

TRABAJO DE GRADO

EFFECTO DE LA ALTURA SOBRE EL NIVEL DE MAR EN LA OPERACIÓN DE UN GRUPO ELECTRÓGENO DIESEL DE BAJO COSTO

Mileydy González Calderín
Mileydy.gonzalez.560@pascualbravo.edu.co

Gleydis Liseth González Calderín
Gleidys.gonzalez.638@pascualbravo.edu.co

Juan Gabriel Arroyo Zambrano
Juan.arroyo638@pascualbravo.edu.co

Asesor:
Yuhan Arley Lenis Rodas

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
Facultad de Ingeniería
Departamento de Mecánica
Tecnología en Mecánica Automotriz
Junio de 2022



SC 7134-1



Institución Universitaria - Vigilada Mineducación
PBX (+57 4) 448 0520 / FAX: (+57 4) 493 6363
Calle 73 No. 73A - 226, Vía El Volador

www.pascualbravo.edu.co



Alcaldía de Medellín

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	4
1.1	Identificación y descripción del problema.....	5
1.2	Marco teórico	6
1.3	Estado del arte	10
2	OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	20
3	METODOLOGÍA	21
4	RESULTADOS.....	25
4.1	Desempeño mecánico.....	25
4.2	Costos de operación	28
4.3	Emisiones contaminantes	29
5	CONCLUSIONES	31
6	BIBLIOGRAFÍA.....	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo teórico Diésel.....	8
Figura 2. Grupo electrógeno Diesel.....	14
Figura 3: Flujograma de la transformación de la energía en un grupo electrógeno	14
Figura 4. Grupo electrógeno diésel	21
Figura 5. Esquema de instalación experimental	22
Figura 6. Potencia generada.....	26
Figura 7. Consumo de combustible	27
Figura 8. Rendimiento o eficiencia de la planta	28

1 INTRODUCCIÓN

Desde que se inició la electrificación de ciudades a finales del siglo XIX, la electricidad se ha convertido en una forma de energía casi indispensable para la sociedad. Aunque esta puede ser obtenida de cualquier fuente que posea energía, como, por ejemplo: corrientes de aire, corrientes de agua, cascadas, movimiento de olas, rayos del sol, entre otros; hoy en día, por su disponibilidad, estabilidad, fácil manejo y baja inversión inicial, varios de los sistemas de generación más populares se basan en recursos no renovables como son los combustibles fósiles, a los cuales se les asocian problemas ambientales y de sostenibilidad. Un claro ejemplo del amplio uso de los generadores basados en no renovables, es que, aproximadamente el 30% de la generación de electricidad del sistema interconectado nacional (SIN) colombiano proviene de centrales térmicas que operan con carbón, gas natural y diésel (Ministerio de minas y energía, 2018). Otro panorama se ejemplifica en las regiones más apartadas donde no se dispone de interconexión al SIN, o donde la electricidad es suministrada de forma intermitente. En estos lugares, la generación de electricidad se basa principalmente en grupos electrógenos de baja potencia que emplean ya sea Diésel o Gasolina.

La masificación de estos sistemas en dichas zonas, se debe principalmente a la relativa baja inversión inicial en comparación con otros sistemas de generación. Estos equipos de bajo costo, usualmente vienen equipados con un muy bajo nivel de tecnología, por lo que su eficiencia y emisiones no se comparan con los motores a inyección electrónica que se utilizan en los vehículos actuales. Mientras la variación de altura sobre el nivel del mar pasa casi desapercibida en un vehículo con motor diésel turboalimentado, los motores diésel sin turboalimentación, como el de los grupos electrógenos usados para generación se ven considerablemente afectados por los cambios en las condiciones ambientales.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente trabajo se busca establecer las variaciones en emisiones contaminantes y desempeño energético de un grupo electrógeno de bajo costo, operando con diésel comercial a dos alturas diferentes sobre el nivel del mar. Para ello se desarrollarán pruebas en la ciudad de Medellín (aprox. 1.465 msnm) y en Necoclí (aprox. 10 msnm). A partir de dichas pruebas se busca establecer la variación en costo de generación y los índices de emisión asociados a la generación de electricidad en este tipo de plantas.

1.1 Identificación y descripción del problema

Aunque los costos de adquisición de los grupos electrógenos con bajo nivel tecnológico son considerablemente más bajos que los de otros sistemas de generación, el costo económico y ambiental a mediano y largo plazo llega a ser considerable. Si bien la adquisición de estos equipos se logra con presupuestos bajos (entre \$ 600.000 - 1.000.000 COP/kW), la generación suele estar entre \$1000 y \$1500 COP/kWh (Pérez, Lenis, Rojas, & Leon, 2012), muy por encima de lo que se paga en una vivienda de estrato tres que se abastece a través del SIN, donde se paga alrededor de \$ 350-600 COP/kWh.

Debido a las afectaciones sobre el desempeño mecánico y ambiental del motor causado por las condiciones ambientales, se presume que dicho costo de generación aumenta con el incremento de la altura sobre el nivel del mar, sin embargo, para las condiciones particulares de Colombia y de manera más específica en el departamento de Antioquia, no se ha establecido qué tanto se ve afectado el desempeño de dichos equipos de generación con el cambio de altura sobre el nivel del mar. Considerando lo anterior en el presente estudio se busca establecer las variaciones en desempeño mecánico y ambiental causadas sobre un grupo electrógeno diésel típico, cuando se cambia la altura sobre el nivel del mar.

1.2 Marco teórico

Un grupo electrógeno diésel, está compuesto por un motor de combustión interna de encendido por compresión acoplado a un generador eléctrico. De acuerdo con (Carlos B. H., 2019), estos dispositivos son comúnmente utilizados cuando hay déficit en la generación de energía eléctrica de algún lugar, o cuando son frecuentes los cortes en el suministro eléctrico. Sin embargo, el mayor uso se da para generar electricidad en aquellos lugares donde no hay suministro eléctrico. Generalmente son zonas apartadas con pocas infraestructuras y muy poco habitadas. Otro caso sería en locales de concurrencia pública: hospitales, fábricas, etc., lugares en los que la energía eléctrica de red es insuficiente y es necesaria otra fuente de energía alterna para abastecerse.

El motor diesel es un motor térmico de combustión interna en el cual el encendido se logra por la temperatura elevada producto de la compresión del aire en el interior del cilindro. Funciona mediante la ignición de la mezcla aire-gas sin chispa. La temperatura que inicia la combustión procede de la elevación de la presión que se produce en el segundo tiempo motor, compresión. El combustible diesel se inyecta en la parte superior de la cámara de compresión a gran presión, de forma que se atomiza y se mezcla con el aire a alta temperatura y presión. Como resultado, la mezcla se quema muy rápidamente. Esta combustión ocasiona que el gas contenido en la cámara se expanda, impulsando el pistón hacia abajo. La biela transmite este movimiento al cigüeñal, al que hace girar, transformando el movimiento lineal del pistón en un movimiento de rotación.

Las transformaciones del fluido en el interior del motor se realizan de acuerdo a un ciclo cerrado, utiliza aire a presión atmosférica o a una mayor presión en los sistemas sobrealimentados y la inyección de un combustible líquido el cual se enciende por la alta temperatura del aire lograda después de la compresión del aire. Las transformaciones del

fluido son las siguientes: En la carrera descendente del pistón, aspira un volumen de aire, que ingresa en una cámara, cuando el pistón sube comprime el aire que cuando alcanza el punto muerto superior se encuentra a alta temperatura, en ese momento se inyecta finamente pulverizada una cierta cantidad de combustible líquido, que a medida que ingresa, se enciende y produce una combustión a presión constante (teórico), para luego expandirse realizando la carrera útil, en cuyo transcurso entrega trabajo, luego en la carrera ascendente se eliminan los gases de la combustión y el ciclo se inicia nuevamente al igual que en el ciclo Otto. Los motores Diesel requieren mayor cantidad de aire para la combustión para compensar las malas condiciones de la mezcla y como dentro de ciertos límites la combustión es mejor cuanto mayor es el exceso de aire carburante, no es necesario regular la entrada de aire al variar el régimen y la carga, por lo tanto, la variación de la carga se hace sólo sobre el combustible. Se tiene así la ventaja que, a las cargas bajas, disminuyendo la resistencia a la entrada del aire por falta de la mariposa, aumenta el rendimiento por disminución de las pérdidas por bombeo. El motor suministra para cada regulación un par casi constante al variar el número de revoluciones. Aunque las máquinas de combustión interna operan en un ciclo mecánico (el émbolo regresa a su posición de inicio al final de cada revolución), el fluido de trabajo no se somete a un ciclo termodinámico completo (ver Figura 1). Es lanzado fuera de la máquina en algún punto del ciclo (como gases de escape) en lugar de regresarlo al estado inicial. Trabajar en un ciclo abierto es la característica de todas las máquinas de combustión interna.

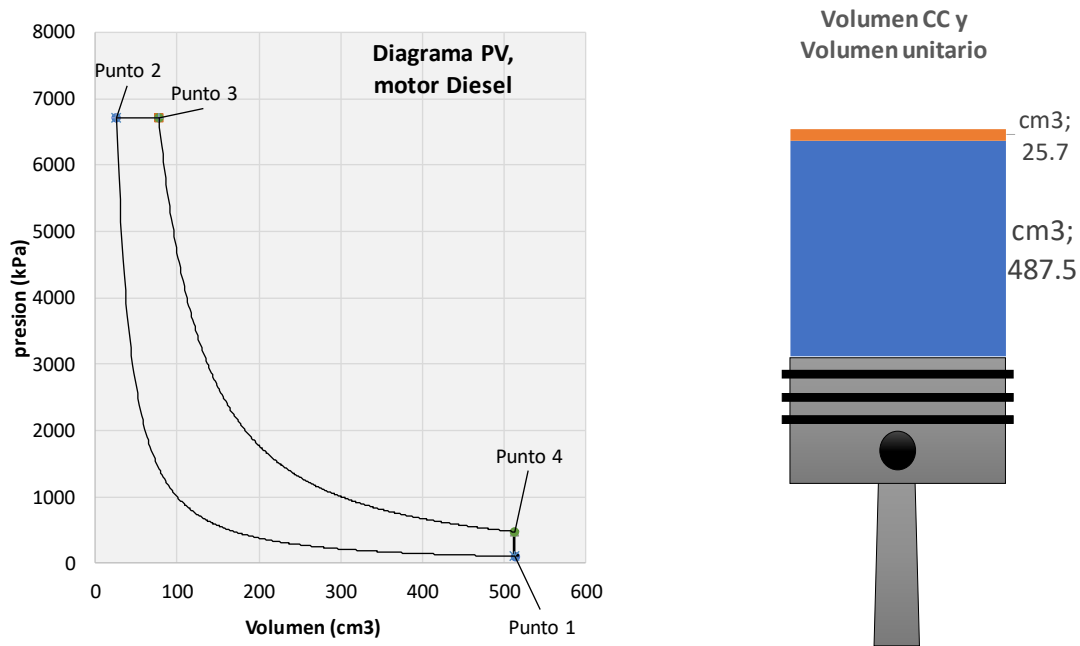


Figura 1. Ciclo teórico Diésel. Fuente: construcción propia

Los parámetros que caracterizan el funcionamiento de una planta diésel se pueden dividir en parámetros indicados, medidos al interior de la cámara de combustión; y parámetros efectivos, medidos en el eje de salida del motor:

Parámetros efectivos.

- Torque o PAR motor (M_e): El par motor es el momento de fuerza que ejerce un motor para realizar un trabajo, y se calcula con un freno dinamométrico que se conecta al eje del rotor del freno, como mostramos el inicio de funcionamiento de un freno dinamométrico.

$$M_e = Fb$$

- **Potencia (P_e):** Fuerza desarrollada en el motor, se mide con un dinamómetro que absorbe toda la potencia que entrega esta máquina, como resultado del par y la velocidad angular. En un grupo electrógeno la potencia también puede ser estimada con ayuda del voltaje y la corriente generada, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$P_e = 2\pi nM$$

Donde π es la velocidad rotacional del cigüeñal:

$$P_e = \text{voltaje} * \text{corriente}$$

- **Consumo de combustible:** Lo determina la potencia que conectemos al grupo electrógeno. El consumo de combustible es la cantidad que se requiere por unidad de tiempo, se puede medir con ayuda de una balanza y de un cronómetro, o de medidores de flujo diseñados específicamente para esta tarea.
- **Rendimiento (η_f):** La medida del rendimiento de un motor, llamado también *rendimiento de conversión de combustible (n_f)*, se puede medir lograr de forma directa y de forma indirecta. En la medición directa se calcula mediante la potencia de entrada y la potencia de salida desde el eje del motor, tal como se muestra a continuación. La medida indirecta emplea datos de la presión en cámara de combustión, de los cuales no se dispone en este trabajo.

$$n_f = \frac{\text{Potencia}}{\dot{m}_f * PCI}$$

Donde \dot{m}_f es el consumo de combustible.

- Consumo específico de combustible (gef): Porque vincula el flujo masivo ($m^{\circ}f$) de combustible por unidad de potencia de salida. Lo que simboliza una medición de la eficacia de un motor utilizando el combustible suministrado para producir trabajo. El consumo específico de combustible es inversamente proporcional al rendimiento de conversión de combustible.

Con unidades,

$$gef \left(\frac{g}{kWh} \right) = \frac{\dot{m}_f \left(\frac{g}{h} \right)}{P_e (kW)}$$

1.3 Estado del arte

Yosmani (Yosmani, 2012), establece que en muchos países en vías de desarrollo los grupos electrógenos (GE) son la más difundida fuente de electricidad fiable. Suministran energía a aquellas comunidades que no disponen de medios para conseguirla, mejorando la calidad de vida en muchas de las regiones menos desarrolladas del mundo. En nuestro país Colombia (Alvaro & Luis, 2004) describieron que las Zonas No Interconectadas, (ZNI), corresponden a aquellas áreas del país que no reciben servicio de energía eléctrica a través del Sistema Interconectado Nacional, y cuya interconexión no es económicamente factible. El servicio de energía en estas zonas se caracteriza por baja oferta de energéticos, baja cobertura, reducido número de horas de prestación del servicio y bajos niveles de calidad, entre otros. Adicional a estos aspectos, la densidad de la población hace difícil la prestación del servicio.

El abastecimiento de energía en las ZNI se realiza principalmente con base en generación diesel. Dicen (Alvaro & Luis, 2004), que las prácticas operativas y de mantenimiento reinantes en la zona, han hecho que esta tecnología sea calificada como de bajo rendimiento y baja confiabilidad. De otro lado, las características geográficas y socioeconómicas de estas regiones dificultan y encarecen el transporte de los insumos requeridos (combustibles, lubricantes, repuestos, etc.), lo cual redundando en que la prestación del servicio por medio de esta tecnología sea bastante onerosa. No obstante, la generación diesel ha sido la solución para un considerable número de localidades y posiblemente será, en casos específicos, la solución en algunas poblaciones durante mucho tiempo.

En relación con lo anterior dicho, Mauricio (Mauricio, 2012) deduce que los grupos electrógenos al constituir un medio de generación de energía eléctrica independiente de la red de suministro, tiene como función principal la de sustituir esta fuente principal. Dependiendo del tipo de uso que se le quiera dar a la planta, habrá una disminución en la capacidad de potencia de salida utilizable en función del número de horas que se quiera utilizar la planta. El autor también destaca que, para muchos una planta eléctrica es sinónimo de sistema de emergencia. Lo que no es del todo cierto pues las plantas eléctricas tienen diferentes usos dependiendo de los requerimientos del cliente. Entre las principales aplicaciones se encuentran las siguientes:

- Sistemas de emergencia

Los sistemas de emergencia se utilizan para alimentar el total de las cargas o parte de ellas, en los casos en los que se tienen dificultades con la red de suministro normal o cuando se tiene una interrupción total de la misma.

- Generación en horas pico

La Compañía Suministradora de Energía Eléctrica cobra un recargo a las industrias debido al consumo de energía en horario punta. En estas instancias se puede utilizar una planta eléctrica para alimentar cargas dentro de las horas pico del día, para reducir este recargo. La energía consumida durante las horas pico del sistema tiene un costo mayor que la utilizada en los horarios de demanda base e intermedia.

- Energía Principal

A pesar de que prácticamente el 98% del país cuenta con energía eléctrica, existen ciertas zonas donde no se cuenta con tal suministro. La utilización de las plantas como energía principal es necesaria en las instancias donde no se cuente con una conexión a la red y se tenga que alimentar cargas por periodos extendidos de tiempo (8h).

- Cogeneración

La cogeneración se refiere al aprovechamiento no solo de la energía eléctrica producida por las plantas, sino también de la energía térmica presente en los gases de la combustión, esto se logra típicamente con un sistema que recupera el calor generado por la combustión y el sistema de enfriamiento. Esta energía puede utilizarse para calentamiento de agua, calefacción, etc., Este tipo de sistemas puede ayudar a disminuir el efecto invernadero.

- Conexión con la red

La conexión con la red se puede usar para vender la energía que se produce en la planta a la empresa distribuidora, mediante la conexión de manera continua o por tiempos prolongados

de la planta con la red. En estos casos deben tenerse mayores consideraciones en cuanto a las protecciones que debe tener la planta, y de permisos y requisitos que deben solicitarse a la empresa encargada del suministro. Esto con la finalidad de tener un descuento en el cobro de la factura por el consumo de Energía Eléctrica.

De acuerdo con la teoría de (Carlos & Yamid, 2017) Se han ilustrado los fundamentos teóricos del balance energético de los motores de combustión interna, y como aplicación, se ha cuantificado de una manera general los parámetros de cogeneración como la relación calor electricidad, el rendimiento eléctrico equivalente y el rendimiento global de una planta eléctrica, suponiendo que toda la energía disipada con los gases de escape y con el refrigerante se aprovecha. Aún con este supuesto, el desempeño de la instalación no da los valores necesarios para justificar la utilización de la planta en cogeneración, bajo la normatividad colombiana. Esto no deja de lado que la energía se pueda y deba emplear en otros sistemas auxiliares o para fines donde esa energía se necesite y los costos de utilización lo permitan.

En la Figura 2, se presenta un ejemplo de un grupo electrógeno. Este conjunto permite transformar la energía del combustible en energía eléctrica. En la Figura 3. Podemos observar el flujograma del proceso de transformación de la energía en un grupo electrógeno, de acuerdo con el trabajo de (Carlos B. H., 2019). La energía química del combustible es transformada en energía térmica a través del calor que emana en el proceso de combustión. Este proceso permite la transformación del calor en energía mecánica, a partir del mecánico biela manivela que permite accionar al cigüeñal. El cigüeñal comparte el mismo eje que el generador por lo que al final se obtendrá energía eléctrica



Figura 2. Grupo electrógeno Diesel



Figura 3: Flujograma de la transformación de la energía en un grupo electrógeno

Si bien se espera que la eficiencia de un motor diésel se encuentre alrededor de 30%, debido al bajo nivel de tecnología de los grupos electrógenos de bajo costo, se presume que este valor es considerablemente menor y que se ve considerablemente afectado con la altura.

En este sentido, La Puerta et al. (La Puerta, Armas, Agudelo, & Agudelo, 2006) evaluaron teóricamente el desempeño de motores Diesel con y sin turbo alimentación a diferentes alturas sobre el nivel del mar, analizaron el efecto de la altitud sobre los parámetros característicos de la combustión y sobre la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x). Demostraron la importancia de los procesos de mezcla y combustión sobre la formación de contaminantes, en el caso de los motores turboalimentados, bajo el supuesto de que disponen del sistemas de control de la presión de admisión (compuerta de descarga, turbinas de geometría variable, etc.) necesarios para una recuperación completa de la potencia.

De acuerdo con sus resultados, para motores de aspiración natural se obtienen disminuciones en las emisiones de NO_x en torno al 11% para alturas de 1850 msnm, mientras que para

motores turboalimentados las máximas reducciones estaban en torno a 2% para alturas de 1600 y 2160 msnm. Y se comprueba que el efecto más importante sobre la emisión de NOx es el causado por la temperatura de combustión adiabática, ya que ésta permite explicar por sí sola los resultados experimentales encontrados en la literatura. Además, destacan que, las variaciones estimadas sobre el desarrollo de la combustión al variar la altitud son casi inapreciables en el caso de motores turbo-alimentados y que las ligeras reducciones del tiempo de retraso se compensan con los tiempos algo más largos de duración de la combustión. La reducción de las emisiones de NOx con la altitud se debe principalmente a la disminución de la temperatura de combustión adiabática, y en menor medida, a la presencia de oxígeno en la llama.

Un estudio similar fue presentado recientemente por Arroyo et al. (Arroyo, Cevallos, Imbaquingo, & Melo, 2020), quienes hacen pruebas experimentales en tres ciudades de Ecuador en las que se tienen 0 msnm, 2200 msnm y 3000 msnm, en el mismo horario del día para cada localidad. Las pruebas fueron realizadas a diferentes rpm de operación del motor midiendo desempeño y gases, a fin de obtener los niveles de emisiones contaminantes en la mayor cantidad de condiciones de trabajo posibles. En sus pruebas usaron un vehículo con motor diésel y las mediciones se realizaron con el vehículo sin carga, el protocolo de pruebas consideraba:

- Verificar el buen estado del sistema de escape del vehículo, libre de golpe, fugas o modificaciones al sistema original.
- Colocar la transmisión del vehículo en posición neutral.
- Esperar que el motor del vehículo se encuentre a temperatura óptima de funcionamiento. Verificar que no existan cargas adicionales en el funcionamiento del motor, como, por ejemplo, luces, radio, aire acondicionado.
- Colocar el medidor de revoluciones de motor.

- Esperar que los equipos de medición realicen el proceso de calentamiento y estabilización.
- Verificar el correcto estado y limpieza de la sonda e introducirla en el tubo de escape de forma que se encuentre fija en este.

Los resultados demuestran que a medida que se incrementan las revoluciones(rpm) en el motor, aumentan las emisiones de CO. Por otra parte, para la generación de dióxido de carbono, el factor de mayor importancia es la altitud y, por ende, la presión atmosférica a la que opera el motor. La reducción de presión atmosférica disminuye el porcentaje de volumen de CO₂ en la composición de los gases de escape. En cuanto a los hidrocarburos no combustionados, el régimen de giro del motor influye de manera directa al disminuir el nivel de emisiones a medida que se incrementan las revoluciones del motor.

En otro trabajo, (Pablo & Juan), evaluaron la incidencia de los factores que determinan el índice de opacidad de los vehículos con motor de combustible diésel de la provincia de Imbabura (Ecuador). En dicho trabajo se desarrollaron las siguientes actividades:

- Identificaron los factores de relevancia que inciden en el aumento o disminución del nivel de opacidad de los vehículos con motor de combustible Diesel.
- Midieron el nivel de opacidad de los vehículos con motor de combustible Diesel de la provincia de Imbabura.
- Establecieron el comportamiento de los factores determinantes del nivel de opacidad de los vehículos con motor de combustible Diesel en la provincia de Imbabura.
- Determinaron el nivel de correlación entre el porcentaje de opacidad detectado en los vehículos con el motor de combustible Diesel y los factores que lo generan.

La metodología demuestra la viabilidad para ejecutar las pruebas y mediciones, pues estarán basadas en el método científico. Se aplicará la modalidad de investigación cuantitativa, por medio de la cual se medirán, analizarán y evaluarán las variables contenidas en el estudio.

Adicionalmente, el uso del método analítico-sintético permitirá descomponer las variables y posteriormente establecer las conclusiones que permitirán validar las hipótesis planteadas. Según el estudio realizado, existen algunos factores que determinan el nivel de opacidad que registran los vehículos con motores de combustible Diésel, entre los más importantes están: el kilometraje recorrido por el vehículo, que está relacionado con la vida útil del automotor; el mantenimiento que los propietarios realizan a sus vehículos, siendo relevante tomar en cuenta la especificación técnica del fabricante para llevarlo a cabo; la calidad del diesel utilizado por el automotor, factor que de Ecuador está controlado a partir de la disposición de comercializar diesel Premium de bajo contenido de azufre (500 ppm) en todo el País. En la provincia de Imbabura, de acuerdo con los resultados de las pruebas de opacidad realizadas a los vehículos con motor de combustible diesel, se determina que estos varían desde 11,8% hasta 59,3%, la mayor cantidad de medidas son altas, pues se acercan o inclusive algunos pasan los límites permitidos por la ley (60% vehículos hasta el año 1999 y 50% vehículos del año 2000 en adelante).

Por otro lado los costos de producción en grupos electrógenos Diesel, para los sistemas de generación de energía eléctrica de las ZNI se agruparán los costos de producción en dos grandes componentes:

- Costos de Inversión: Comprende los que hacen referencia a la compra, instalación y puesta en funcionamiento del sistema de generación.
- Costos de Administración, Operación y Mantenimiento: En este se agrupan todos aquellos costos asociados a la actividad de producción de energía eléctrica, excepto los costos de combustible y lubricantes. Incluyen todas las actividades que se

requieren para garantizar la disponibilidad, confiabilidad y eficiencia de las máquinas.

Adicionalmente a estos dos componentes, se tiene presente también un tercer componente:

- Costos de combustibles y lubricantes: Para este estudio se propone dejar este ítem independiente dado el peso relativo que el mismo tiene sobre el costo de producción, así como la diferenciación en el análisis cuando se busca mayor eficiencia en el costo de generación.

Además, los Costos de Inversión están asociados a la condición de que las plantas funcionan aisladas eléctricamente y atienden un mercado local único.

Las plantas atienden mercados que van desde 10 kW hasta 4,000 kW de demanda pico.

Los principales elementos de costo que componen el rubro de inversión en este tipo de plantas corresponden a los siguientes componentes:

- Grupo electrógeno
- Cabina insonorizadora
- Transformadores y sus auxiliares
- Tanques de almacenamiento de combustible y sus accesorios

Marcas de grupos electrógenos en ZNI

La siguiente tabla agrupa las marcas de fabricantes de grupos electrógenos encontradas en ZNI distribuidas por plantas y potencias. Existe una alta diversidad de marcas en el mercado

correspondientes a plantas instaladas en diversos sitios, siendo Lister y Perkins las más representativas en número y Gummis y Detroit en potencia.

Tabla 1. Fabricantes de grupos electrógenos encontradas en ZNI.

MARCA	CANTIDAD PLANTAS	KW NOMIN	RPM
SIN INFORMACION	635	27,034.0	
LISTER	98	2,798.3	1800
PERKINS	91	8,768.0	1800
CUMMINS	55	24,901.0	1800
VM-MARELLI	45	2,697.0	1800
DETROIT	33	11,370.0	1800
CATERPILLAR	25	8,137.0	1800
JOHN DEERE	20	1,820.0	1800
MAN	13	4,054.0	1800
ISOTTA FRASCHINI	10	5,575.0	1200
MWM	8	522.0	1800
BLACKSTONE	4	1,280.0	900
GMT - ANS	4	12,160.0	514
KUBOTA	4	45.3	1800
GENERAL	3	300.0	1800
EMD	2	4,600.0	900
HATS	2	14.0	1800
HONDA	2	22.0	1800
INTERNATIONAL	2	173.0	1800
IVECO	2	56.0	1800
KOHLER	2	1,200.0	1800
OLIMPIAN	2	120.0	1800
PEGASO	2	275.0	1800
BRIGGS	1	7.0	1800
CHINA	1	40.0	1800

2 Objetivos del trabajo de grado

Objetivo general

Determinar el efecto de la altura sobre el nivel del mar en las prestaciones mecánicas, ambientales y costo de generación de un grupo electrógeno diésel de bajo costo.

Objetivos específicos

1. Evaluar experimentalmente la variación en parámetros efectivos y de funcionamiento de un grupo electrógeno diésel de aspiración natural cuando se cambia la altura sobre el nivel del mar.
2. Determinar la variación en contaminación ambiental causada en grupo electrógeno diésel cuando cambia la altura sobre el nivel del mar.
3. Establecer el costo de generación de electricidad para las dos condiciones de alturas planteadas considerando tanto el precio del combustible como de la unidad de generación.

3 Metodología

El presente trabajo se divide en tres fases metodológicas alineadas con los objetivos específicos.

Fase 1. Variación de la potencia del motor. Para ello, se hará uso de un grupo electrógeno diésel de bajo costo, acondicionado para realizar la medición de consumo de combustible y potencia disipada, similar al presentado en la Figura 4. En esquema experimental empleado se muestra en la Figura 5.



Figura 4. Grupo electrógeno diésel

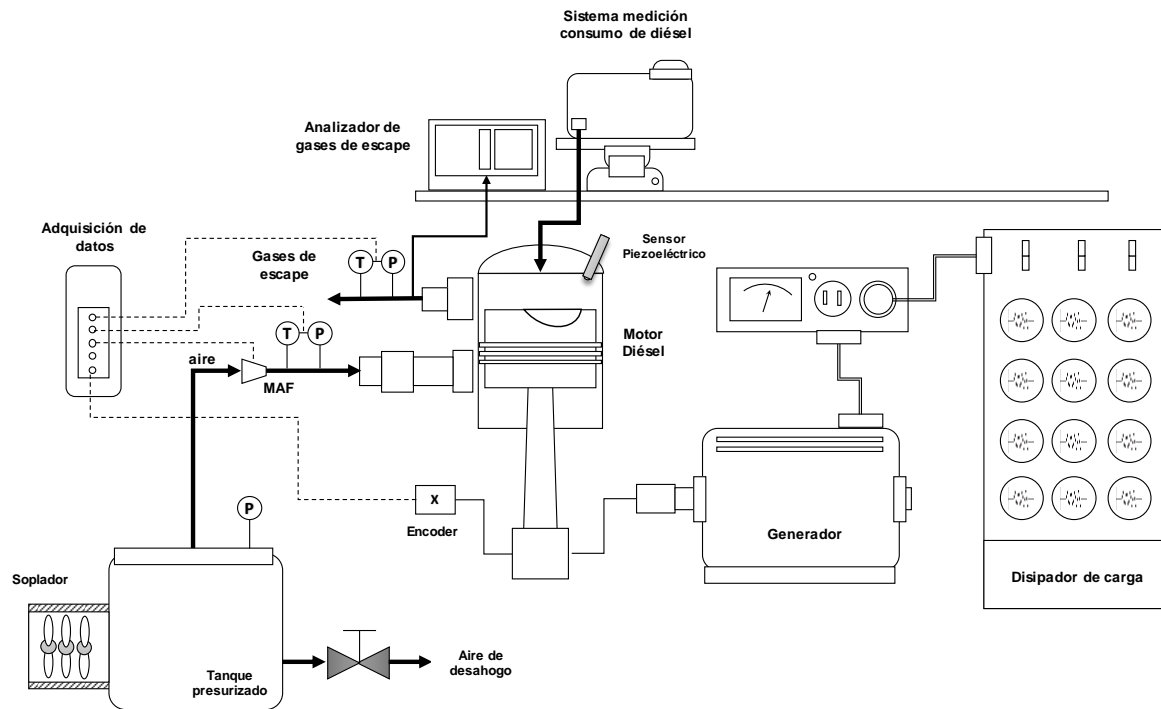


Figura 5. Esquema de instalación experimental

El consumo de combustible se mide colocando el tanque sobre una balanza y tomando la diferencia de peso en un intervalo de tiempo conocido. La medición de potencia se realizará con la ayuda de pinzas amperimétricas y de un multímetro. La velocidad de giro del motor será establecida a partir de la lectura del voltaje de generación. El flujo de aire que ingresa al motor será medido con ayuda de un anemómetro de turbina.

A partir de dichas mediciones se puede establecer, torque del motor, consumo específico de combustible, presión media efectiva y eficiencia, los cuales serán utilizados como

indicadores de desempeño. Las ecuaciones para el cálculo de estos parámetros se presentan en la sección 2.2. Los parámetros considerados son los siguientes

- Potencia Efectiva (P_e).
- Consumo de combustible
- Consumo específico de combustible (gef)
- Rendimiento
- Costo de operación

Las pruebas se realizan a igualdad de revoluciones, pero cambiando la potencia generada. Se evaluarán por lo menos 2 diferentes potencias, con dos y con 4 bombillos. Lo que equivale a potencias de aproximadamente 600W y 1000W. Para analizar la variación de altura, se considera presurizar la admisión del motor en por lo menos dos niveles.

Fase 2. Emisiones contaminantes. En las mismas condiciones de operación alcanzadas en el punto anterior se miden las emisiones de CO y NOx. Dichas mediciones se realizan en porcentaje.

Fase 3. Costo de generación. Sabiendo el gasto de combustible y la potencia generada por el motor en cada una de las tres condiciones de operación, empleando el valor comercial del combustible se establecerá el costo de generación asociado a la operación de este sistema. Dicho costo será comparado con los costos asociados al SIN y a plantas solares fotovoltaicas.

Como ya se ha mencionado, para emular la variación de altura, se presurizará la admisión de la planta de generación. De acuerdo con las presiones que se está en capacidad de reproducir (hasta 20 mbar manométricos), la variación de desempeño, estaría relacionada a un cambio

similar al que se tendría al pasar de la ciudad de Medellín, a la ciudad de Ibagué, cuyas principales características se describen en la siguiente tabla:

Tabla 2. Características de los dos lugares seleccionados como casos de estudio

Propiedad	Medellín	Ibagué
Altura sobre el nivel del mar, m	1.495	1285
Densidad del aire, kg/m ³	1.0005	1.01
Temperatura promedio, Centígrados	23	25
Presión atmosférica, kPa	85	86.8
Población, habitantes	2.534.011	529.635

4 Resultados

Como se comenta en la metodología, las presiones en la admisión del motor fueron emuladas con ayuda de un sistema de presurización, a continuación, se presentan los resultados tanto de desempeño como de costo de operación y emisiones contaminantes.

4.1 Desempeño mecánico

Como parámetros de desempeño se consideran el consumo de combustible, la potencia y eficiencia, los cuales son analizados para las dos condiciones de altura emuladas.

- Potencia efectiva

Como podemos observar en la siguiente gráfica, notamos que en Ibagué la planta electrógena alcanza valores similares a los que se tendría en la ciudad de Medellín, lo anterior se debe principalmente a que la planta se encontraba operando a carga parcial, por lo que las

variaciones causadas por los cambios en la densidad del aire, son absorbidos por incrementos en la inyección de combustible, tal como se analizará en la siguiente sección. También es de destacar que se probaron dos niveles de potencia y en ambos se obtuvo un resultado similar. En adelante siempre que se haga referencia a 2 bombillos, se estará aludiendo a la menor potencia (580 W), y 4 bombillos, hará referencia a 970 W, respectivamente.

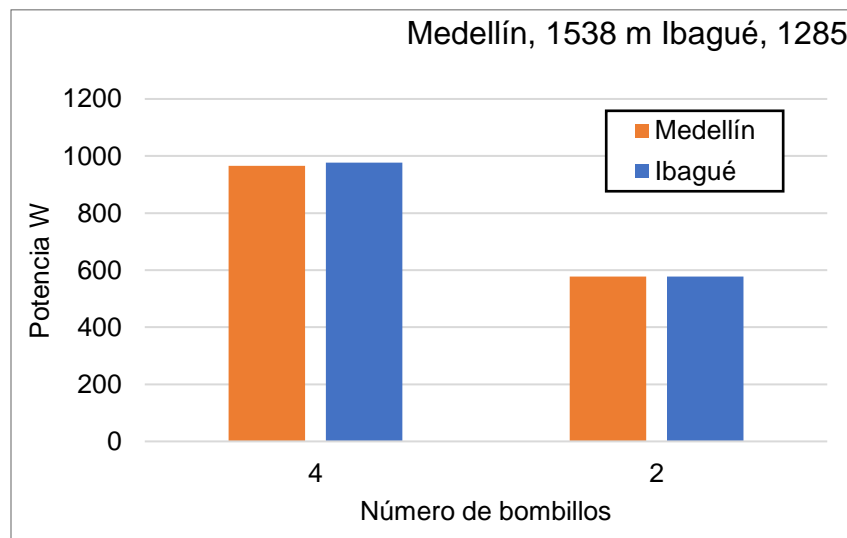


Figura 6. Potencia generada

- Consumo de combustible:

La siguiente grafica nos demuestra que la planta electrógena tiene un mayor consumo de combustible en Medellín y esto se debe a la mayor altura sobre el nivel del mar. Tal como se presumía la menor densidad del aire afecta el desempeño del motor. Este resultado se relaciona principalmente con la disminución del rendimiento volumétrico del motor.

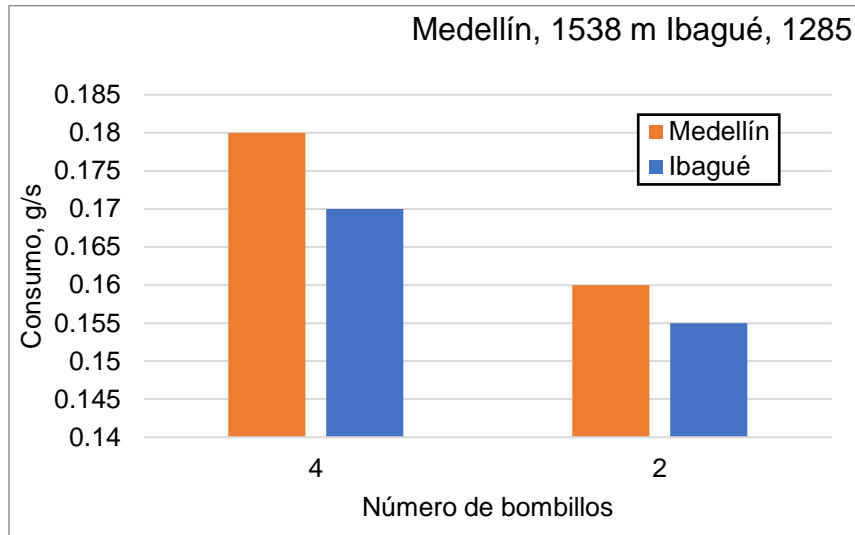


Figura 7. Consumo de combustible

- Rendimiento efectivo.

En la siguiente grafica nos demuestra que en Ibagué la planta tuvo una mayor eficiencia que en Medellín por las mejores condiciones en la ciudad en cuanto a la presión atmosférica. Con la mayor presión, aumenta la densidad del aire, lo que favorece el rendimiento volumétrico de la máquina térmica. De esta manera, el motor requiere hacer menores esfuerzos de bombeo y por tanto consume menos combustible. Vale la pena destacar que los cambios fueron menores a un punto porcentual, lo que se debe a que las condiciones probadas para simular ambas ubicaciones tan solo diferían en 20 mbar en la presión de admisión.

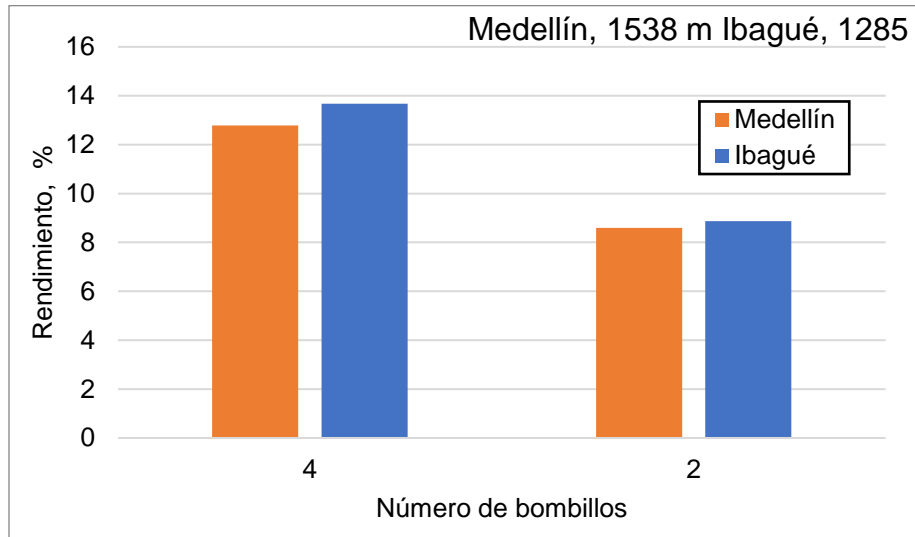


Figura 8. Rendimiento o eficiencia de la planta

4.2 Costos de operación

Considerando un valor del litro de diésel, de 2342 pesos, se determina el costo de generación por combustible del grupo electrógeno, dando como resultado un costo de generación entre 1500 y 1800 pesos colombianos por cada kWh generado.

Con la información anterior nos podemos dar cuenta que tiene un mayor costo los kWh generado por la planta frente a la empresa distribuidora de energía en la ciudad. El costo de operación es el asociado exclusivamente al valor del combustible. Vale la pena anotar que, de tener en cuenta costos como adquisición de la planta y mantenimiento, el valor de generación sería aún mayor, alejándose cada vez más del costo de venta del distribuidor de electricidad.

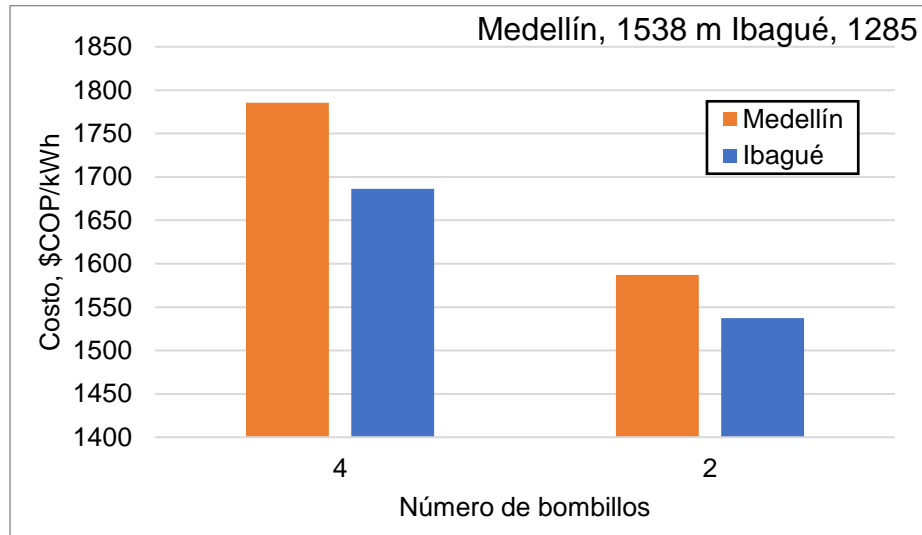


Figura 9. Rendimiento o eficiencia de la planta

4.3 Emisiones contaminantes

La altura sobre el nivel del mar también impacta las emisiones contaminantes del motor. En este trabajo solo se midieron las emisiones de CO, y NOx. Como se muestra en la Figura 10, el CO aumenta con la altura sobre el nivel del mar y con el aumento de la carga del motor. Este último resultado era el esperado, sin embargo, se esperaba que, al tener mayor disponibilidad del aire, por efectos de la menor altura, las emisiones de este contaminante fueran menores. El resultado de la emisión con la mayor densidad puede estar asociado al diseño del equipo, en el que no se tiene ningún mecanismo de control de emisiones.

Los NOx siguen el comportamiento esperado tanto en aumento de carga como en el aumento de altura o presión de admisión. La mayor presión y la mayor carga derivan en un mayor aumento de la masa de aire al inicio de la carrera de compresión, por lo que se alcanzan

mayores temperaturas en cámara de combustión, derivando esto en una mayor producción de este contaminante.

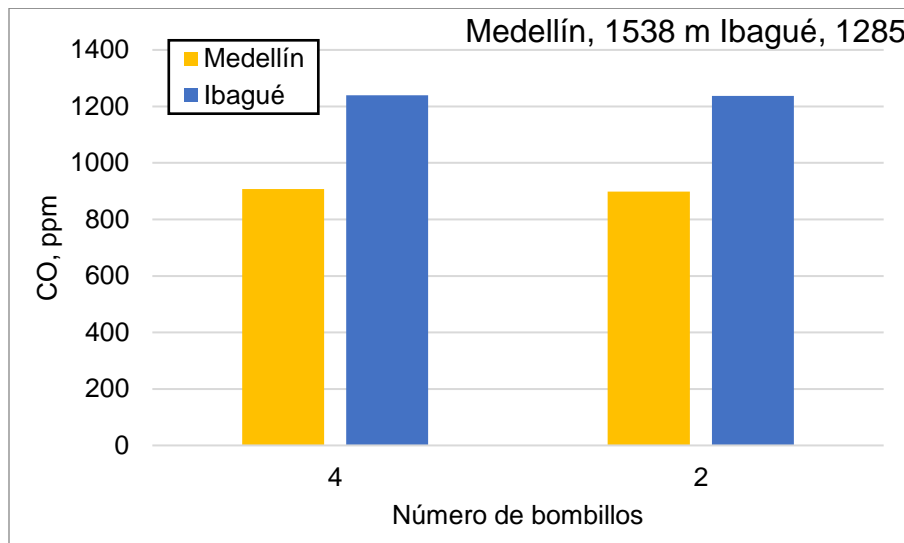


Figura 10. Emisiones contaminantes.

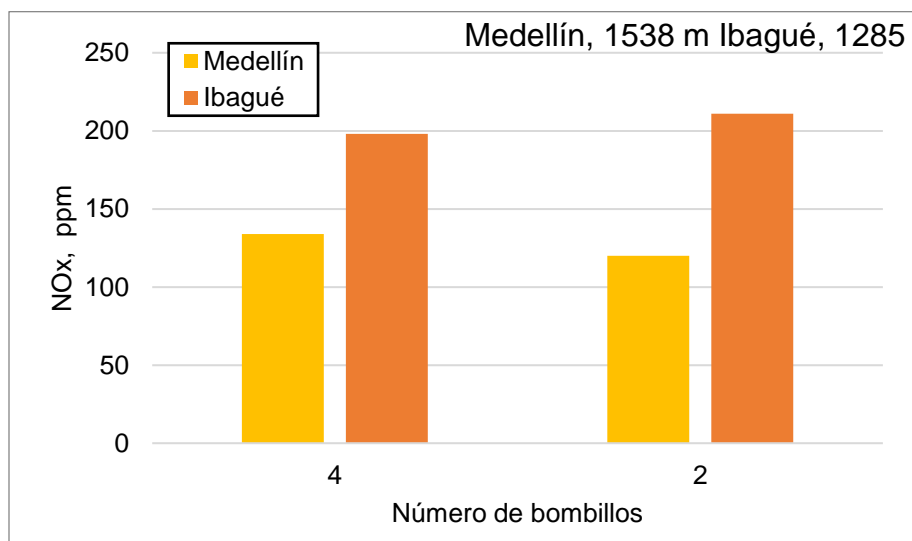


Figura 11. Emisiones contaminantes.

5 Conclusiones

- Con los resultados de esta investigación se puede afirmar que, la planta electrógena diésel tiene mejor desempeño mecánico cuando se disminuye la altura sobre el nivel del mar, incrementando su eficiencia hasta en un punto porcentual cuando se varían las condiciones de Medellín a Ibagué.
- Los grupos electrógenos son un gran beneficio en situaciones de emergencia, aunque su costo de generación llegue a ser cinco veces más costoso que el valor reportado de venta de la electricidad del Sistema Interconectado Nacional. Particularmente, en este trabajo, el costo de generación se mantiene aproximadamente entre 1550 y 1800 pesos por kWh, dependiendo de las condiciones de carga y de la altura sobre el nivel del mar.
- Los gases contaminantes se mantienen con pocas variaciones en función de la carga, sin embargo, la altura afecta considerablemente tanto la emisión de CO como de NOx. Tanto para el CO como para los NOx, la emisión aumenta cuando se aumenta la presión en la admisión del equipo, es decir, cuando se tiene menor altura sobre el nivel del mar.

6 Bibliografía

Alvaro, C., & Luis, C. (2004). *Instructivo gerencial para la selección de una planta diesel*.

Bogotá:

<https://mail.google.com/mail/u/0/#inbox/FMfcgzGpFWVVGPQZsjtDtxgQmKZkJKDt?projector=1&messagePartId=0.1>.

Arroyo, E., Cevallos, A., Imbaquingo, R., & Melo, J. (2020). Estudio del efecto de la altitud sobre las emisiones de gases de escape de motores de combustión interna con encendido provocado. *Ingeniería y Desarrollo*.

Carlos, B. H. (2019). "Propuesta de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad(RCM) para grupos electrogenos Diesel volvo penta de 500KW de la empresa RD Rental S.A.C -La victoria-Chiclayo-Lambayeque". Perú: <https://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/3928/BC-TES-TMP-2711.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Carlos, R., & Yamid, C. (2017). *Valoración de la capacidad de cogeneración de una planta eléctrica diesel de 10 Kva*. Pereira/Colombia.: <file:///C:/Users/corre/Downloads/Dialnet-ValoracionDeCapacidadDeAutogeneracionConPequeñasPI-6299880.pdf>.

La Puerta, M., Armas, O., Agudelo, J., & Agudelo, A. (2006). Estudio del Efecto de la Altitud sobre el Comportamiento de Motores de Combustión Interna: Parte 2. Motores Diésel. *Información Tecnológica*, 17, 31-41.

Mauricio, R. J. (2012). Implementación de plantas electricas para instalación en baja tensión aplicando las especificaciones vigentes. <file:///C:/Users/corre/Downloads/TESIS%20ESIME%20Jesus%20Rodriguez.pdf>.

Ministerio de minas y energía. (2018). INFORME MENSUAL DE VARIABLES DE GENERACIÓN Y DEL MERCADO ELÉCTRICO COLOMBIANO – AGOSTO DE 2018. Bogotá, DC.

Pablo, L., & Juan, M. (s.f.). *Medición y evaluación de los niveles de opacidad generados por los vehículos con motor de combustible diesel*. Ecuador.: <https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/881/1/T-UIDE-0746.pdf>.

Pérez, J., Lenis, Y., Rojas, S., & Leon, C. (2012). Generación distribuida mediante gasificación de biomasa: un análisis técnico – económico e implicaciones por reducción de emisiones de CO₂. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 157-169.

Yosmani, A. (2012). *Procedimiento para la evaluación de batería de grupos electrogenos Diesel tabajando en condciones climatológicas locales. cuba*: <http://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/3065/aguilera.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.