tipo III	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	4,329 ^a	11	,394	20,158	,000
Intersección	128,282	1	128,282	6571,315	,000
Masa de aluminio	,376	1	,376	19,276	,000
Tipo de aluminio	3,591	5	,718	36,786	,000
Masa de aluminio * Tipo de aluminio	,362	5	,072	3,706	,008
Error	,703	36	,020		
Total	133,314	48			
Total corregida	5,031	47			

a. R cuadrado = ,860 (R cuadrado corregida = ,818)

Fuente: Autores

En la tabla 16, se observa que el valor crítico (sig.) para las variables masa y tipo de aluminio es menor a 0.05, entendiéndose que existe diferencia significativa en la reducción de CO₂ debido a estas variables, aunque tiene más incidencia en la reducción el tipo de aluminio que la masa. Además existe un efecto adicional en la reducción por la interacción de estas variables.

Tabla 17. ANOVA para O₂ para el tipo y la masa de aluminio.

Origen	Suma de cuadrados tipo III	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	4,580 ^a	11	,416	19,388	,000
Intersección	17351,568	1	17351,568	808041,457	,000
Masa de aluminio	,010	1	,010	,449	,507
Tipo de aluminio	4,070	5	,814	37,903	,000
Masa de aluminio * Tipo de aluminio	,501	5	,100	4,662	,002
Error	,773	36	,021		
Total	17356,921	48			
Total corregida	5,353	47			

R cuadrado = ,856 (R cuadrado corregida = ,811)

Fuente: Autores

En la tabla 17, se observa que el tipo físico de aluminio tiene un nivel crítico (sig.) menor a 0.05, indicando que existe diferencia significativa en el aumento de las concentraciones de O₂ debido a esta variable. Para la variable masa de aluminio se observó un nivel crítico (sig.) mayor a 0.05, es decir que esta variable no tiene incidencia en el aumento de las concentraciones de O₂.

4.8. ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA CONDICIÓN FINAL DESPUÉS DEL FILTRO SIN ALUMINIO Y LAS CONDICIONES DESPUÉS DEL FILTRO CON ALUMINIO EN GRANALLA Y POLVO 300G PARA CADA TEMPERATURA.

Con el fin de identificar si el filtro con aluminio en granalla y polvo 300g para cada temperatura, tiene un efecto significativo en los cambios de las concentraciones de CO, CO₂ y O₂ en comparación de la condición final sin aluminio, se realizaron tres análisis estadísticos. Para estos análisis se trabajó con los "ANEXOS G, H, I", con un nivel de significancia del 5% y un nivel de confianza de 95%.

Tabla 18. ANOVA para CO para la condición final sin aluminio y condición final con aluminio granalla y polvo 300g.

Origen	Suma de cuadrados tipo III	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	,104 ^a	8	,013	117,000	,000
Intersección	1,082	1	1,082	9734,400	,000
Condición del filtro	,024	2	,012	108,975	,000
Temperatura	,068	2	,034	305,175	,000
Condición del filtro * Temperatura	,012	4	,003	26,925	,000
Error	,003	27	,000		
Total	1,189	36			
Total corregida	,107	35			

R cuadrado = ,972 (R cuadrado corregida = ,964)

Fuente: Autores

En la tabla 18, se observa que para la concentración del CO con relación a las variables condiciones del filtro y temperatura se acepta la hipótesis alternativa dado que el nivel crítico (sig.) es menor a 0,05, entendiéndose que existiendo una diferencia significativa en la reducción de concentraciones de CO debido a estas variables. Por otra parte la interacción presenta un F calculado mayor al F tabulado, teniendo un efecto adicional en la reducción la relación de estas dos variables.

Tabla 19. ANOVA para CO₂ para la condición final sin aluminio y condición final con aluminio granalla y polvo 300g.

Origen	Suma de cuadrados tipo III	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	6,330 ^a	8	,791	60,588	,000
Intersección	112,078	1	112,078	8582,226	,000
Condición del filtro	3,428	2	1,714	131,249	,000
Temperatura	2,604	2	1,302	99,680	,000
Condición del filtro * Temperatura	,298	4	,075	5,711	,002
Error	,353	27	,013		
Total	118,760	36			
Total corregida	6,682	35			

R cuadrado = ,947 (R cuadrado corregida = ,932)

Fuente: Autores

En la tabla 19, para la variable condiciones del filtro y para la variable Temperatura se observó que el nivel crítico (sig.) es menor a 0,05, entonces se rechaza la hipótesis nula, es decir que las condiciones y la temperatura afectan las concentraciones de CO₂ y la interacción de estas variables tiene un efecto adicional en la reducción.

Tabla 20. ANOVA para O₂ para la condición final sin aluminio y condición final con aluminio granalla y polvo 300g.

rigen	Suma de cuadrados tipo III	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	5,289 ^a	8	,661	26,285	,000
Intersección	12820,278	1	12820,278	509715,075	,000
Condición del filtro	1,759	2	,879	34,959	,000
Temperatura	2,496	2	1,248	49,609	,000
Condición del filtro * Temperatura	1,035	4	,259	10,285	,000
Error	,679	27	,025		
Total	12826,246	36			
Total corregida	5,968	35			

R cuadrado = ,886 (R cuadrado corregida = ,852)

Fuente: Autores

En la tabla 20, se observa que la concentración de O₂ con relación a las variables temperatura y condición del filtro presentan un nivel crítico (sig.) menor a 0,05, por ende se rechaza la hipótesis nula, es decir que existe una diferencia significativa en el aumento de las concentraciones de O₂ debido a estas variables.

4.9. EFICIENCIAS DE REDUCCIÓN DE LOS GASES

Para obtener la eficiencia de reducción en las emisiones de CO y CO₂, se comparó el promedio de la condición final sin aluminio con las diferentes condiciones del filtro, obteniendo el porcentaje promedio de reducción del gas así:

Ecuación 12. Eficiencias de reducción de los gases CO₂ y CO.

$$\% \text{ Reduccion} = \frac{\text{Condicion final sin aluminio} - \text{Condicion final con aluminio}}{\text{Condicion final sin aluminio}} \times 100$$

Fuente: Autores

Las siguientes tablas muestran los porcentajes de reducción de las concentraciones de CO, CO₂ y O₂ respectivamente para cada condición del filtro y temperatura. Los porcentajes de reducción se obtuvieron de los “ANEXO G, H, I”.

Tabla 21. Porcentajes de reducción para el CO para las condiciones del filtro con la temperatura.

Condición del filtro	T1 (36,5 °C)	T2 (37,8°C)	T3 (40,4°C)
Final con aluminio 150 gr, granalla (%)	12,28	30,00	52,05
Final con aluminio 300 gr, granalla (%)	15,79	8,89	63,74
Final con aluminio 150 gr, polvo (%)	16,96	11,11	35,67
Final con aluminio 300 gr, polvo (%)	9,94	11,11	64,91

Fuente: Autores.

En la tabla 21, se observó que la condición óptima experimental en la que se ve favorecida la reducción es la condición final con aluminio 300 g con polvo a la temperatura T3 ya que su porcentaje de reducción fue de un 65 % seguida de la condición final con aluminio 300 g, granalla. También se observa que para las temperaturas T1 y T2, los porcentajes de reducción son inferiores al 50 % a diferencia de la temperatura T3 que solo una de las cuatro condiciones fue inferior al 50 %.

Tabla 22. Porcentajes de reducción para el CO₂ para las condiciones del filtro con la temperatura.

Condición del filtro	T1 (36,5 °C)	T2 (37,8°C)	T3 (40,4°C)
Final con aluminio 150 gr, granalla (%)	12,19	22,24	35,95
Final con aluminio 300 gr, granalla (%)	33,10	29,10	45,84
Final con aluminio 150 gr, polvo (%)	22,28	29,52	51,05
Final con aluminio 300 gr, polvo (%)	22,59	29,20	56,96

Fuente: Autores

En la tabla 22, se observa que al igual que el CO, el CO₂ presenta una reducción eficiente en sus concentraciones a una temperatura T3, con aluminio en polvo 300g seguida por la condición final con aluminio en polvo 150 g. Para las demás condiciones y temperaturas la eficiencia no fue significativa ya que no superaron un 50% de reducción.

Para identificar los cambios en las concentraciones de O₂ se utilizó la ecuación 13 para cada una de las condiciones del filtro.

Ecuación 13. Eficiencias del aumento de los gases O₂.

$$\% \text{ Aumento} = \frac{\text{Condición final con aluminio} - \text{Condición final sin aluminio}}{\text{Condición final sin aluminio}} \times 100$$

Fuente: Autores

Tabla 23. Porcentajes de reducción para el O₂ para las condiciones del filtro con la temperatura.

Condición del filtro	T1 (36,5 °C)	T2 (37,8°C)	T3 (40,4°C)
Final con aluminio 150 gr, granalla (%)	1,93	2,05	3,08
Final con aluminio 300 gr, granalla (%)	1,12	1,02	4,50
Final con aluminio 150 gr, polvo (%)	1,11	0,87	3,98
Final con aluminio 300 gr, polvo (%)	1,63	0,10	5,36

Fuente: Autores.

En la tabla 23, se observa que la condición del filtro con aluminio en polvo 300g fue la que presentó el mayor aumento en las concentraciones de O₂, de acuerdo a esto se podría decir que al ser esta condición la que tiene mayor reducción de las concentraciones de CO y CO₂ tal como se identificó en las tablas 21 y 22, esta reacción hace que se libere O₂, aumentando las concentraciones de este en un 5%.

5. CONCLUSIONES

- De acuerdo a los análisis estadísticos obtenidos, se observa que el filtro de aluminio tal como se demostró teóricamente con la energía libre de Gibbs si tiene la capacidad de reducir las concentraciones de CO y CO₂ emitidas por el motor diésel, y su eficiencia en la reducción dependió de la temperatura a la que entran en contacto los gases con el aluminio, del tipo físico del aluminio utilizado y en menor medida la cantidad que se utilizó.
- El tipo físico del aluminio (Granalla o Polvo) está directamente relacionado con la reducción de las concentraciones de CO y CO₂ y el aumento de las concentraciones de O₂ como se determinó en el ANOVA realizado para el tipo y masa del aluminio, en donde el aluminio en polvo tiene mayor incidencia en la reducción a comparación de la granalla.
- Se observó que la masa de aluminio no tiene incidencia en los cambios de las concentraciones de CO y O₂ de acuerdo al ANOVA realizado para el tipo y la masa de aluminio, por otro lado para el CO₂ la masa tuvo una baja significancia en la reducción, por ende no se puede asegurar que aumentar la masa de aluminio tenga una reducción significativa en las emisiones, ya que depende más de la temperatura y el tipo de aluminio utilizado.
- Las condiciones óptimas experimentales en las que se vio favorecida la reducción de las concentraciones de CO y CO₂, fueron a una altura de 1m con una temperatura promedio (T3) de 40.4° C, utilizando aluminio en polvo y con una cantidad de 300 g.
- La eficiencia en la reducción para el monóxido de carbono fue en promedio de un 65 % comparando la condición final del filtro sin aluminio y la condición final con aluminio en polvo con 300g (condición óptima experimental). La reducción se vio favorecida por la temperatura más que por las condiciones del filtro, aunque la interacción de estas variables tiene un efecto adicional en la reducción. También se observó que tiene más relevancia el tipo físico del aluminio que la masa de esta en la reducción de las concentraciones, es decir que si se utiliza aluminio en polvo con 150 g o 300 g, la reducción será similar.

- La eficiencia en la reducción para dióxido de carbono fue en promedio de 57 % comparando la condición final del filtro sin aluminio y la condición final con aluminio en polvo con 300g (condición óptima experimental). las condiciones del filtro tuvieron un efecto mayor que la temperatura en la reducción, y su interacción no afectó significativamente la reducción de CO₂. La reducción a su vez se ve favorecida en mayor grado por el tipo de aluminio que por la cantidad que se utilice, es decir que al utilizar aluminio en polvo con 300g, la reducción será más eficiente.

6. RECOMENDACIONES

- La utilización de un filtro de aluminio como medio de reducción, debe hacerse en condiciones de temperatura controladas ya que esta determina la eficiencia en la reducción de las concentraciones de los gases como se determinó con la energía libre de Gibbs y los análisis estadísticos realizados. El filtro se podría ubicar en sitios con un alto flujo vehicular, donde se puedan asegurar la mayor entrada de gases.
- Se recomienda que en las instalaciones de los laboratorios de la Universidad Santo Tomás, se cuente con los espacios de horario e implementos necesarios para la realización del experimento, brindando a los estudiantes los equipos necesarios para la realización del filtro de aluminio. Esto permitirá incentivar la investigación por parte de sus estudiantes.
- Se observó que en los días con mayor presencia de luz solar la temperatura dentro de la columna aumentaba, se recomienda realizar futuras investigaciones en horas con baja intensidad de luz para que no afecten la calidad de los datos y así tener datos más confiables.
- En futuras investigaciones se recomienda realizar las mediciones con temperaturas más bajas que las obtenidas dentro de la columna, con el fin de conocer si a temperaturas menores la reducción es más eficiente.
- Se recomienda realizar los estudios experimentales para la aplicación del filtro de aluminio con relación a otros combustibles con el fin de identificar si la eficiencia del aluminio en la reducción de CO y CO₂ cambia de acuerdo al tipo de combustible.
- Este estudio se podría complementar analizando la variación que tendría la combinación de los dos tipos de aluminio (Granalla y polvo) en un mismo filtro para la reducción de CO y CO₂.

7. LIMITACIONES

En cuanto al objetivo específico que menciona la relación de la temperatura de emisión del gas y la temperatura ambiente, es importante precisar que la instrumentación con la que cuenta la Universidad Santo Tomás no está diseñada para realizar análisis de carácter ambiental, por lo cual se realizó el diseño experimental con los equipos suministrados por el laboratorio de la Universidad, sin embargo es importante mencionar que dentro de estos resultados se evidencia una disminución de las concentraciones con una temperatura T1(40,4°C) con lo cual se esperarían una menor eficiencia a una temperatura ambiente de (18 °C).

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Bartolomé y P. Mora Peris, Estado del arte de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ en la industria del cemento, Primera ed., Madrid: Estado del arte, 2011.
- [2] J. Maldonado, «Ciudades y contaminación ambiental,» *Redalyc*, vol. I, pp. 66-61, Noviembre 2009.
- [3] R. R. Elav Zambrano, «Calidad del aire y su incorporación en la planeación urbana: Mexicali, Baja California, México,» *Estudios fronterizos*, vol. X, p. 25, Julio 2009.
- [4] Universidad del Valle, Cali, Colombia, «Modelación de la concentración atmosférica de CO usando,» *Ingeniería y Competitividad*, vol. 16, nº 1, p. 9, Septiembre 2014.
- [5] Clean Air Institute, «La Calidad del Aire en América Latina: Una Visión Panorámica,» Estados Unidos, 2012.
- [6] R. Cobden, «Aluminium: Physical Properties, Characteristics and Alloys,» 1994.
- [7] L. Rondon Barragan, W. Ramírez Duarte, P. Barato y P. Eslava Mocha, «Importancia del ciclo biogeoquímico del aluminio (Al) con relación con la acidez de los suelos en la producción piscícola y la salud pública ¿cuál sería el caso de la Orinoquia?,» Villavicencio, 2007.
- [8] International programme on chemical safety, «Environmental health criteria 194,» Ginebra, 1997.
- [9] F. King, Aluminum and Its Alloys, Illustrated, Ed., Michigan: Limusa, 2010.
- [10] R. Cobden, «Aluminium: Physical Properties, Characteristics and Alloys,» 1995.
- [11] J. R. Ibars Almonacil, Julio 2007. [En línea]. Available: <http://www.iesremedios.es/wp-content/uploads/t-2-23-rev-2-aluminio-y-aleaciones.pdf>.
- [12] SIAFA, «Monóxido de Carbono,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.siafa.com.ar/notisiafa/13/monoxidodecarbono.pdf>.
- [13] Consejería de sanidad ambiental, «Murcia salud,» Abril 2007. [En línea]. Available: <http://www.murciasalud.es/recursos/ficheros/102373-MonoxidodeCarbono.pdf>. [Último acceso: 19 Abril 2016].
- [14] Gobierno de Navarra, ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente., «PRTR,» Noviembre 2007. [En línea]. Available: <http://www.prtr-es.es/CO-Monoxido-de-carbono,15589,11,2007.html>. [Último acceso: 20 Marzo 2015].
- [15] J. Téllez, A. Rodríguez y Á. Farjardo, «Contaminación por Monóxido de

Carbono: un Problema de Salud Ambiental,» *Salud publica*, vol. VIII, nº 1, p. 10, Abril 2006.

- [16] Agency for Toxic Substances and Disease Registry, «ToxFaqs sobre el monóxido de carbono,» Octubre 2009. [En línea]. Available: http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts201.pdf.
- [17] Abelló Linde S.A., «Trabajando con Dióxido de carbono CO₂,» Diciembre 2012. [En línea]. Available: [http://www.abellolinde.es/internet.lg.lg.esp/es/images/CS_12_%20v%2012%20\(trabajando%20con%20di%C3%B3xido%20de%20carbono\)316_25938.pdf](http://www.abellolinde.es/internet.lg.lg.esp/es/images/CS_12_%20v%2012%20(trabajando%20con%20di%C3%B3xido%20de%20carbono)316_25938.pdf).
- [18] A. R. Paul Chovin, *La polución atmosférica*, Tercera ed., Paris: Oikos tau, 1970.
- [19] Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente de España, «Registro estatal de emisiones y fuentes contaminantes,» Noviembre 2007. [En línea]. Available: <http://www.prtr-es.es/CO2-Dioxido-de-carbono,15590,11,2007.html>. [Último acceso: 10 Marzo 2015].
- [20] G. Martínez y E. Ramírez, *Contaminación del aire*, Segunda ed., Mexico D.F.: Ebrary, 2009.
- [21] Infra, «Hoja de datos de seguridad Dióxido de carbono,» Mexico, 1997.
- [22] Infra S.A, «Hoja de datos de seguridad (HDS) Dioxido de carbono,» Julio 2011. [En línea]. Available: http://www.infra.com.mx/wp-content/uploads/2013/09/dioxido_carbono.pdf. [Último acceso: Febrero 2016].
- [23] CONCEJALÍA DE MEDIO AMBIENTE, «TODO LO QUE DESEA SABER SOBRE EL DIÓXIDO DE CARBONO,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.alhaurinelgrande.net/alhauPortal/alhaurin/medioambiente/sostenibilidad/co2.pdf>.
- [24] A. B. Robinson, N. E. Robinson y W. Soon, «Petition Project,» 2007. [En línea]. Available: http://www.petitionproject.org/gw_article/spanish.pdf.
- [25] V. Melo y O. Cuamatzi, *Bioquímica de los procesos metabólicos*, Segunda ed., Loreto, Ed., Mexico D.F.: Reverté S.A., 2007.
- [26] R. Petricci, G. Herring, J. Madura y C. Bissonnette, «Química general,» de *Espontaneidad entropía y energía de Gibbs*, Madrid, Pearson, 2011, p. 1303.
- [27] T. Pilusa y M. Mollagee, «Reduction of Vehicle Exhaust Emissions from Diesel Engines Using the Whale,» 2012. [En línea]. Available: http://aaqr.org/vol12_no5_october2012/27_aaqr-12-04-0a-0100_994-1006.pdf. [Último acceso: Febrero 2016].
- [28] H. Guevara y M. Gabriela, Junio 2010. [En línea]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2255>.
- [29] Ehu. [En línea]. Available: <http://www.ehu.eus/zorrilla/juanma/automovil/catalitico.htm>.

- [30] E. Brizuela y D. Romano, «Unidad I: Combustión,» de *Combustión*, Buenos Aires, 2003, p. 12.
- [31] E. J. Medina Mercado, «Estudio de un motor de combustión externa,» Febrero 2009. [En línea]. Available: http://tesis.ula.ve/pregrado/tde_arquivos/9/TDE-2012-04-09T06:04:48Z-1543/Publico/mercadoeduardo.pdf.
- [32] M. Maciel, «MOTOR DE COMBUSTION INTERNA,» Abril 2011. [En línea]. Available: http://www.academia.edu/5205173/PDF_MOTOR_DE_COMBUSTION_INTE RNA.
- [33] E. Atilio, Contaminación, San Fernando del Valle de Catamarca: Editorial Científica Universitaria - Universidad Nacional de Catamarca, 2007.
- [34] Ministerio Ambiente, «Decreto 948 de 1995,» Junio 1995. [En línea]. Available: https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/decretos/54-dec_0948_1995.pdf.
- [35] J. H. Obando Chacón, «Datateca,» 2012. [En línea]. Available: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358005/contLinea/leccin_14__energa_libre_de_gibbs.html.
- [36] M. Colque Pinelo y V. E. Sánchez Campos, Los gases de Efecto Invernadero: ¿Por qué se produce el Calentamiento Global?, Labor, Ed., Lima: Cartoonarts International, 2007, p. 6.
- [37] Mheducation, «Contaminación Atmosférica,» 2007. [En línea]. Available: <http://assets.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448169816.pdf>.
- [38] C. Alonso, «Alonso Formula,» [En línea]. Available: http://www.alonsoformula.com/inorganica/_private/Quimica2bach07cast.pdf.
- [39] D. Monroy Rivera y I. V. Quiroa Revolorio, «Aplicación de las reacciones endotérmicas y exotérmicas,» 2011. [En línea]. Available: <http://acmor.org.mx/cuamweb/reportescongreso/2011/Secund/745exotermicas.pdf>.
- [40] J. L. Paredes, Febrero 2010. [En línea]. Available: http://www.difusioncultural.uam.mx/casadeltiempo/28_iv_feb_2010/casa_del_tiempo_eIV_num28_59_65.pdf.

9. ANEXOS

ANEXO A

Registro de datos para 1m de altura

Fecha	Set de muestreo	Muestra (Repetición)	Temperatura ° C antes del filtro	Temperatura ° C después del filtro.	Temperatura promedio	Peso De Al (gr)	Tipo fisico del aluminio	Parametro	Cond. Ambiente / blanco (%)	Condicion inicial antes del aluminio	Condicion Final (%) despues del filtro	
											Sin Al	Con Al
04/02/2016	1	1	41,20	38,80	40,00	150	Granalla	CO	0	0,21	0,19	0,10
								CO2	0	2,85	1,74	1,53
								O2	20,88	17,74	18,40	19,10
		2	41,10	39,10	40,10		Granalla	CO	0	0,20	0,16	0,11
								CO2	0	2,79	1,81	1,64
								O2	20,87	17,45	18,78	19,21
		3	41,10	39,20	40,15		Granalla	CO	0	0,19	0,19	0,11
								CO2	0	2,94	1,83	1,56
								O2	20,88	18,03	18,31	19,13
		4	41,30	38,80	40,05		Granalla	CO	0	0,22	0,18	0,09
								CO2	0	2,95	1,79	1,55
								O2	20,87	18,01	18,41	19,26
05/02/2016	2	1	41,70	39,40	40,55	300	Granalla	CO	0	0,22	0,17	0,08
								CO2	0	2,89	1,64	1,58
								O2	20,89	17,69	18,50	19,26
		2	41,90	38,90	40,40		Granalla	CO	0	0,20	0,17	0,09
								CO2	0	2,76	1,69	1,60
								O2	20,88	17,55	18,10	19,30
		3	42,10	39,40	40,75		Granalla	CO	0	0,25	0,21	0,07
								CO2	0	2,74	1,87	0,93
								O2	20,89	18,09	19,19	19,87
		4	42,30	39,50	40,90		Granalla	CO	0	0,22	0,17	0,07
								CO2	0	2,85	1,79	1,20
								O2	20,89	18,04	18,93	19,41
05/02/2016	3	1	41,20	38,80	40,00	150	Polvo	CO	0	0,22	0,18	0,14
								CO2	0	2,80	1,71	1,23
								O2	20,9	18,09	18,80	19,33
		2	42,50	39,10	40,80		Polvo	CO	0	0,21	0,19	0,15
								CO2	0	2,78	1,82	1,46
								O2	20,85	18,08	18,70	19,06
10/02/2016	4	3	41,30	38,70	40,00	150	Polvo	CO	0	0,21	0,18	0,13
								CO2	0	2,76	1,78	1,05
								O2	20,86	18,10	19,10	19,55
		4	41,20	38,50	39,85		Polvo	CO	0	0,22	0,19	0,13
								CO2	0	2,81	1,83	1,06
								O2	20,86	18,10	18,90	19,48
11/02/2016	4	1	41,90	39,10	40,50	300	Polvo	CO	0	0,21	0,18	0,08
								CO2	0	2,75	1,73	1,10
								O2	20,87	18,08	19,01	19,64
		2	42,20	39,10	40,65		Polvo	CO	0	0,22	0,19	0,07
								CO2	0	2,78	1,81	1,05
								O2	20,87	18,03	18,13	19,61
		3	42,00	38,90	40,45		Polvo	CO	0	0,21	0,19	0,07
								CO2	0	2,77	1,79	1,03
								O2	20,86	18,05	18,21	19,67
		4	42,30	39,30	40,80		Polvo	CO	0	0,21	0,19	0,08
								CO2	0	2,76	1,81	1,04
								O2	20,86	18,09	18,20	19,63

ANEXO B

Registro de datos para un 1.7m de altura

Fecha	Set de muestreo	Muestra (Repetición)	Temperatura ° C antes del filtro	Temperatura ° C después del filtro.	temperatura promedio	Peso De Al (gr)	Tipo fisico del aluminio	Parametro	Cond. Ambiente / blanco (%)	Condicion inicial antes del aluminio	Condicion Final (%) despues del filtro		
											Sin Al	Con Al	
12/02/2016	1	1	38,60	37,30	37,95	150	Granalla	CO	0	0,25	0,23	0,16	
								CO2	0	2,75	2,36	1,88	
								O2	20,86	18,05	18,40	18,85	
		2	38,40	37,20	37,80		Granalla	CO	0	0,24	0,20	0,16	
								CO2	0	2,77	2,40	2,00	
								O2	20,84	17,77	18,86	19,01	
		3	38,50	37,10	37,80		Granalla	CO	0	0,26	0,20	0,16	
								CO2	0	2,59	2,36	2,03	
	4	38,60	37,20	37,90	Granalla	CO	0	0,25	0,21	0,15			
						CO2	0	2,71	2,58	1,46			
	13/02/2016	2	1	38,00	37,40	37,70	300	Granalla	CO	0	0,25	0,24	0,20
									CO2	0	2,63	2,36	1,60
									O2	20,84	18,37	18,53	18,86
			2	38,40	37,20	37,80		Granalla	CO	0	0,26	0,24	0,21
									CO2	0	2,55	2,32	1,70
									O2	20,84	18,46	18,63	18,76
3			39,10	37,20	38,15	Granalla		CO	0	0,26	0,24	0,21	
								CO2	0	2,60	2,27	1,72	
4		38,30	37,20	37,75	Granalla	CO	0	0,25	0,23	0,20			
						CO2	0	2,74	2,34	1,70			
13/02/2016		3	1	38,20	37,10	37,65	150	Polvo	CO	0	0,26	0,23	0,19
									CO2	0	2,62	2,21	1,66
									O2	20,85	18,08	18,51	18,69
			2	38,30	37,20	37,75		Polvo	CO	0	0,25	0,22	0,20
									CO2	0	2,64	2,25	1,64
									O2	20,86	18,05	18,47	18,76
	3		38,50	37,30	37,90	Polvo		CO	0	0,24	0,23	0,21	
								CO2	0	2,67	2,40	1,67	
	15/02/2016	4	1	38,60	37,20	37,90	300	Polvo	CO	0	0,25	0,22	0,20
									CO2	0	2,72	2,73	1,71
									O2	20,86	17,92	18,46	18,81
			2	38,50	37,30	37,90		Polvo	CO	0	0,26	0,23	0,20
									CO2	0	2,66	2,36	1,64
									O2	20,86	17,98	18,20	18,36
			3	38,60	37,20	37,90		Polvo	CO	0	0,25	0,22	0,19
									CO2	0	2,70	2,27	1,70
4		38,50	37,30	37,90	Polvo	CO	0	0,25	0,23	0,21			
						CO2	0	2,72	2,36	1,69			
18/02/2016		4	1	38,60	37,20	37,90	300	Polvo	CO	0	0,26	0,23	0,20
									CO2	0	2,68	2,34	1,68
									O2	20,86	18,01	18,51	18,88
			2	38,50	37,30	37,90		Polvo	CO	0	0,25	0,22	0,19
									CO2	0	2,70	2,27	1,70
									O2	20,85	17,97	18,23	18,59
	3		38,60	37,20	37,90	Polvo		CO	0	0,25	0,23	0,21	
								CO2	0	2,72	2,36	1,69	
	4	38,50	37,30	37,90	Polvo	CO	0	0,26	0,23	0,20			
						CO2	0	2,68	2,34	1,68			

ANEXO C

Registro de datos para un 2.3m de altura

Fecha	Set de muestreo	Muestra (Repetición)	Temperatura ° C antes del filtro	Temperatura ° C después del filtro.	Temperatura promedio	Peso De Al (gr)	Tipo físico del aluminio	Parametro	Cond. Ambiente / blanco (%)	Condicion inicial antes del aluminio	Condicion Final (%) después del filtro	
											Sin Al	Con Al
											19/02/2016	1
CO2	0	2,75	2,43	2,01								
O2	20,88	18,01	18,38	18,76								
2	37,20	35,90	36,55	Granalla	CO	0	0,25	0,22	0,18			
					CO2	0	2,79	2,45	2,22			
					O2	20,87	17,89	18,92	19,11			
3	37,10	35,80	36,45	Granalla	CO	0	0,26	0,24	0,20			
					CO2	0	2,71	2,39	2,17			
					O2	20,88	18,02	18,53	19,04			
4	37,20	36,50	36,85	Granalla	CO	0	0,26	0,23	0,20			
					CO2	0	2,79	2,46	2,21			
					O2	20,87	17,89	18,62	18,89			
19/02/2016	2	1	37,10	35,90	36,50	300	Granalla	CO	0	0,23	0,20	0,17
CO2								0	2,76	2,41	1,63	
O2								20,89	18,01	18,49	18,77	
20/02/2016		2	36,90	36,20	36,55		Granalla	CO	0	0,24	0,21	0,18
								CO2	0	2,74	2,38	1,59
								O2	20,88	17,75	18,63	18,79
		3	36,80	36,10	36,45		Granalla	CO	0	0,25	0,22	0,18
								CO2	0	2,76	2,46	1,64
								O2	20,89	18,02	18,56	18,71
4		37,10	35,80	36,45	Granalla		CO	0	0,25	0,21	0,19	
							CO2	0	2,81	2,49	1,70	
							O2	20,89	18,04	18,53	18,91	
22/02/2016	3	1	37,10	35,90	36,50	150	Polvo	CO	0	0,26	0,22	0,18
								CO2	0	2,80	2,48	1,96
								O2	20,9	17,94	18,51	18,72
		2	36,90	35,90	36,40		Polvo	CO	0	0,24	0,19	0,16
								CO2	0	2,76	2,45	1,88
								O2	20,85	18,04	18,64	18,92
		3	36,90	36,10	36,50		Polvo	CO	0	0,23	0,20	0,18
								CO2	0	2,78	2,46	1,87
								O2	20,86	18,10	18,54	18,76
		4	37,20	36,20	36,70		Polvo	CO	0	0,24	0,21	0,19
								CO2	0	2,79	2,48	1,91
								O2	20,86	17,93	18,57	18,77
23/02/2016	4	1	36,90	36,10	36,50	300	Polvo	CO	0	0,26	0,23	0,21
								CO2	0	2,81	2,49	1,98
								O2	20,87	18,02	18,72	18,89
		2	36,90	36,10	36,50		Polvo	CO	0	0,25	0,21	0,18
								CO2	0	2,76	2,46	1,88
								O2	20,87	18,03	18,60	18,91
		3	37,00	35,80	36,40		Polvo	CO	0	0,26	0,23	0,21
								CO2	0	2,77	2,45	1,86
								O2	20,86	17,94	18,41	18,75
		4	36,90	36,10	36,50		Polvo	CO	0	0,23	0,19	0,17
								CO2	0	2,78	2,48	1,87
								O2	20,86	18,02	18,70	19,02

ANEXO D

Tabla de promedios para 1m de altura

Set de muestreo	Temperatura promedio (° C) por set de muestreo	Temperatura promedio (°C)	Peso De Al2	Tipo fisico del aluminio	Parametro	Cond. Ambiente / blanco (%)	Condicion inicial antes del aluminio	Condicion Final (%) despues del filtro	
								Sin Al	Con Al
1	40,08	40,37	150	Granalla	CO	0	0,21	0,18	0,10
					CO2	0	2,88	1,79	1,57
					O2	20,875	17,81	18,48	19,18
2	40,65		300	Granalla	CO	0	0,22	0,18	0,08
					CO2	0	2,81	1,75	1,33
					O2	20,8875	17,84	18,68	19,46
3	40,16		150	Polvo	CO	0	0,22	0,19	0,14
					CO2	0	2,79	1,79	1,20
					O2	20,8675	18,09	18,88	19,36
4	40,60	300	Polvo	CO	0	0,21	0,19	0,08	
				CO2	0	2,77	1,79	1,06	
				O2	20,865	18,06	18,39	19,64	

ANEXO E

Tabla de promedios para 1,7 m de altura

Set de muestreo	Temperatura promedio (° C) por set de muestreo	Temperatura promedio (° C)	Peso De Al (g)	Tipo fisico del aluminio	Parametro	Cond. Ambiente / blanco (%)	Condicion inicial antes del aluminio	Condicion Final (%) despues del filtro	
								Sin Al	Con Al
1	37,86	37,85	150 g	Granalla	CO	0,00	0,25	0,21	0,16
					CO2	0,00	2,71	2,43	1,84
					O2	20,85	18,04	18,59	18,97
2	37,85		300 g	Granalla	CO	0,00	0,26	0,24	0,21
					CO2	0,00	2,63	2,32	1,68
					O2	20,85	18,22	18,55	18,78
3	37,78		150 g	Polvo	CO	0,00	0,25	0,23	0,20
					CO2	0,00	2,66	2,40	1,67
					O2	20,86	18,02	18,49	18,75
4	37,90		300 g	Polvo	CO	0,00	0,26	0,23	0,20
					CO2	0,00	2,69	2,33	1,68
					O2	20,86	17,98	18,31	18,60

ANEXO F

Tabla de promedios para 2,3 m de altura

Set de muestreo	Temperatura promedio (°C) por set de muestreo	Temperatura promedio (°C)	Peso De Al (g)	Tipo fisico del aluminio	Parametro	Cond. Ambiente / blanco (%)	Condicion inicial antes del aluminio	Condicion Final (%) despues del filtro			
								Sin Al	Con Al		
1	36,59	36,52	150	Granalla	CO	0,00	0,25	0,23	0,19		
					CO2	0,00	2,76	2,43	2,15		
					O2	20,88	17,95	18,61	18,95		
2	36,49		36,52	300	Granalla	CO	0,00	0,24	0,21	0,18	
						CO2	0,00	2,77	2,44	1,64	
						O2	20,89	17,96	18,55	18,80	
3	36,53			36,52	150	Polvo	CO	0,00	0,24	0,21	0,18
							CO2	0,00	2,78	2,47	1,91
							O2	20,87	18,00	18,57	18,79
4	36,48	36,52			300	Polvo	CO	0,00	0,25	0,22	0,19
							CO2	0,00	2,78	2,47	1,90
							O2	20,87	18,00	18,61	18,89

ANEXO G

Tabla de condiciones del filtro para CO

Condición del filtro	Temperatura promedio (°C)		
	T1 (36,5 °C)	T2 (37,8°C)	T3 (40,4°C)
Inicial (%)	0,25	0,25	0,21
	0,24	0,26	0,22
	0,24	0,25	0,22
	0,25	0,26	0,21
Final sin aluminio (%)	0,23	0,21	0,18
	0,21	0,24	0,18
	0,21	0,23	0,19
	0,22	0,23	0,19
Final con aluminio 150 gr, granalla (%)	0,17	0,16	0,1
	0,18	0,16	0,11
	0,2	0,16	0,11
	0,2	0,15	0,09
Final con aluminio 300 gr, granalla (%)	0,17	0,2	0,08
	0,18	0,21	0,09
	0,18	0,21	0,07
	0,19	0,2	0,07
Final con aluminio 150 gr, polvo (%)	0,18	0,19	0,14
	0,16	0,2	0,15
	0,18	0,21	0,13
	0,19	0,2	0,13
Final con aluminio 300 gr, polvo (%)	0,21	0,2	0,08
	0,18	0,19	0,07
	0,21	0,21	0,07
	0,17	0,2	0,08

ANEXO H

Tabla de condiciones del filtro para CO₂

Condición del filtro	Temperatura promedio (°C)		
	T1 (36,5 °C)	T2 (37,8°C)	T3 (40,4°C)
Inicial (%)	2,76	2,71	2,88
	2,77	2,63	2,81
	2,78	2,66	2,79
	2,78	2,69	2,77
Final sin aluminio (%)	2,43	2,43	1,79
	2,44	2,32	1,75
	2,47	2,40	1,79
	2,47	2,33	1,79
Final con aluminio 150 gr, granalla (%)	2,01	1,88	1,53
	2,22	2	1,64
	2,17	2,03	1,56
	2,21	1,46	1,55
Final con aluminio 300 gr, granalla (%)	1,63	1,6	1,58
	1,59	1,7	1,6
	1,64	1,72	0,93
	1,7	1,7	1,2
Final con aluminio 150 gr, polvo (%)	1,96	1,66	1,23
	1,88	1,64	1,46
	1,87	1,67	1,05
	1,91	1,71	1,06
Final con aluminio 300 gr, polvo (%)	1,98	1,64	1,1
	1,88	1,7	1,05
	1,86	1,69	1,03
	1,87	1,68	1,04

ANEXO I

Tabla de condiciones del filtro para O₂

Condición del filtro	Temperatura promedio (°C)		
	T1 (36,5 °C)	T2 (37,8°C)	T3 (40,4°C)
Inicial (%)	17,95	18,04	17,81
	17,96	18,22	17,84
	18,00	18,02	18,09
	18,00	17,98	18,06
Final sin aluminio (%)	18,61	18,59	18,48
	18,55	18,55	18,68
	18,57	18,49	18,88
	18,61	18,31	18,39
Final con aluminio 150 gr, granalla (%)	18,76	18,85	19,1
	19,11	19,01	19,21
	19,04	18,97	19,13
	18,89	19,06	19,26
Final con aluminio 300 gr, granalla (%)	18,77	18,86	19,26
	18,79	18,76	19,3
	18,71	18,59	19,87
	18,91	18,89	19,41
Final con aluminio 150 gr, polvo (%)	18,72	18,69	19,33
	18,92	18,76	19,06
	18,76	18,73	19,55
	18,77	18,81	19,48
Final con aluminio 300 gr, polvo (%)	18,89	18,36	19,64
	18,91	18,59	19,61
	18,75	18,58	19,67
	19,02	18,88	19,63

ANEXO J

Prueba T para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

Monóxido de carbono	Variable 1	Variable 2
Media	0,183125	0,075
Varianza	1,40625E-05	3,33333E-05
Observaciones	4	4
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	31,41130895	
P(T<=t) una cola	3,07001E-07	
Valor crítico de t (una cola)	2,015048373	
P(T<=t) dos colas	6,14001E-07	
Valor crítico de t (dos colas)	2,570581836	
Dióxido de carbono	Variable 1	Variable 2
Media	2,45125	1,7775
Varianza	0,00041042	0,0004125
Observaciones	4	4
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	6	
Estadístico t	46,9732755	
P(T<=t) una cola	3,1194E-09	
Valor crítico de t (una cola)	1,94318028	
P(T<=t) dos colas	6,2388E-09	
Valor crítico de t (dos colas)	2,44691185	
Oxígeno	Variable 1	Variable 2
Media	18,604375	19,6375
Varianza	0,04757656	0,000625
Observaciones	4	4
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	-9,41135831	
P(T<=t) una cola	0,00127089	
Valor crítico de t (una cola)	2,35336343	
P(T<=t) dos colas	0,00254178	
Valor crítico de t (dos colas)	3,18244631	

ANEXO K

Convenios y tratados internacionales

Convenio / Ley que lo ratifica	Resumen (Objeto)
Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono / Ley 30 del 5 de marzo de 1990	Este convenio busca tomar las medidas apropiadas para proteger la salud humana y el medio ambiente contra los efectos adversos resultantes o que puedan resultar de las actividades humanas que modifiquen o puedan modificar la capa de ozono.
Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático / Ley 164 del 27 de octubre 1994	Su objetivo es establecer las concentraciones atmosféricas de gases efecto invernadero -GEI, a niveles que impidan que las actividades humanas afecten peligrosamente al sistema climático mundial.
Protocolo de Montreal relativo a las Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono / Ley 29 de 1992	Su objetivo es proteger la capa de ozono adoptando medidas preventivas para controlar equitativamente el total de emisiones mundiales de las sustancias que la agotan, con el fin de eliminarlas, sobre la base de los adelantos en los conocimientos científicos teniendo en cuenta aspectos técnicos y económicos. Colombia también ha ratificado las enmiendas de Londres y Copenhague al Protocolo de Montreal.
Acuerdo para la Creación del Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global – IAI / Ley 304 del 5 de agosto de 1996	El acuerdo tiene como objetivos promover la cooperación regional para la investigación interdisciplinaria sobre aspectos del cambio global relacionados con la tierra, el mar, la atmósfera y el medio ambiente, ciencias sociales y el efecto sobre los ecosistemas y biodiversidad y, mejorar la capacidad científica, técnica e infraestructura de investigación de los países de la región.
Protocolo de Kioto relativo a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático / Ley 629 del 27 de diciembre de 2000	Su fin fue promover el objetivo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y dar cumplimiento al Mandato de Berlín, en el cual se acordó iniciar un proceso que permitiera adoptar acciones adecuadas para el periodo posterior al año 2000.

ANEXO L

Cálculos de la energía libre de Gibbs a cada una de las reacciones del Al con el CO₂ y CO, para las tres diferentes temperaturas

- Cálculo de la energía libre de Gibbs para la reacción del CO con el aluminio a las tres temperaturas.



- Cálculo de ΔH :

$$\Delta H = \Delta H_{\text{producto}} - \Delta H_{\text{reactivo}}$$

$$\Delta H = \left(-17676 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}\right) - 3\left(-\frac{110,5\text{KJ}}{\text{Mol}}\right)$$

$$\Delta H = -1344,5 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$$

- Cálculo de ΔS :

$$\Delta S = \Delta S_{\text{producto}} - \Delta S_{\text{reactivo}}$$

$$\Delta S = \left(3\left(5,74 \frac{\text{J}}{\text{mol}}\right) + 50,92 \frac{\text{J}}{\text{mol}}\right) - \left(3\left(197,7 \frac{\text{J}}{\text{mol}}\right) + 2\left(28,33 \frac{\text{J}}{\text{mol}}\right)\right)$$

$$\Delta S = -581,62 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$\Delta S = -0,58162 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$$

- Cálculo de ΔG para $T_1(36,5^\circ\text{C})$:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$\Delta G = -\frac{1344,5\text{KJ}}{\text{mol}} - ((309,65\text{K})\left(-0,58162 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}\right))$$

$$\Delta G = -1164,40 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$$

- Cálculo de ΔG para $T_2(37,8^\circ\text{C})$:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$\Delta G = -1344,5 \frac{KJ}{mol} - ((310,95 K) - (-0,58162 \frac{KJ}{mol}))$$

$$\Delta G = -1163,64 \frac{KJ}{mol}$$

- Cálculo de ΔG para $T3(40.4^\circ C)$:

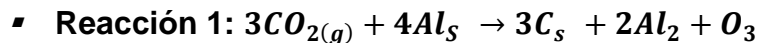
$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$\Delta G = -1344,5 \frac{KJ}{mol} - \left((313,55 K) \left(-0,58162 \frac{KJ}{mol} \right) \right)$$

$$\Delta G = -1162,13 \frac{KJ}{mol}$$

Como el ΔH y ΔS son menores a cero, se tiene una reacción exotérmica con energía libre de Gibbs negativa para las tres temperaturas, concluyendo que las reacciones ocurren espontáneamente.

- **Cálculo de la energía libre de Gibbs para la reacción del CO_2 con el aluminio a las tres temperaturas.**



- Cálculo de ΔH :

$$\Delta H = \Delta H_{producto} - \Delta H_{reactivo}$$

$$\Delta H = 2 \left(-\frac{1676KJ}{mol} \right) - 3 \left(-393,5 \frac{KJ}{mol} \right)$$

$$\Delta H = -\frac{2171,5KJ}{mol}$$

- Cálculo de ΔS :

$$\Delta S = \Delta S_{producto} - \Delta S_{reactivo}$$

$$\Delta S = \left(3 \left(5,74 \frac{J}{mol} \right) + 2 \left(50,92 \frac{J}{mol} \right) \right) - \left(3 \left(213,7 \frac{J}{mol} \right) + 4 \left(\frac{28,33J}{mol} \right) \right)$$

$$\Delta S = -635,36 \frac{J}{mol}$$

- Cálculo de ΔG para $T1(36,5^\circ C)$:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$\Delta G = -2171,5 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} - ((309,55 \text{ K}) \left(-0,63536 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}\right))$$

$$\Delta G = -1974,76 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$$

- Cálculo de ΔG para $T2(37,8^\circ\text{C})$:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$\Delta G = -2171,5 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} - ((310,95 \text{ K}) \left(-0,63536 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}\right))$$

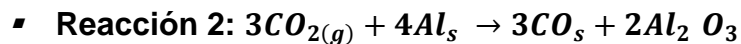
$$\Delta G = -1973,93 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$$

- Cálculo de ΔG para $T3(40,4^\circ\text{C})$:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$\Delta G = -2171,5 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} - ((313,55 \text{ K}) \left(-0,63536 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}\right))$$

$$\Delta G = -1972,25 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$$



- Cálculo de ΔH :

$$\Delta H = \Delta H_{\text{producto}} - \Delta H_{\text{reactivo}}$$

$$\Delta H = \left(2 \left(-1676 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}\right) + 2 \left(-110,5 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}\right)\right) - 3 \left(-393,5 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}\right)$$

$$\Delta H = -2392,5 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$$

- Cálculo de ΔS :

$$\Delta H = \Delta H_{\text{producto}} - \Delta H_{\text{reactivo}}$$

$$\Delta S = \left(3 \left(197,7 \frac{\text{J}}{\text{mol}}\right) + 2 \left(50,92 \frac{\text{J}}{\text{mol}}\right)\right) - \left(3 \left(213,7 \frac{\text{J}}{\text{mol}}\right) + 4 \left(28,33 \frac{\text{J}}{\text{mol}}\right)\right)$$

$$\Delta S = -59,48 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$\Delta S = -0,05948 \frac{KJ}{mol}$$

- Cálculo de ΔG para $T1(36,5^{\circ}C)$:

$$\begin{aligned} \Delta G &= \Delta H - T\Delta S \\ \Delta G &= -2392,5 \frac{KJ}{mol} - ((309,65 K) \left(-0,05948 \frac{KJ}{mol}\right)) \\ \Delta G &= -2373,85 \frac{KJ}{mol} \end{aligned}$$

- Cálculo de ΔG para $T2(37,8^{\circ}C)$:

$$\begin{aligned} \Delta G &= \Delta H - T\Delta S \\ \Delta G &= -2392,5 \frac{KJ}{mol} - ((310,95 K) \left(-0,05948 \frac{KJ}{mol}\right)) \\ \Delta G &= -2374,0 \frac{KJ}{mol} \end{aligned}$$

- Cálculo de ΔG para $T3(40,4^{\circ}C)$:

$$\begin{aligned} \Delta G &= \Delta H - T\Delta S \\ \Delta G &= -2392,5 \frac{KJ}{mol} - ((313,55 K) \left(-0,05948 \frac{KJ}{mol}\right)) \\ \Delta G &= -2373,85 \frac{KJ}{mol} \end{aligned}$$

Como el ΔH y ΔS son menores a cero, se tiene una reacción exotérmica con energía libre de Gibbs negativa para las tres temperaturas, concluyendo que las reacciones ocurren espontáneamente.