



ING. AUTOMOTRIZ

**Artículo de grado previo a la obtención del título de
Ingeniería en Mecánica Automotriz**

AUTORES:

Paulo Martin Bolaños Paredes
Christian Andrés Pozo Gavilanes

TUTOR:

Ing. Juan Carlos Rubio Terán, MBA

**ESTUDIO COMPARATIVO A DIFERENTES
ALTURAS PARA PROPONER CORREGIR
LANORMA 2201**

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **Paulo Martin Bolaños Paredes** y **Christian Andrés Pozo Gavilanes**, declaramos bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, su reglamento y demás disposiciones legales.



Paulo Martin Bolaños Paredes



Christian Andrés Pozo Gavilanes

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo, **Juan Carlos Rubio Terán**, certifico que conozco a los autores del presente trabajo, siendo el responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.



Ing. Juan Carlos Rubio Terán, MBA

DEDICATORIAS

Dedico con todo mi corazón este logro a mis Padres Marisol Paredes y Milton Bolaños, quienes han estado conmigo en cada paso que doy, su bendición a diario a lo largo de mi vida me protege y me lleva por el camino del bien, ya que con su paciencia y amor me han apoyado en todo este proceso de mi carrera universitaria. A mi hermana Andrea y a mis Sobrinos por ser un apoyo incondicional y darme su cariño. A Fátima mi esposa por sus palabras de aliento, confianza, amor y por brindarme el tiempo necesario para realizarme profesionalmente y así poder culminar mi carrera. Agradezco a toda mi familia por ser parte de este logro.

Paulo Martín Bolaños Paredes

A mi familia quienes me impulsaron a ser mejor cada día para lograr concluir este momento de formación profesional, por sus sacrificios y apoyo constante que han sido la clave de mi éxito. A ti Dios mío quien con tu infinita sabiduría me has bendecido con apoyo, salud y trabajo para que logre alcanzar cada objetivo trazado.

Christian Andrés Gavilanes Pozo

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, que me permitió culminar esta etapa tan importante en mi vida, por brindarme la sabiduría en días difíciles. Agradecer a mis padres, por su amor incondicional y su apoyo moral. Su fe en mí, incluso en los momentos más difíciles, han sido el pilar de este logro tan importante. También quiero agradecer a quien en ese momento fue mi novia, ahora mi esposa Fátima por brindarme su tiempo, paciencia y amor para escucharme y apoyarme, en los momentos más difíciles. Sin ustedes, todo esto no habría sido posible. Su amor y sacrificio han sido la luz que guio mi camino a través de este viaje de aprendizaje. De igual manera, agradezco a la Universidad Internacional del Ecuador por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de ser profesional. Agradezco a mi director, el Ing. Juan Carlos Rubio por su guía constante en este proceso. Su experiencia y conocimiento han contribuido en este gratificante logro.

Paulo Martin Bolaños Paredes

A mi querida Universidad que abrió las puertas a un joven soñador, con muchos deseos de superación y triunfo en la vida, que hoy se ven plasmados en mi desarrollo no solo profesional, sino personal. A mis maestros que con su experiencia, dedicación y pasión por la enseñanza supieron brindarme el mejor conocimiento y sabios consejos. La mayor gratitud a mis padres Javier y Miriam, quienes me dieron la existencia y sembraron en mí valores como: respeto, confianza, compromiso, tolerancia, profesionalismo, responsabilidad, honestidad, equidad, sentido de pertenencia; quienes con su amor incondicional y ejemplo me guiaron en mi camino.

Christian Andrés Gavilanes Pozo

Índice

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA.....	¡Error! Marcador no definido.
APROBACIÓN DEL TUTOR	4
DEDICATORIA.....	5
AGRADECIMIENTO.....	6
ESTUDIO COMPARATIVO A DIFERENTES ALTURAS PARA PROPENER CORREGIR LA NORMA 2201	9
ESTUDIO COMPARATIVO A DIFERENTES ALTURAS PARA CORREGIR LA NORMA 2201.....	9
RESUMEN.....	10
ABSTRACTO.....	11
1. INTRODUCCION.....	12
2. MARCO TEÓRICO	13
Tabla 1. Tabla de la normativa INEN 2349 Normativa de aplicación de los Centros de Revisión y Control Vehicular (CRCV).	14
3. MATERIALES.....	15
3.1 Motor diésel mono cilíndrico	15
Tabla #1 Ficha técnica Motor KM170F, Fuente Cooled Diesel Engine.....	16
Figura #1, Motor mono cilíndrico Diésel (Cooled Diesel Engine), Fuente Autores.	16
3.2 Opacímetro	16
Figura #2. Opacímetro de edición, Fuente Autores.....	16
3.3 Altímetro.....	17
3.4 Combustible diésel.....	17
4. RESULTADOS.....	17
Tabla# 2. Resultados de opacidad a 2872m de altura sobre el nivel del mar a 2000 RPM, Fuente Autores	18
Tabla #3. Resultados de opacidad a 2872m de altura sobre el nivel del mar a 2000 RPM, Fuente Autores	18
Tabla#4. Resultados de opacidad a 2000 m. de altura sobre el nivel del mar a 2000 RPM, Fuede Autores	19
Tabla #5. Resultados de opacidad a 2872m de altura sobre el nivel del mar a 2000 RPM, Fuente Autores	19
Tabla #6. Resultados de opacidad a 1500 m. de altura sobre el nivel del mar a 2000 RPM, Fuente Autores	19
Tabla #7. Resultados de opacidad a 1500 m. de altura sobre el nivel del mar a 2000 RPM, Fuente Autores	19

Tabla #8. Resultados de opacidad a 1000 m. de altura sobre el nivel del mar a 2000 RPM, Fuente Autores	20
Tabla #9. Resultados de opacidad a 1000 m. de altura sobre el nivel del mar a 2000 RPM, Fuente Autores.	20
Tabla #10. Resultados de opacidad con altura de 500 metros sobre el nivel del mar, Fuente Autores	20
Tabla 11, Resultados de la opacidad a 500 msnm, Fuente Autores	21
Tabla 12. Resultados de opacidad con combustible colombiano a 1500 RPM, Fuente Autores.....	21
Tabla #13 Resultado de datos. Fuente Autores.....	21
Bibliografía.....	22
ANEXOS.....	25

ESTUDIO COMPARATIVO A DIFERENTES ALTURAS PARA PROPENER CORREGIR LA NORMA 2201

ESTUDIO COMPARATIVO A DIFERENTES ALTURAS PARA CORREGIR LA NORMA 2201

Ing. Juan Carlos Rubio Terán MBA

jrubio@uide.edu.ec

Bolaños Paredes Paulo Martín

pabolañospa@uide.edu.ec

Pozo Gavilanes Christian Andrés

chpozoga@uide.edu.ec

RESUMEN

En un proceso de combustión hay tres factores importantes, una fuente de calor (foco de color), encargado de iniciar el proceso de combustión, el combustible que es de quien obtenemos energía o calor (poder calórico del combustible) y el oxígeno tan importante como los otros dos elementos, la relación del oxígeno con el combustible permite que se lleve a cabo el proceso de combustión y de las características en la que se encuentra localizados en la naturaleza, la combustión tendrán ciertas variantes en el estudio dependiendo de las distintas altitudes a los que se encuentre el motor atmosféricos que reciben el oxígeno del aire a la presión de acuerdo al lugar y su condición geográfica. La mayor altitud a la que se encuentre el motor sufre una caída del particulado de oxígeno debido a la pérdida de presión, una de las formas de resolver este fenómeno natural es colocar motores turbo alimentados que permite una mayor cantidad de aire a una presión sobre la atmosférica minimizando el inconveniente natural, el estudio está centrado en motores atmosféricos lo quiere decir que a menor cantidad de oxígeno en la mezcla aire combustible por efectos de la altura le tomará más tiempo en comparación que si se mide a nivel de mar, mientras baja la presión atmosférica va a ir variando de acuerdo a la cantidad de metros sobre el nivel del mar que se encuentre, adicional a ello la mezcla estequiometria de igual forma cambia produciendo diferentes emisiones que son el objeto del presente estudio. Para determinar las diferentes instancias de emisiones a las diferentes alturas se realiza un estudio comparativo deductivo que permite tener datos de laboratorio con pruebas de campo que reflejen los distintos comportamientos del motor, generando resultados que serán comparados y tabulados para determinar una variable que puede dar un margen de error por efectos de altura que la norma actual INEN 2202 no está tomando en consideración, el presente estudio da los lineamientos iniciales para poder hacer una corrección o poder aplicar una rango mayor de permisibilidad de opacidad de acuerdo a la norma actual, los datos son claros y contundentes para poder aplicar una corrección a los 2850 msnm en la ciudad de Quito donde nace la necesidad del estudio por la gran condición de altura. El estudio tiene una localización variable que va desde el nivel del mar donde se plantean la normas y va subiendo tomando medidas en el motor donde las condiciones mecánicas y físicas del mismo no cambia y la única variable es la altitud y el resultado de este cambio geográfico genera diferencia de emisiones.

Palabras Claves: Norma, emisiones, motor, oxígeno, altura, pruebas

ABSTRACTO

En un proceso de combustión existen tres factores importantes, una fuente de calor (fuente de color), encargada de iniciar el proceso de combustión, el combustible del que obtenemos energía o calor (poder calórico del combustible) y el oxígeno tan importante como los otros dos elementos, la relación del oxígeno con el combustible permite que se produzca el proceso de combustión y las características en las que se encuentra en la naturaleza, La combustión tendrá ciertas variantes en el estudio en función de las diferentes altitudes a las que se encuentre el motor atmosférico que recibe oxígeno del aire a la presión según el lugar y su condición geográfica. La mayor altitud a la que se encuentra el motor sufre una caída de partículas de oxígeno debido a la pérdida de presión, una de las formas de solucionar este fenómeno natural es colocar motores turboalimentados que permitan una mayor cantidad de aire a una presión sobre la atmósfera minimizando las molestias naturales, el estudio se centra en los motores atmosféricos, lo que significa que cuanto menor sea la cantidad de oxígeno en la mezcla aire-combustible debido a los efectos de la altitud, tomará más tiempo en comparación con si se mide a nivel del mar, mientras que la presión atmosférica variará según la cantidad de metros sobre el nivel del mar, además de esto, la mezcla estequiométrica cambia de la misma manera, produciendo diferentes emisiones que son objeto de este estudio. Para determinar las diferentes instancias de emisiones a diferentes alturas, se realiza un estudio deductivo comparativo que permite obtener datos de laboratorio con pruebas de campo que reflejen los diferentes comportamientos del motor, generando resultados que serán comparados y tabulados para determinar una variable que pueda dar un margen de error por efectos de altura que la norma INEN 2202 vigente no está tomando en consideración, este estudio da los lineamientos iniciales para poder realizar una corrección o poder aplicar un mayor rango de permeabilidad de opacidad de acuerdo a la norma vigente, los datos son claros y concluyentes para poder aplicar una corrección a 2850 msnm en la ciudad de Quito donde surge la necesidad del estudio debido a la condición de altura. El estudio tiene una ubicación variable que va desde el nivel del mar donde se establecen los estándares y va subiendo tomando medidas en el motor donde las condiciones mecánicas y físicas del mismo no cambian y la única variable es la altitud y el resultado de este cambio geográfico. genera una diferencia en las emisiones.

Palabras clave: Estándar, emisiones, motor, oxígeno, altura, ensayos

1. INTRODUCCION

El presente estudio trata de determinar las diferencias que existe con la generación de la opacidad a diferentes alturas, la tierra está cubierta por una capa llamada atmosfera la misma que de acuerdo a la posición geográfica se ve afectada por la presión atmosférica lo que hace que el particulado por unidad de volumen vaya disminuyendo, el estudio determina como el esta baja de oxigeno incide en las emisiones y en este caso particular a opacidad de los motores diésel atmosféricos.

Para poder determinar las diferentes características se realizan pruebas de laboratorio a nivel del mar (cero msnm) y cada 500 msnm hasta llegar a la altura de Quito que está a 2850 msnm, en la ciudad se tiene que aprobar anualmente la revisión vehicular que regida por la norma INEN 2202 que permite una opacidad del 50%, pero la norma es tomada a nivel de mar y se la aplica sin hacer ninguna corrección por altura, el estudio demuestra que se debe realizar una corrección a la norma por la altura, es estudia aplica una metodología comparativa deductiva que permite evidenciar los cambios que se presentan con respecto a los diferentes puntos geográficos donde se ve afectado por la presión atmosférica y su incidencia con la opacidad.

El globo terráqueo presenta muchas irregularidades en toda su geografía, producto de la misma los fenómenos físicos se caracterizan o focalizan alguno de ellos por la zona en la que se encuentran, así podemos ejemplarizar la zona costera como de clima cálido húmedo, vegetación abundante en frutales poca altitud con referencia al nivel del mar, por ende buena para la pesca, otra zona es la sierra central, se caracteriza por su altitud como clima frio,

su vegetación característica por cereales, papas entre frutas entre otras, y la zona amazónica de clima cálido húmedo, de vegetación abundante con fuertes y constantes precipitaciones del altura media, zona de reservas minerales y petrolera.

Para efectos del estudio la densidad del aire no es la misma a nivel del mar y va cambiando con respecto a la altura, mientras más altura menos presión atmosférica, factor que afecta de gran manera a los motores de combustión interna, ya que, “por cada mil metros de altitud el rendimiento del vehículo se ve afectado en un 10% menos de sus capacidades”, los vehículos ven afectadas sus capacidades hasta en un 28.5% en comparación a su rendimiento que podría generar al nivel del mar (Cevallos, 2015).

Factor producido por la presión del aire y la cantidad de oxígeno presente en la zona, y que en el caso de los motores diésel afecta en la opacidad de las emisiones, es por esto que, se realizará un estudio acerca del rendimiento de estos motores y el nivel de contaminación medido en opacidad, emitido por los mismos, además de conocer que tanto afecta la altura a la opacidad en comparación a pruebas realizadas con los mismos motores pero a nivel del mar, porque a pesar de que los motores diésel turboalimentados pueden verse afectados en menor nivel, debido a que la cantidad de aire es eyectada directamente a presión en las cámaras de combustión, otros aspectos pueden verse afectados, en este caso la opacidad de las emisiones producidas por dichos motores.

Existe un tiempo de retraso, que se lo define como el tiempo que transcurre desde que se inicia la inyección hasta que se inicia la combustión, esto es mayor con la altitud

para motores de aspiración natural, que para los turboalimentados que apenas varía, por esta razón los motores turboalimentados no se ven afectados en dicho factor, ya que, es favorecido por el incremento del giro de la turbina y esto compensa en parte la disminución de la presión de aire y cantidad de oxígeno en el motor.

2. MARCO TEÓRICO

Existen algunos factores que afectan la opacidad de los motores diésel, los cuales son, la disminución de la presión y temperatura atmosférica, esta afecta a la densidad del aire y su composición, por lo que estos motores de combustión interna alternativos cuentan con sistemas de alimentación volumétricos y provocan una disminución de la presión en el cilindro en el ciclo termodinámico, por lo tanto, al rendimiento indicado.

Entre las variables que afectan el funcionamiento y emisiones de un motor diésel. Desantes et al., (1986) encontraron que la disponibilidad y temperatura del oxígeno son los parámetros que más influyen en la formación de óxido nítrico. Ambos factores son directamente afectados por la altitud con lo que podemos explicar las variaciones en las emisiones de NOx. Es por esto, que se han desarrollado diferentes sistemas para compensar los factores que influyen en el desempeño del motor, como la turbo alimentación de compuerta o geometría variable y algunos métodos de corrección por presión barométrica.

La humedad y la temperatura ambiente también influye sobre su funcionamiento y emisiones, Rakopoulos, T. (1991) afirma que el incremento de la humedad relativa disminuía la concentración de NO y que la opacidad del humo aumenta

simultáneamente con el aumento de temperatura y la humedad absoluta. Es por lo que podemos decir que las mejores prestaciones se pueden encontrar en ambientes fríos y secos, y las peores en ambientes cálidos y húmedos.

Entre los efectos que genera la altitud sobre el funcionamiento de un motor, específicamente sobre el proceso de combustión tenemos dos partes a analizar, el proceso de mezcla y la formación de contaminantes. La relación molar de oxígeno reduce en relación con la altitud lo que genera una modificación en la mezcla estequiométrica de la combustión, ya que, se puede tener un desajuste en la dosificación.

Los motores turboalimentados cuentan, ya con sistemas de preadmisión y turbinas de geometría variable lo que les hace posible controlar así los factores importantes para una buena combustión y alcanzar una recuperación completa de la potencia (Human, D, 1990).

Las características y los parámetros en los que se rige la revisión para la opacidad en los vehículos Diesel son las siguientes.

La Norma técnica ISO 11614 internacional refiere a las especificaciones y requisitos generales de equipos para la medición de la opacidad y la determinación del coeficiente de absorción luminosa de los gases de escape en los motores ciclo Diésel.

Los medidores de humo y opacidad de humo son instrumentos que miden las propiedades ópticas de los gases de escape diésel. Estos instrumentos han sido diseñados para cuantificar la emisión de humo negro visible utilizando fenómenos físicos tales como la extinción de un haz de luz por dispersión y absorción.

PARAMTRO	REQUERIMIENTO	
Características Generales	Capacidad de medición y reporte automático de la opacidad del humo emitido por el tubo de escape de vehículos equipados con motores de ciclo Diésel. Cumplirán con la Norma Técnica ISO 11614, lo que será demostrado mediante certificación de fabrica	
Especificaciones adicionales	Capacidad de medición de la velocidad de giro del motor en rpm y temperatura de aceite, para cualquier tipo de combustible y diámetro de cañería.	
Mediciones y resoluciones	0 - 100% de opacidad y	1% de resolución
	Factor K de 0 - 9,999 (\approx) m^{-1}	0,01 m^{-1}
Condiciones ambientales de funcionamiento	Temperatura	5 -10 °C
	Humedad relativa	0 - 90%
	Altitud	Hasta 3000 msnm
	Presión	500 760 mm Hg
Ajustes	Automático, mediante filtros certificados, (material de referencia certificada)	
Sistema de muestreo	La forma de muestra se realiza mediante una sonda flexible, a ser insertada en la parte final del tubo de escape	

Tabla 1. Tabla de la normativa INEN 2349 Normativa de aplicación de los Centros de Revisión y Control Vehicular (CRCV).

En general, los medidores de humo y opacidad son mucho más simples y menos costosos en comparación con la mayoría de los otros instrumentos utilizados para la medición de PM. A menudo se utilizan para evaluar las emisiones de humo en lugares fuera del laboratorio, como talleres de mantenimiento o en el campo, de hecho, la medición de la opacidad del humo es el único método de relativamente bajo costo y ampliamente disponible para medir un parámetro de emisión relacionado con PM en el campo.

Por esta razón, los límites de opacidad se utilizan en la mayoría de las tareas de inspección y mantenimiento (I& M) o programas de inspección técnica periódica (PTI) para motores diésel. Los límites de opacidad del humo también pueden incluirse como límites auxiliares en los nuevos estándares de emisión de motores.

En vista de las demandas de los motores diésel avanzados de bajas emisiones, se pueden identificar las siguientes áreas de preocupación en la tecnología convencional de medición de la opacidad del humo:

- **Resolución insuficiente:** Los niveles de humo en motores diésel sin humo y de baja emisión (por ejemplo, Euro IV) están cerca de la resolución de un medidor de opacidad convencional. La resolución, la estabilidad y el ruido deben mejorarse para permitir mediciones de opacidad en motores diésel avanzados.
- **Sensibilidad cruzada al dióxido de nitrógeno:** los dispositivos de postratamiento de gases de escape catalíticos, como los catalizadores de oxidación o los filtros de partículas, pueden aumentar el porcentaje de NO₂ en el NO_x total desde menos del 10 % hasta un 40 % y más.

El dióxido de nitrógeno absorbe la luz verde, que se utiliza en los medidores de opacidad convencionales. Los medidores de opacidad leen entre 0,00016 y 0,00024 m^{-1} por ppm de NO₂, dependiendo del ancho de banda del sensor [Jones 2002]. Una concentración de NO₂ de 300 ppm en un motor moderno, lo que no es una suposición poco realista, causaría un 0,06 m^{-1} lectura de opacidad, que equivale al 40% del nivel de aprobación Euro III EEV, destinado a las emisiones de hollín. Para motores equipados con filtros de partículas catalíticos, casi toda la señal de opacidad será causada por dióxido de nitrógeno.

- **Insensibilidad a las partículas pequeñas:** una parte sustancial de las partículas diésel tienen un diámetro inferior a 200 nm. Las partículas de 200 nm de diámetro o más bloquean la luz verde en proporción a su área de superficie de sección

transversal. Sin embargo, las partículas de 50 nm de diámetro bloquean solo alrededor del 15% de su área superficial [Jones 2002].

Esto significa que las lecturas de opacidad dependen del tamaño de las partículas y se subestimarán si se miden partículas más pequeñas.

El biodiesel, al ser producido a partir de materias primas renovables, es una alternativa más sostenible a los combustibles fósiles, presentando un menor impacto ambiental. Uno de los métodos más utilizados para obtener biodiesel es la transesterificación con alcoholes de cadena corta, como metanol, etanol, propanol, en presencia de una catálisis ácida, básica o enzimática.

Se ha utilizado en motores diésel como combustible alternativo como mezclas diésel/biodiésel sin necesidad de modificaciones a la tecnología actual. La aplicación de biodiésel en motores de combustión interna reduce entre un 40% y un 65% la emisión de gases de efecto invernadero GEI, mejora la eficiencia térmica, aumenta la vida útil del motor, no es tóxico y es seguro de transportar por su punto de inflamación relativamente alto.

En cuanto a las emisiones contaminantes generadas por los motores diésel, los resultados obtenidos por Rosha et al. [9] muestran una reducción de 47.8% HC, 41.0% CO y 35.7% en opacidad con el uso de biodiesel de palma B20 blend, y en el estudio realizado por Soto et al. [10] al probar con la mezcla de biodiesel B20 se obtuvieron reducciones de hasta un 8,9% en las emisiones de hollín.

Sin embargo, con relación al desempeño mecánico, en la investigación

realizada por Ariani et al. [11], los resultados reflejan una tendencia a disminuir los valores de torque y potencia al aplicar mezclas de biodiesel al 5%, 10%, 15% y 20%, pero en valores no significativos. (César Morales Bayetero, 2022)

Los diferentes estudios definen que en efecto las diferencias de altura y presión atmosférica afectan a los motores en su respuesta con la emisión de la opacidad.

La metodología utilizada para el estudio permite identificar las necesidades de hacer una corrección a la norma 2202 por efectos de la altura, una investigación experimental a cada 500 metros de altura evidenciará que la falta de oxígeno que sufren los motores por este fenómeno físico genera consecuencias en las emisiones.

3. MATERIALES.

3.1 Motor diésel mono cilíndrico.

Es un motor de marca Cooled Diesel Engine de 211 cc con inyección mecánica de aspiración natural (motor atmosférico), su funcionamiento cumple con las expectativas con las que fue construido, el equipo fue seleccionado por su fácil transportación, es un motor mecánico que sin la ayuda de la electrónica pueda corregir algunas condiciones geográficas, es un motor que permite hacer las pruebas sin dificultad para poder tener datos apropiados y certeros de los distintos lugares geográficos.

FICHA TECNICA MOTOR

Marca	Cooled Diesel Engine
Modelo	KM170F
Combustible	Diesel
Sistema de inyección	Inyección Directa
Cilindraje	0,211 L
Potencia máxima	3,1KW
Torque máximo	2,8KW
Velocidad del motor	3000rpm

Tabla #1 Ficha técnica Motor KM170F, Fuente Cooled Diesel Engine.



Figura #1, Motor mono cilíndrico Diésel (Cooled Diesel Engine), Fuente Autores.

El motor mono cilíndrico de inyección directa mecánica, con una potencia de ---- que se lo utiliza como generador de luz por medio de un alternador acoplado a él, para efectos de pruebas el motor ya no tiene el grupo electrógeno, las pruebas que se solicitan para la medición de la opacidad son sin carga.

3.2 Opacímetro.

El opacímetro es un instrumento que permite medir un espectro de luz que cruza por un tubo, el combustible diésel conocido por generar humo negro, es por ello que la norma tiene un rango de permisibilidad, cuando el motor está mal calibrado o por mal combustible genera un exceso de humo negro que se trata de evitar por efectos de contaminación, es por ello que el instrumento es indispensable y tiene que cumplir varias normas internacionales como UNE82501bar 90, bar 97, U.S, EPA, ASM, OIML clase 1 y O, ISO 3930,



Figura #2. Opacímetro de edición, Fuente Autores.

El opacímetro es la herramienta indispensable para la toma de datos, permite identificar las variaciones en la opacidad que se producen por la incidencia de la altura y el cambio de presión atmosférica.

3.3 Altímetro

El altímetro es un instrumento de medición que identifica la diferencia altura con respecto a nivel del mar o cero, permite identificar con precisión la diferencia de altura para poder realizar las pruebas pertinentes a cada 500 m de ascenso sobre el nivel del mar. El instrumento debe estar calibrado para poder hacer las pruebas en campo de acuerdo a las instrucciones del manual, pese a que no hay una norma que delimite el funcionamiento del equipo se puede realizar la pruebas siempre y cuando el equipo entregue datos certeros.



Figura #3. Altímetro GPS TRACHER, Fuente Autores

3.4 Combustible diésel.

El combustible diésel se lo puede encontrar en cualquier despachador a lo largo y ancho del país, pero para efectos de las pruebas se utiliza un mismo lote de combustible. El combustible ecuatoriano cumple con “Al momento la unidad de Hidrodesulfuradora de Diésel (HDS) de Refinería Esmeraldas produce un Diésel Premium con menos de 50 ppm de azufre. La calidad del Diésel Premium que se distribuye en el país, desde junio de 2021 hasta agosto de 2022, registra en promedio un valor aproximado de 51 partes por millón de azufre (ppm), lo que corresponde a 199 ppm por debajo de lo establecido en la norma NTE INEN 1489, que dispone un máximo de 250 ppm en el estándar del combustible. Además, mantiene una equivalencia al estándar EURO IV, lo que la iguala a los combustibles usados en los países de la región”. Boletín de prensa Quito D.M., 30 de septiembre de 2022.

Se han realizados varios estudios formales e informales donde se demuestra que los combustibles ecuatorianos no cumplen con lo expuesto por la información gubernamental, un análisis comparativo entre los combustibles ecuatoriano versus el colombiano por los Señores Toapanta Luis, Cevallos Alexis en su estudio demuestra que ecuatoriano por la mala calidad generan más contaminantes.

4. RESULTADOS

El estudio permite identificar las diferentes medidas en condiciones diferentes de altura geográfica del país desde nivel de mal hasta la altura de la ciudad de Quito, para las mediciones de opacidad se utilizó un motor mono cilíndrico y las lecturas tomadas bajo las especificaciones de la norma Inen 2202, los parámetros de la revisión técnica vehicular, bajo la norma Innen 11614.

Para asegurar que los datos sean correctos ante de iniciar las mediciones se determinan dos protocolos que están dentro de las normas descritas, el uno tiene que ver con el motor que debe verificarse antes de cada medición: el motor funciona correctamente dentro de los parámetros normales de fabricación (sin fallo alguno), calentar el motor por los menos 15 minutos y que se encuentre entre los parámetros de temperatura normal de funcionamiento, motor encendido, colocar el instrumento de medición en ralentí permitir estabilidad y acelerar hasta 2000 rpm mantenerlo unos segundos, tomar lectura mayor de opacidad, con respecto al segundo protocolo es que el equipo presente las características de calibración, certificados dentro de los tiempo determinados por la norma, adicional a ello el equipo hace una auto calibración y un calentamiento previo.

Los parámetros obtenidos a nivel de la ciudad de Quito a 2872 msnm, con el motor en ralentí y acelerarlo a 2000 RPM la opacidad del motor diésel dio los siguientes resultados.

Aceleración	Altura	PRM	Opacidad	Max Permitido
1	2872 m	2000	21,10%	50%
2	2872 m	2000	21,80%	50%
3	2872 m	2000	20,40%	50%
4	2872 m	2000	21,10%	50%
5	2872 m	2000	21,10%	50%

Tabla# 2. Resultados de opacidad a 2872m de altura sobre el nivel del mar a 2000 RPM, Fuente Autores

La lectura en primer lugar demuestra que el motor está dentro de los parámetros normales y dentro de norma de la RTV, El motor al ser tomada la lectura de opacidad

entrega los resultados de la tabla, la lectura promedio de las cinco mediciones da como resultado un promedio de 21.10% de opacidad, que está dentro de los parámetros aceptables por la RTV. Existe una diferencia entre el 3% al 4% de entre las lecturas de muestras tomadas, adicional a ello existe una diferencia de 1.4 puntos entre la lectura más alta con la más baja, parámetros que determina que las lecturas son correctas.

Resultado de test

Valor opacidad medida	21,10%
Diferencia lecturas opacidad en %	6.42%

Tabla #3. Resultados de opacidad a 2872m de altura sobre el nivel del mar a 2000 RPM, Fuente Autores

Para la toma del resto de lecturas se utiliza la ruta Quito – Esmeraldas por la vía San Miguel de los Bancos, con la ayuda de instrumentos de precisión para la lectura de la opacidad y un altímetro de precisión el desplazamiento se lo hace por carretera para determinar los lugares adecuados de acuerdo a las lecturas que se han estipulado para el estudio, estas medidas son cada 500 metros de altitud para determinar los valores de opacidad.

La segunda lectura se la toma cuando el altímetro estima una altura de 2000 msnm ubicando a unos 15 minutos pasando Calacalí en dirección a Esmeraldas sobre la vía, el altímetro es un instrumento que va terminando la altitud con respecto al nivel del mar razón por la cual cuando se llega a la lectura correcta se realizan las pruebas de laboratorio y de campo a la vez, de laboratorio porque se traslada con los instrumentos necesarios para el análisis de las lecturas.

Aceleración	Altura	PRM	Opacidad	Max Permitido
1	2000 m	2000	19,80%	50%
2	2000 m	2000	20,80%	50%
3	2000 m	2000	20,50%	50%
4	2000 m	2000	19,50%	50%
5	2000 m	2000	20,40%	50%

Tabla#4. Resultados de opacidad a 2000 m. de altura sobre el nivel del mar a 2000 RPM, Fuente Autores

Las lecturas de la segunda prueba dan un resultado de 20.2% de opacidad, con una diferencia entre datos de 6.25% de diferencia entre ellas dentro de 10% que determina la norma, con una diferencia de 1.3 puntos entre los extremos máximos y mínimos de las medidas, se evidencia que existe una pequeña diferencia entre las lecturas tomadas a 2875 msnm, de igual forma el motor está dentro de la norma para la opacidad.

Resultado de test

Valor opacidad medida	20,20%
Diferencia lecturas opacidad en %	6,25%

Tabla #5. Resultados de opacidad a 2872m de altura sobre el nivel del mar a 2000 RPM, Fuente Autores

La medición a 2000 msnm con respecto a la primera tiene una reducción de 4.2% con respecto a la medida inicial tomada a 2875 msnm, reuniendo las mismas características de parámetros de medición y suministro de combustible.

La tercera medición tiene lugar a 1500 msnm en Nanegalito que es un pueblo que está ubicado sobre la vía que lleva a de San miguel de los Banco, esta prueba se la realiza sobre la ruta trazada. Los datos obtenidos en las lecturas se registran en la siguiente tabla de datos.

Aceleración	Altura	PRM	Opacidad	Max Permitido
1	1500 m	2000	18,40%	50%
2	1500 m	2000	17,80%	50%
3	1500 m	2000	18,20%	50%
4	1500 m	2000	18,20%	50%
5	1500 m	2000	18,40%	50%

Tabla #6. Resultados de opacidad a 1500 m. de altura sobre el nivel del mar a 2000 RPM, Fuente Autores

Resultado de test

Valor opacidad medida	18,20%
Diferencia lecturas opacidad en %	3,3%

Tabla #7. Resultados de opacidad a 1500 m. de altura sobre el nivel del mar a 2000 RPM, Fuente Autores

Los resultados de la tercera medición a 1500 msnm nos dan un promedio de lectura 18.20% de opacidad con una diferencia entre lecturas de 3.3% para el promedio dentro de los permitido por las normas.

La diferencia entre el resultado de la tercera lectura con respecto a la segunda hay una reducción de 9.9% en la opacidad, con una diferencia del 0.6 puntos entre ellas, la diferencia con la primera medición realizada a 2875 msnm hay una reducción en el nivel de opacidad de un 14% en la opacidad y de 1.9 puntos entre la primera y tercera lectura.

La cuarta lectura se la realizo a 1000 m de altura sobre la misma ruta de investigación, al llegar a los 1000 metros de altura que se encuentra a dos minutos del poblado de San Miguel de los Bancos, los datos obtenidos se los describe en la tabla.

Hay que hacer una aclaración con respecto a los datos registrados por que es la mayor variación con respecto al cambio en los resultados de las lecturas, luego de estas lecturas los cambios sufridos ya nos son muy relevantes o por lo menos no con la distancia entre si hasta esta lectura.

Aceleración	Altura	PRM	Opacidad	Max Permitido
1	1000 m	2000	17.20%	50%
2	1000 m	2000	15.80%	50%
3	1000 m	2000	16.40%	50%
4	1000 m	2000	16.20%	50%
5	1000 m	2000	16.60%	50%

Tabla #8. Resultados de opacidad a 1000 m. de altura sobre el nivel del mar a 2000 RPM, Fuente Autores

Los datos a 1000 msnm indican una opacidad del 16.44% con una reducción con respecto a la tercera medida de un 9.67% en la opacidad y una diferencia de 3.76 puntos entre lecturas, con ello la diferencia con respecto a la primera lectura es de 22% que es un número significativo.

Resultado de test

Valor opacidad medida	16.44%
Diferencia lecturas opacidad en %	8.2%

Tabla #9. Resultados de opacidad a 1000 m. de altura sobre el nivel del mar a 2000 RPM, Fuente Autores.

A partir de la lectura tomada de 500 msnm los datos no tiene una variación significativa, es por ello que en las pruebas de ruta el estudio hizo una validación con una variación cada 100 msnm pero, con los

resultados fueron los mismos se omitió estas tomas de medidas dejando la propuesta original, los datos obtenidos de las pruebas son:

Aceleración	Altura	PRM	Opacidad	Max Permitido
1	500 m	2000	16.80%	50%
2	500 m	2000	16.10%	50%
3	500 m	2000	15.60%	50%
4	500 m	2000	16.50%	50%
5	500 m	2000	15.60%	50%

Tabla #10. Resultados de opacidad con altura de 500 metros sobre el nivel del mar, Fuente Autores

Los resultados de la prueba de laboratorio evidencian una opacidad del 16.12%, con una variación de hay una variación de 1.2 % entre lecturas dentro del 10% permitido por la norma en el muestreo, la variación de las medidas extremas es de 1.2. Con referencia a la primera medida existe una diferencia de 23.6% de disminución de la opacidad solo por efectos de la altura con una mayor presencia de oxígeno en el aire.

Es evidente que existe una reducción en la diferencia entre medidas iniciales a las tomadas desde los 1000 msnm por la mayor presencia de oxígeno, esto se evidencia por la toma de medidas cada 100 m de diferencia desde los 1000m hasta los 500m, identificando que las diferencias casi no existen, por ello que el grado entre medidas máximas alcanza llega a 0,3.

Resultado de test

Valor opacidad medida	16.12%
Diferencia lecturas opacidad en %	1.2%

Tabla 11, Resultados de la opacidad a 500 msnm, Fuente Autores

La gasolina ecuatoriana a bajas revoluciones provoca menos emisiones en la opacidad.

El test de resultados mostrado en la tabla permite identificar que el motor está dentro de sus parámetros normales de funcionamiento con las mismas condicionantes para las pruebas, pero con una pequeña reducción en su opacidad por efectos de la variación de altura.

La última lectura tabulada presenta en los diferentes rangos de altura una similitud en los datos tomados desde los 500msnm hasta llegar al nivel del mar o cero de altura, se valida la información recopilando datos cada 100 m de diferencia en la altura hasta llegar al nivel de mar, en todas la mediciones realizadas en los 5 puntos casi no existe variación los datos tomados casi que se convierten en una constante, en otras palabras los promedios de las cinco lecturas por cada prueba arrojan diferencia entre 0.02 a 0.1 entre ellas por lo que siguiendo lo estipulado y aclarando que se realizó las tomas para la validación de datos colocados en la tabla, la lecturas obtenidas a nivel del mar y los resultados son los siguientes.

Aceleración	Altura	PRM	Opacidad	Max Permitido
1	0 m	2000	16.40%	50%
2	0 m	2000	15.80%	50%
3	0 m	2000	15.90%	50%
4	0 m	2000	16.30%	50%
5	0 m	2000	16.10%	50%

Tabla 12. Resultados de opacidad con combustible colombiano a 1500 RPM, Fuente Autores.

Los datos obtenidos a nivel de mar dan cuenta como resultado una opacidad promedio de las lecturas de 16.10% que

difiere con la medida a los 500 msnm de 0.1 %, y con una diferencia en porcentaje de 3.05% dentro de lo permitido por la norma.

Haciendo una comparación con la lectura en la ciudad de Quito a 2872 msnm que determino una opacidad del 21.10% tenemos una disminución de la opacidad en porcentaje comparativo entre ellas de 24.1% solo por la diferencia de altura.

Los resultados obtenidos en la prueba están descritos en la siguiente tabla.

Resultado de test	
Valor opacidad medida	16.00%
Diferencia lecturas opacidad en %	3.05%

Tabla #13 Resultado de datos. Fuente Autores

Para el análisis hay que tomar en cuenta la permisibilidad de la norma está tomada a nivel del mar, y que la ciudad de Quito donde se la aplica tiene una altura 2850 metros, y que varía de acuerdo a su topografía, con promedio aproximado que está dentro de los 2750, “La altitud **disminuye notablemente la potencia indicada**, y por tanto la efectiva, desarrollada por un motor de aspiración natural” Inf. tecnol. v.17 n.5 La Serena 2006.

Los motores de combustión interna por el fenómeno de la altura pierden potencia con relación a la proporción de altura, al tener menor cantidad de oxígeno el motor al tratar de entregar la misma energía intenta compensarlo con combustible, o lo que es lo mismo al tener menor oxígeno estamos cambiando la relación mezcla combustible consiguiendo una mayor cantidad de emisiones o en el presente estudio mayor cantidad de opacidad, los datos obtenidos permite proponer que se realicen más

estudios sobre este fenómeno para establecer parámetros de funcionamiento estándares que puedan proponer una norma que ajuste el nivel de opacidad en la altura, y claro no debe ser muy a la ligera como lo hace el RTV sino que debe aplicarse a cada norma que cumple cada motor establecida por los fabricantes y certificados por las entidades dedicadas al efecto como las normas TIER o las EURO,

El estudio arroja un resultado del 24.1% de reducción de la opacidad por

efectos de la altura, debe mencionarse que la altura medida en la ciudad de Quito alcanza 2872 msnm, poniendo en evidencia que se debe hacer una corrección a la norma con respecto a las ciudades altas, si se le suman la mala calidad de combustible las ciudades que se encuentran en la altura casi que están expuestas a un error forzado por las entidades de gobierno que lucran de los fallos de sus usuarios.

Bibliografía

- Cevallos, I. (2015). ¿Por qué los carros en la altura pierden potencia? Recuperado de <https://www.seminuevos.com/blog/por-que-los-carros-en-la-altura-pierden-potencia/>
- Human, D. M., Ullman, T.L. y Baines, T.M., Simulación de los efectos a gran altitud en las emisiones de diésel de alta resistencia. Papel SAE 900883. (1990).
- Rakopoulos, T. (2016). Solidaridad: las tensiones igualitarias de un concepto de puente. *Antropología Social*, 24(2), 142-151. doi: 10.1111/1469-8676.12298
- Chaffin, C.A. y Ullman, T.L., Efectos del aumento de la altitud en las emisiones de los motores diésel de servicio pesado. Papel SAE 940669. (1994).
- Desantes, J.M., Lapuerta, M y Salavert, J.M., Estudio sobre los efectos independientes de las condiciones de funcionamiento de los motores diésel sobre la formación y las emisiones de óxido nítrico mediante simulación esquemática de la combustión. Proc. Instn. Mech. Engrs. Tomo 210. D02894. págs. 71-80. (1996). Fenollosa, C. Aportación a la descripción
- César Morales Bayetero, C. M. (2022). Efecto del uso de aditivos en mezclas de biodiésel sobre el rendimiento y la opacidad de un motor diésel. *Science Direct*, 2-3.
- Chaffin, C. A. y T. L. Ullman. *Efectos del aumento de la altitud en las emisiones de los motores diésel de servicio pesado*. Documento SAE 940669 (1994).
- Conan, J. G. *Refrigeración Industrial*, primera edición, Paraninfo SA., Madrid, España (1990).
- DIN 70020, Ingeniería automotriz, velocidad máxima, aceleración y otros términos, definiciones y pruebas, Deutsches Institut für Normung (1986).

- Graboski, M. S., R. L. McCormick, A. W. y otros 4 autores. Efecto de la *composición del combustible y la altitud en las emisiones reguladas de un motor de gas natural controlado por circuito cerrado y combustión pobre*. Documento SAE 971707 (1997).
- Harari, R. y E. Sher. *El efecto de la presión ambiental en el mapa de rendimiento de un motor SI de dos tiempos*. Documento SAE 930503 (1993).
- Heywood, J. B. *Fundamentos del motor de combustión interna*, primera edición, McGraw-Hill, Nueva York, EE.UU. (1988).
- Humano, D. M., T. L. Ullman y T. M. Baines. *Simulación de los efectos de la altitud en las emisiones de diésel de alta resistencia*. Documento SAE 900883 (1990).
- ISO 3046-1, Motores alternativos de combustión interna. Parte 1: Condiciones de referencia normalizadas, declaraciones de potencia, consumos de combustible y aceite lubricante y métodos de ensayo, EE.UU. (1995).
- ISO 1585. Código de prueba de motores de vehículos de carretera - Net power, EE.UU. (1992).
- Lapuerta, M., O. Armas y J. R. Agudelo. *Estudio del efecto de la altitud sobre las prestaciones de motores de combustión interna*, IV Jornadas Nacionales de Ingeniería Termodinámica, La Rioja, España (2005).
- Lizhong, S., S. Yungang, Y. Wensheng y X. Junding. *Proceso de combustión de motores diesel en regiones con diferentes altitudes*, documento SAE 950857 (1995).
- McCormick, R. L., M. S. Graboski, T. Alleman, A. M. Herring y P. Nelsol. *Emisiones en uso de vehículos pesados alimentados con gas natural*, documento SAE 1999-01-1507 (1999).
- Olin P. M. y P. J. Maloney. *Estimador de presión barométrica para el control y diagnóstico de motores de producción*. Documento SAE 1999-01-0206 (1999).
- SAE J816b, Manual SAE. Código de prueba de motor de práctica recomendada, EE. UU. (1979).
- SAE J1349, Código de prueba de potencia del motor -encendido por chispa y encendido por compresión- clasificación de potencia neta, EE. UU. (1995).
- Soares, S. M. C. y J. R. Sodré. *Efectos de la temperatura y la presión atmosférica en el rendimiento de un vehículo*. Proc. Instn. Ing. Mecánico, 216(D) D08201. (2002).
- Sodré, J. R. y S. M. C. Soares. *Comparación de los factores de corrección de potencia del motor para condiciones atmosféricas variables*, J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng., 25(3), 279-285 (2003).
- Varela, E. Apuntes de motores alternativos. Sección de Publicaciones de la E.T.S.I. Aeronáuticos de la Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, (2001).

Wayne, R. *Chemistry of Atmospheres*, tercera edición, Oxford University Press, Inglaterra (2000).

Xiaoping, B., Z. Gengyun y Z. Xiaojing. *Predicción del rendimiento del motor diésel turboalimentado del vehículo en altitud*, documento SAE 961826 (1996)

ANEXOS

Simulación de los efectos de la gran altitud sobre las emisiones de diésel de vehículos pesados 900883

Las emisiones de escape de los motores diésel de servicio pesado que funcionan a gran altitud son motivo de preocupación. La EPA y el Departamento de Salud de Colorado patrocinaron este proyecto para caracterizar las emisiones reguladas y seleccionadas no reguladas de un motor Caterpillar 3208 de aspiración natural y un motor diésel Cummins NTCC-350 turboalimentado tanto en condiciones de baja altitud como en condiciones simuladas de actitud alta (≈ 6000 pies). Las pruebas de emisiones se realizaron en ciclos transitorios del procedimiento de prueba federal de servicio pesado (HD-FTP) con arranque en frío y en caliente, así como en modos de estado estable seleccionados. Además, el motor turboalimentado funcionaba con sincronización de inyección de combustible retardada mecánicamente variable y (fija) para representar condiciones "normales" y de "mal funcionamiento", respectivamente.

La operación a gran altitud generalmente redujo las emisiones de NO_x aproximadamente un 10 por ciento para ambos motores. Las emisiones promedio compuestas de HD-FTP de HC, CO, partículas y aldehídos medidas a gran altitud para el motor de aspiración natural fueron de 2 a 4 veces los niveles observados en condiciones de baja altitud. Los mismos componentes de emisión del motor turboalimentado a gran altitud con sincronización "normal" eran de 1,2 a 2 veces los niveles de baja altitud, pero eran de 2 a 4 veces los niveles de baja altitud con sincronización de "mal funcionamiento".

Efectos del aumento de la altitud en las emisiones de los motores diésel de servicio pesado 940669

La preocupación por las emisiones de los motores diésel de servicio pesado a grandes altitudes impulsó una investigación sobre los efectos del aumento de la altitud sobre las emisiones de gases y partículas. En nombre de la Asociación de Fabricantes de Motores, se examinaron las emisiones de un Detroit Diesel Corporation Serie 60 en condiciones de prueba locales (barómetro 98,9 kPa) y dos altitudes simuladas, Denver (82,6 kPa) y Ciudad de México (77,9 kPa) utilizando una simulación de altitud especial. CVS.

La salida de par transitorio y el par en estado estable a plena carga, para este motor turboalimentado con posenfriamiento, disminuyeron ligeramente al aumentar la altitud. Aunque el DDC Serie 60 compensa la variación del barómetro, las emisiones compuestas transitorias de HC, CO, CO_2 , humo y partículas en general aumentaron con el aumento. altitud tanto para operación transitoria como en estado estable. No se observaron cambios significativos en las emisiones compuestas transitorias de NO_x con la altitud durante las pruebas transitorias, pero NO_x las emisiones disminuyeron ligeramente al aumentar la altitud para el funcionamiento en estado estable. La opacidad máxima del humo determinada en el procedimiento de prueba de humo instantáneo aumentó aproximadamente un 80 por ciento cuando la presión barométrica aparente se redujo de 98,9 kPa a 77,9 kPa.

Los motores DIESEL DE TRABAJO PESADO contribuyen a la contaminación del aire ambiente en lugares de gran altitud como Denver y Ciudad de México. La Asociación de Fabricantes de Motores (EMA) patrocinó este estudio en un esfuerzo para examinar los efectos de la altitud sobre las emisiones. El programa implicó la caracterización de las emisiones de motores diésel de servicio pesado a alta y baja altitud utilizando un muestreador de volumen constante (CVS) de simulación de altitud especial en “SwRI (98,9 kPa)”, “Denver (82,6 kPa)” y “Ciudad de México (77,9 kPa) presiones barométricas aparentes. Se midieron las emisiones reguladas de gases y partículas en pruebas transitorias de arranque en frío y en caliente, así como en funcionamiento en estado estable. (1,2) * Las emisiones de humo se midieron tanto en el FTP para el humo como en el procedimiento de prueba de humo instantáneo. (3)

Este artículo describe el CVS de simulación de gran altitud, el motor, los procedimientos de prueba y los resultados de las emisiones.

El control de las emisiones transitorias de los motores diésel turboalimentados es un objetivo importante para los fabricantes de automóviles, ya que los motores de nueva producción deben cumplir los estrictos criterios relativos a los niveles de emisiones de escape dictados por la certificación de ciclos transitorios legislada. En el estudio actual, se realizan pruebas experimentales en un motor diésel turboalimentado de automóvil para investigar el mecanismo de formación de emisiones de óxido nítrico, humo y ruido de combustión en diversos programas de aceleración experimentados durante las condiciones de conducción diarias. Para ello, se creó un banco de pruebas totalmente instrumentado para capturar el desarrollo de variables clave del motor y del turbocompresor durante los eventos transitorios. Se proporcionan diagramas analíticos para explicar el comportamiento del desarrollo de emisiones en conjunto con la respuesta del turbocompresor y del regulador/bomba de combustible. Se descubrió que el retraso del turbocompresor era la causa principal de los picos de emisiones durante todos los casos de prueba examinados, y la calibración del motor desempeñaba un papel vital. El análisis se amplió con una aproximación casi estacionaria de las emisiones transitorias utilizando mapas de estado estacionario, para resaltar el efecto del funcionamiento dinámico del motor sobre los contaminantes y las emisiones de ruido de combustión.

En este estudio se pretende evaluar el desempeño mecánico y el impacto ambiental de un motor diesel operando con diesel convencional, mezclas diesel/biodiesel (B5) y aditivo (B5A) con el objetivo de analizar el efecto del uso de aditivos en mezclas de biodiesel sobre par, potencia y opacidad. Para la investigación se realizan pruebas mecánicas y ambientales utilizando equipos de diagnóstico automotriz actualizados y calibrados con la aplicación de cada combustible en dos vehículos a 2220 msnm, y finalmente se presentan los resultados a través de un software de análisis estadístico. Los resultados obtenidos muestran que la mejor mezcla de biodiésel es la B5A, con la que se obtiene una reducción no significativa del 0,4% del par y del 0,26% de la potencia, además de una disminución del 58% de la opacidad respecto a los valores obtenidos con el diésel convencional. . Las propiedades del aditivo permiten reducir los inconvenientes que presenta el biodiesel sobre las prestaciones mecánicas del vehículo, aumentando el valor de potencia en un 1,67% y el par en un 1,26% con una reducción adicional del 20,2% en los valores de opacidad,

respecto a los obtenidos con la mezcla B5. Con los resultados obtenidos se concluye que los efectos catalíticos orgánico-metálicos del aditivo permiten obtener un proceso de combustión más completo y eficiente, aumentando el rendimiento del motor y reduciendo la cantidad de emisiones de gases contaminantes.

La globalización del mercado requiere el desarrollo de motores diésel de servicio pesado que puedan funcionar a altitudes de hasta 5.000 m sin un deterioro significativo del rendimiento. Pero el escenario actual es que los estudios existentes sobre los efectos de la gran altitud aún no son suficientes ni detallados para tomar medidas efectivas. Este estudio aplicó un motor diésel de inyección directa de un solo cilindro con presión de refuerzo simulada para investigar la degradación del rendimiento a gran altitud, con el objetivo de agregar más conocimiento a la literatura. Un motor de investigación de este tipo se llevó a cabo a velocidad y estrategia de inyección constantes, pero en diferentes condiciones ambientales, desde el nivel del mar hasta 5000 m de altitud. Los resultados indicaron que los efectos de la altitud sobre la combustión y el rendimiento del motor se pueden resumir en dos aspectos. Primero viene el retraso prolongado del encendido a gran altitud, lo que aumentaría la tasa de aumento de presión hasta un punto que puede exceder el límite máximo permitido y, por lo tanto, acortaría la vida útil del motor. La otra desventaja del funcionamiento a gran altitud es la reducción del exceso de aire y la densidad del gas dentro del cilindro. Una peor formación de pulverización y preparación de la mezcla, junto con una oxidación insuficiente y tardía, darían como resultado una reducción de la eficiencia del motor, un aumento de las emisiones y una pérdida de potencia. Los deterioros en la combustión y el rendimiento eran notables cuando el motor funcionaba a más de 4.000 m de altitud. Todos estos hallazgos respaldan la necesidad de realizar más investigaciones fundamentales sobre las actividades dentro de los cilindros de los motores diésel que funcionan en las regiones de meseta.

Comparación de los factores de corrección de la potencia del motor para condiciones atmosféricas variables En este trabajo se evalúan los métodos propuestos para corregir la potencia del motor en función de las condiciones atmosféricas. El análisis se realizó a través de experimentos realizados en un vehículo en carretera, bajo diferentes condiciones de temperatura, presión y humedad del aire. El vehículo tenía un motor de gasolina de cuatro cilindros, con sistema de inyección de combustible multipunto, longitud variable del tubo de admisión y posición variable del árbol de levas de la válvula de admisión. El vehículo se probó a nivel del mar y a 827 m sobre el nivel del mar, correspondientes a presiones atmosféricas entre 1027 y 926 mbar. La temperatura del aire varió de 22,8 a 33,8 °C en los lugares de ensayo. El parámetro de rendimiento medido en las pruebas fue el tiempo de aceleración del vehículo. Se registraron los tiempos de aceleración de 0 a 400 m, de 0 a 1000 m, de 40 a 100 km/h y de 80 a 120 km/h, partiendo de una velocidad inicial del vehículo de 40 km/h. La curva de potencia del motor obtenida en laboratorio en condiciones ambientales estándar se corrigió a las condiciones de los ensayos en carretera mediante los factores de corrección propuestos por los métodos evaluados, y se calcularon los tiempos de aceleración correspondientes y se compararon con las mediciones de los ensayos en carretera. Los métodos evaluados para la corrección de potencia fueron los siguientes: DIN 70020, SAE J 1349, JIS D 1001 e ISO 1585. El método SAE J 1349 proporcionó el mejor enfoque entre los tiempos de aceleración experimentales y calculados. Palabras clave: Motor de combustión interna, tiempo de aceleración, presión atmosférica, temperatura, potencia

Introducción Se sabe que las condiciones

atmosféricas afectan el rendimiento de los motores de combustión interna. Se puede observar un rendimiento del motor diferente del especificado por el fabricante cuando el motor funciona en condiciones atmosféricas diferentes de aquellas en las que el fabricante recopiló los datos del motor. La influencia de las condiciones atmosféricas en el rendimiento de un motor se puede observar especialmente a través de variaciones en el tiempo de aceleración del vehículo y en el consumo de combustible. Se dispone de factores de corrección para predecir la potencia desarrollada por el motor en condiciones ambientales distintas a partir de la curva de potencia del motor obtenida en pruebas de laboratorio en condiciones estándar. Sin embargo, los numerosos factores de corrección propuestos a menudo conducen a resultados diferentes para una misma condición atmosférica considerada. Estos resultados no uniformes de los factores de corrección motivan esta investigación sobre cuál se predice mejor el rendimiento del motor en la carretera. Muchos trabajos que se dedican a verificar la influencia de los parámetros atmosféricos en el rendimiento de un motor se refieren a aplicaciones aeronáuticas. En esas situaciones, las grandes variaciones de altitud influyen en la potencia del motor, debido a las variaciones en la temperatura, la presión y la humedad del aire. Los trabajos dedicados a la industria automotriz suelen describir experimentos en un banco de dinamómetros, donde cada parámetro atmosférico varía uno por turno. Esta técnica conduce a una mejor comprensión de la influencia de un parámetro individual, pero no proporciona información sobre la variación simultánea de los parámetros atmosféricos como en condiciones reales en la carretera. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es comparar los resultados de diferentes métodos propuestos para corregir la potencia desarrollada por el motor bajo condiciones atmosféricas variables. Los experimentos se llevaron a cabo con un vehículo en la carretera bajo diferentes condiciones de presión, temperatura y humedad, trabajo aceptado en junio de 2003. Editor Técnico: Atila P. Silva Freire. donde se monitoreó el rendimiento del motor a través de mediciones del tiempo de aceleración del vehículo. Los factores de corrección se utilizaron para corregir la curva de potencia del motor disponible desde las pruebas de laboratorio en una condición ambiental estándar hasta las condiciones de las pruebas en carretera. El tiempo de aceleración calculado a partir de la potencia corregida se comparó con el tiempo de aceleración del vehículo medido en carretera. Los factores de corrección evaluados son los propuestos a partir de las normas DIN 70020 (DIN, 1986), SAE J 1349 (SAE, 1995), JIS D 1001 (JIS, 1993) e ISO 1585 (ISO, 1992; ABNT, 1996). Nomenclatura a = aceleración del vehículo (m/s^2) A_{fv} = superficie frontal del vehículo (m^2) $1/2 b$, b = coeficientes definidos por las Ecs. (13) y (14) (adimensional) C_r = coeficiente de resistencia a la rodadura (adimensional) C_x = coeficiente de resistencia aerodinámica (adimensional) $1/4 CF \dots CF$ = factores de corrección definidos en las Ecs. (1) a (4) (adimensional) d = posición del vehículo (m) g = aceleración de caída libre (m/s^2) $e I$ = momento de inercia del motor ($N.m^2$) $w I$ = momento de inercia de la rueda ($N.m^2$) K_r = coeficiente de rodadura (adimensional) m_v = masa del vehículo (kg) M = peso molecular de la mezcla atmosférica de aire y vapor de agua ($kg/kmol$) N = velocidad de rotación del motor (rpm/s) p = presión atmosférica (bar) p_{bt} = presión de los neumáticos traseros (bar) p_{ft} = presión de los neumáticos delanteros (bar) v_p = presión parcial de vapor de agua (bar) Comparación de los factores de corrección de potencia del motor para ... 280 / Vol. XXV, N° 3, julio-septiembre de 2003 ABCM P = potencia de salida (W) P_a = potencia disponible para acelerar el vehículo (W) P_d = potencia para superar la resistencia aerodinámica (W) P_e = potencia de salida del motor (W) P_r = potencia para superar la resistencia a la rodadura (W) P_{rt} = potencia de carga en carretera (W) d

r = relación de transmisión diferencial (adimensional) g r = relación de transmisión intermedia (adimensional) R = constante de gas universal (=8314 J/kmol. K) Ra = - fuerza de arrastre o resistencia aerodinámica (N) Rt = radio del neumático (m) t = tiempo (s) T = temperatura del aire ambiente (K) v = velocidad del vehículo (m/s) Wbs = carga del eje trasero (N) Wfs = carga del eje delantero (N) Wv = peso total del vehículo (N) Letras griegas dt = intervalo de tiempo (s) f = humedad relativa del aire (adimensional) r = densidad del aire (kg/m³) Subíndices 0 = condición de referencia i = inicial f = final

Estudio bibliográfico Las presiones atmosféricas más altas aumentan la densidad del aire y, Por lo tanto, aumente la carga de aire de admisión al motor. Una carga de admisión más alta mejora la eficiencia volumétrica del motor y se entrega más potencia (Pulkrabek, 1997; Heywood, 1988; Giacosa, 1986). A partir de un extenso trabajo de laboratorio en un motor de gasolina, Nakajima et al. (1969) concluyeron que el par de frenado y el consumo específico de combustible varían directamente proporcionales a la presión atmosférica. Se ha comprobado que la temperatura ambiente afecta a la velocidad de la llama, a la velocidad de reacción de la combustión, a la uniformidad de la mezcla de combustible y aire, a la eficiencia volumétrica y a la tasa de transferencia de calor a través de las paredes del cilindro (Pulkrabek, 1997). Las temperaturas más altas del aire de admisión aumentan la ocurrencia de golpes del motor y disminuyen la eficiencia volumétrica (Heywood, 1988). Las temperaturas más altas del aire de admisión también pueden contribuir a la evaporación estratificada de los componentes del combustible en la cámara. Cada componente del combustible se evapora a una temperatura específica, lo que provoca variaciones de combustión de un ciclo a otro (Giacosa, 1986). Por otro lado, para temperaturas más bajas, solo se vaporiza una pequeña parte del combustible inyectado, lo que provoca una falta de homogeneidad. Como resultado, se observan velocidades de llama más bajas, mayor mezcla no quemada, mayores emisiones de hidrocarburos y monóxido de carbono y pérdida de potencia (Pulkrabek, 1997; Heywood, 1988; Giacosa, 1986). La mezcla de admisión precalentada a baja velocidad de rotación mejora la combustión. A altas velocidades de rotación del motor, las temperaturas más altas de la mezcla de admisión disminuyen la eficiencia volumétrica del motor (Chiu y Horng, 1992). Nakajima et al. (1969) encontraron que el par motor del freno, el consumo específico de combustible y la eficiencia volumétrica varían inversamente proporcionales a la raíz cuadrada de la temperatura del aire de succión. La humedad del aire influye en el rendimiento de un motor, aunque no es comparable a la influencia de la presión y la temperatura (Redsell et al., 1993). La alta humedad del aire disminuye la eficiencia térmica y, por lo tanto, reduce la presión efectiva media del motor (Taylor, 1992). Además, el aumento de la humedad del aire disminuye la velocidad de la llama, ralentizando la combustión (Giacosa, 1986). La alta humedad del aire es beneficiosa para el motor a altas temperaturas de los cilindros, ya que evita la aparición de golpes por absorción de calor durante el proceso de disociación de las moléculas de agua (Giacosa, 1986). La presencia de agua en el aire de admisión también puede reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono (Tsao y Miller, 1984). Los datos sobre la influencia de la presión atmosférica, la temperatura y la humedad en el tiempo de aceleración de un vehículo fueron obtenidos por Soares y Sodré (2002). Los autores llevaron a cabo pruebas en carretera en diferentes condiciones atmosféricas y han demostrado que la presión atmosférica tiene una mayor influencia en el tiempo de aceleración que la temperatura del aire. Los resultados de las pruebas en carretera realizadas por los autores se utilizan en este trabajo para evaluar los factores de corrección de potencia, como se describe en las siguientes secciones. Para

correlacionar el rendimiento del motor medido en las pruebas de dinamómetro con el rendimiento del motor en diferentes condiciones ambientales, instituciones como DIN (Deutsches Institut für Normung), SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices), ISO (Organización Internacional de Normalización), JIS (Norma Industrial Japonesa) y ABNT (Asociación Brasileña de Normas Técnicas) proponen factores de corrección para la entrega de potencia del motor. Estos factores de corrección se pueden utilizar para estimar los principales parámetros de rendimiento, como la potencia, el par, la presión efectiva media y el tiempo de aceleración, a partir de los datos de laboratorio disponibles para diferentes condiciones atmosféricas. Experimentos Equipos e instrumentación El vehículo utilizado en las pruebas estaba equipado con un motor de gasolina de cuatro cilindros, con sistema de inyección de combustible multipunto, tubo de admisión de longitud variable y posición variable del árbol de levas de la válvula de admisión. La temperatura ambiente se midió mediante un termopar tipo J, ubicado sobre el techo del vehículo. La temperatura del aire de admisión se controló a través de tres termopares tipo K instalados antes del filtro de aire, después del filtro de aire y junto a la válvula de mariposa. Se instalaron otros termopares tipo K en el sistema de refrigeración, cerca de la culata, en el refrigerante, en la entrada y salida del radiador, en el sistema de combustible, en la posición más cercana a los inyectores y en la caja de aceite. Se instaló un transductor de presión en el sistema de admisión de aire. Durante las pruebas se monitorizaron los siguientes parámetros de control del motor: caudal másico de aire de admisión, intervalo de tiempo de inyección de combustible, tiempo de encendido, retardo de encendido, posición de la válvula de mariposa, relación de equivalencia aire-combustible, presión de aire de admisión y velocidad del vehículo. Se utilizó un sensor óptico montado en la parte trasera del vehículo para registrar la distancia y el tiempo de viaje, lo que permitió calcular la velocidad del vehículo y el tiempo de aceleración. Los datos del sensor óptico comenzaron a registrarse a la velocidad del vehículo de 40 km/h, hasta que se alcanzó la distancia de recorrido de 1000 m. Las distancias medidas en la trayectoria del avión fueron certificadas por el Instituto Brasileño de Metrología, INMETRO. Los parámetros atmosféricos medidos durante las pruebas fueron la temperatura, la presión, la humedad, la altitud en relación con el nivel del mar y la velocidad y dirección del viento. Se utilizaron tres sistemas de adquisición de datos para recoger y registrar los datos de los instrumentos: uno para la temperatura y la presión J. R. Sodré y S. M. C. Soares J. de la Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng. Copyright Ó 2003 by ABCM Julio-Septiembre 2003, Vol. XXV, No. 3 / 281 mediciones en el sistema de admisión y para la posición del árbol de levas de la válvula de admisión, otro para el sensor óptico; y el tercero por los datos del sistema de inyección de combustible. Los parámetros atmosféricos se midieron manualmente. Las incertidumbres estimadas de las mediciones, calculadas por el método propuesto por Kline y McClintock (1953), se resumen en la Tabla 1. Tabla 1- Incertidumbres de las mediciones. Potencia $\pm 0,96$ kW Par $\pm 0,13$ N.m Temperatura $\pm 0,15$ °C Presión $\pm 0,012$ bar Humedad $\pm 0,75$ % Velocidad $\pm 0,22$ % Distancia $\pm 0,25$ % Tiempo de aceleración $\pm 0,33$ % Procedimiento experimental Las pruebas se realizaron con el vehículo a nivel del mar y a 827 m sobre el nivel del mar. A nivel del mar se realizaron veinte pruebas, diez a una temperatura de 22,9 °C y diez a 28,2 °C, a lo largo de un día. A 827 m sobre el nivel del mar, se realizaron treinta pruebas, diez a una temperatura de 22,8 °C, diez a 29,4 °C y diez a 33,8 °C, todas a lo largo de un mismo período de día. En cada prueba, los parámetros medidos comenzaron a registrarse cuando el vehículo alcanzó la velocidad de 40 km/h en cuarta marcha, para disminuir la influencia de la acción del

viento. Cada serie de diez pruebas tardó unos 30 minutos en concluirse, con cinco pruebas realizadas con el vehículo conducido en una dirección y las otras cinco con el vehículo conducido en la dirección opuesta, también para minimizar la influencia de la acción del viento en los resultados. Antes de alcanzar los 40 km/h en cuarta marcha, la velocidad del vehículo se estabilizó en $39 \pm 0,5$ km/h a lo largo de 500 m en la pista de pruebas recta plana. A continuación, se pisaba a fondo el pedal del acelerador y los sistemas de adquisición de datos se accionaban automáticamente cuando el vehículo alcanzaba los 40 km/h. El pedal del acelerador permaneció completamente presionado hasta que el vehículo recorrió la distancia de 1000 m. Los datos se registraron en cada 100 m recorridos por el automóvil y en cada incremento de velocidad de 10 km/h. Así, se disponía de tiempos de aceleración de 40 a 100 km/h, de 80 a 120 km/h, de 0 a 400 m y de 0 a 1000 m.

VELOCIDAD (km/h)	0-400 m	0-1000 m
1000	2000	3000
4000	5000	6000
7000		
VELOCIDAD (rev/min)	0	20
	40	60
	80	80
100	120	
PO WER (kW)	100	110
	120	130
	140	150
	160	
TO R QUE (N.m)	0-1000 m	0-400 m
	40-100 km/h	80-120 km/h
POTENCIA PAR	Figura 1. Curvas de potencia y par e intervalos de velocidad y distancia.	

Estos intervalos de velocidad y distancia son normalmente adoptados por muchos fabricantes de automóviles cuando realizan pruebas estándar de rendimiento del vehículo, y corresponden a diferentes niveles de par y potencia entregados por el motor. La Figura 1 muestra las curvas de potencia y par del motor obtenidas en pruebas de laboratorio, con representación de los intervalos de velocidad y distancia adoptados para determinar el tiempo de aceleración. La aceleración de 80 a 120 km/h corresponde principalmente al intervalo en el que el motor entrega el par máximo. El intervalo de 40 a 100 km/h corresponde a la condición transitoria que va desde un par muy bajo entregado por el motor hasta el punto en el que se alcanza aproximadamente el par máximo. El intervalo de distancia de 0 a 400 m, saliendo de 40 km/h, es intermedio a los dos intervalos de velocidad anteriores, correspondiendo a todo el intervalo de velocidad de 40 a 100 km/h y la mayor parte del intervalo de velocidad de 80 a 120 km/h. El intervalo de distancia de 0 a 1000 m corresponde al rango más amplio de variación de par, saliendo de 40 km/h para llegar al punto en el que el motor entrega aproximadamente la potencia máxima. Método DIN70020 de los factores de corrección de potencia Este método de corrección de potencia, recomendado por DIN70020 norma (DIN, 1986), no tiene en cuenta los cambios en la humedad del aire. Si los cambios en las condiciones atmosféricas son pequeños con respecto a una condición estándar, entonces la eficiencia general del motor, el calor específico del combustible y la relación aire/combustible pueden considerarse constantes. Tomando la eficiencia volumétrica del motor variando proporcionalmente a la raíz cuadrada de la temperatura, se escribe la siguiente correlación: $(\frac{p}{p_0})^{0,5} CF1 = \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T}$ (1) El método DIN70020 indica la condición atmosférica de referencia de $p_0 = 1,01325$ bar y $T_0 = 293$ K. Método SAE J 1349 La norma SAE J 1349 (SAE, 1995) recomienda el siguiente factor de corrección de potencia atmosférica (CF2) para los motores de encendido por chispa: $[(\frac{p}{p_0})^{0,5} CF2] = \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T}$ (2) El método SAE J 1349 indica como condición ambiental de referencia para medir la potencia del motor en pruebas de dinamómetro $p_0 = 0,990$ bar, $T_0 = 302,4$ K y $p_{0v} = 0,013$ bar. Se recomienda aplicar este factor de corrección en el rango de 0,950 a 1,010 bar y de 288,5 a 316,3 K. Método JIS D 1001 La norma JIS D 1001 (JIS, 1993) recomienda el siguiente factor de corrección (CF3): $[(\frac{p}{p_0})^{0,75} CF3] = \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T}$ (3) La condición atmosférica de referencia para la Ec. (3) es de $p_0 = 1013,25$ mbar y $T_0 = 293$ K. Comparación de los factores de corrección de potencia del motor para ... 282 / Vol. XXV, No. 3, Julio-Septiembre 2003 ABCM Método ISO

1585 Este método está dado por la norma ISO 1585 (ISO, 1992), y también es adoptado por la Sociedad Brasileña de Normas Técnicas (ABNT, 1996). El factor de corrección de potencia sugerido (CF4) es: $CF4 = \left(\frac{p_0}{p} \right)^{0,6} \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1,2}$ (4) La condición ambiental de referencia es $p_0 = 1,000$ bar, $T_0 = 298K$ y $p_{v0} = 0,010$ bar. El factor de corrección se recomienda para su utilización en el rango de 0,800 a 1,000 bar y de 288 a 308K. Correlación entre el tiempo de aceleración y la potencia del motor Para evaluar la potencia desarrollada por el motor del vehículo a partir de las mediciones del tiempo de aceleración, se consideraron en el cálculo los siguientes datos disponibles del fabricante del vehículo: distribución de masa por eje, coeficiente de arrastre, área frontal del vehículo, velocidad de transmisión, curvas de potencia del motor y par en una condición atmosférica de referencia, presión de los neumáticos para las condiciones de las pruebas, circunferencia de los neumáticos, coeficiente de resistencia a la rodadura, eficiencia mecánica y factor de fricción para la superficie de la carretera. La potencia disponible para acelerar el vehículo viene dada por la diferencia entre la potencia de salida del motor y la potencia de carga en carretera, es decir, la potencia necesaria para superar la resistencia a la rodadura que surge de la fricción de los neumáticos y la resistencia aerodinámica del vehículo (Heywood, 1988): $P_a = P_e - P_{rt}$ (5) La potencia de salida del motor se tomó de la curva de potencia disponible, corregido por las condiciones de las pruebas en carretera por los factores de corrección evaluados [Ecs. (1)-(5)]. A partir de la velocidad del vehículo, la velocidad de rotación del motor se calculó a través de la Ec. (7): $\omega = \frac{v}{r} \times 2 \times \pi$ (6) Para evaluar la potencia de carga en carretera, primero se calcula la potencia para superar la resistencia aerodinámica: $P_{ra} = \frac{1}{2} \rho C_x A v^3$ (7) y a $P_{rv} = \frac{1}{2} \rho C_x A v^3$ (8) Por lo tanto, $P_{ra} = \frac{1}{2} \rho C_x A v^3$ (9) La densidad del aire en las Ecs. (8) y (9) se evalúan mediante la ley del gas perfecto: $\rho = \frac{p}{R T}$ (10) A continuación, se calcula la potencia para vencer la resistencia a la rodadura (Gillespie, 1992): $P_{rb} = W v r$ (11) y $P_{rb} = W v r$ (12) $P_{rb} = W v r$ (13) $P_{rb} = W v r$ (14) La potencia de carga en carretera viene dada por: $P_{rt} = P_d + P_r$ (15) La aceleración del vehículo a una velocidad dada v viene dada por: $a = \frac{P}{m v}$ (16) y $a = \frac{P}{m v}$ (17) El intervalo de tiempo Dt para alcanzar una velocidad final v_f a partir de una velocidad inicial v_i se aproxima mediante: $Dt = \frac{v_f - v_i}{a}$ (18) Para calcular el intervalo de tiempo Dt que tarda el vehículo en alcanzar una distancia fija (por ejemplo, 400 m, 1000 m), se adoptó el siguiente enfoque de la ecuación de movimiento: $v^2 = v_i^2 + 2 a D$ (19) y $v^2 = v_i^2 + 2 a D$ (20) $v^2 = v_i^2 + 2 a D$ (21) Por lo tanto, el tiempo t_f para que el vehículo alcance una distancia d_f , saliendo de d_i a t_i , v_i y a_i , es: $t_f = t_i + \frac{d_f - d_i}{v_i}$ (22) y la velocidad del vehículo v_f en el momento t_f se escribe así: $v_f = v_i + a (t_f - t_i)$ (23) Resultados Las figuras 2 a 5 muestran los tiempos de aceleración medidos y los tiempos de aceleración calculados a través de las Ecs. 5 a 23 de la curva de potencia del motor (Fig. 1) corregida por los factores de corrección CF1 a CF4. La curva de potencia del motor (Fig. 1) utilizada para determinar el tiempo de aceleración se corrigió a las condiciones de la carretera a partir de las condiciones ambientales de laboratorio de 1 bar y 25 °C. Los tiempos de aceleración experimentales mostrados son el promedio de diez pruebas realizadas en cada condición atmosférica. En general, las Figs. 2 a 5 muestran que el tiempo de aceleración para una distancia fija o un intervalo de velocidad aumenta con el aumento de la temperatura ambiente y disminuye

con el aumento de la presión atmosférica J. R. Sodré y S. M. C. Soares J. of Mech. Sci. & Eng. Copyright Ó 2003 by ABCM Julio-Septiembre 2003, Vol. XXV, No. 3 / 283 presión atmosférica. Estos resultados eran los esperados, a mayor temperatura del aire menor densidad del aire y, por lo tanto, disminuye la eficiencia volumétrica del motor. Por otro lado, las presiones atmosféricas más altas ayudan a aumentar la carga de masa de aire de admisión, aumentando así la eficiencia volumétrica del motor. De las Figs. 2 a 5 se observa que el cambio de la presión atmosférica es más influyente en el tiempo de aceleración que la variación de la temperatura atmosférica, para los rangos investigados. Una vez que la fuerza de arrastre es directamente proporcional a la densidad del aire, como se muestra en la Ec. 8, un aumento en la densidad del aire a través de la disminución de la temperatura o el aumento de la presión [Ec. (10)] mientras se aumenta la potencia de salida del motor a través de una mayor eficiencia volumétrica también aumenta la potencia de carga en carretera, disminuyendo la potencia disponible para acelerar el motor. En otras palabras, las presiones más altas y las temperaturas más bajas disminuirían el tiempo de aceleración durante una distancia fija o un intervalo de velocidad a través de una mayor potencia de salida, o provocarían un efecto diferente a través de una mayor demanda de potencia de carga en carretera. Las tendencias generales observadas a partir de los resultados (Figs. 2 a 5) indican que los efectos de los cambios en la densidad del aire en la potencia del motor son más fuertes que en la potencia de carga en carretera. Los resultados muestran una mayor pendiente para los tiempos de aceleración calculados en comparación con los experimentales con temperatura variable a 0,926-0,928 bar en los rangos de 40 a 100 km/h (Fig. 2), 0 a 400 m (Fig. 4) y 0 a 1000 m (Fig. 5). A este nivel de presión, los tiempos de aceleración calculados a menudo sobrepredicen los tiempos de aceleración experimentales, especialmente a las temperaturas más altas (29,4 a 33,8 °C) del rango estudiado. A 1.026-1.027 bar, los tiempos de aceleración calculados muestran una pendiente menor que los tiempos de aceleración experimentales cuando se varía la temperatura. Además, a este nivel de presión, los valores calculados subestiman los experimentales en la mayoría de los casos, especialmente en los rangos de 40 a 100 km/h (Fig. 2), 0 a 400 m (Fig. 4) y 0 a 1000 m (Fig. 5). La figura 2 muestra una comparación entre los factores de corrección para el tiempo de aceleración de 40 a 100 km/h. Los factores CF1, CF2 y CF3 proporcionan tiempos de aceleración calculados a partir de la curva de potencia estándar del motor corregida que se comparan con el tiempo de aceleración medido en los experimentos en carretera. El tiempo de aceleración obtenido a partir del factor de corrección CF2 muestra la menor discrepancia media entre los valores experimentales de carretera y laboratorio, de 0,87%. Los resultados del factor de corrección CF1 se encuentran entre los mejores, aunque no tiene en cuenta la humedad del aire en el cálculo. El tiempo de aceleración calculado a partir del factor CF4 mostró la mayor discrepancia media con respecto a los valores experimentales en carretera, del 2,0 %. En general, los tiempos de aceleración obtenidos a partir de los factores de corrección sobrepredicen los valores de los experimentos en carretera a una altitud de 827 m sobre el nivel del mar y subestiman los valores experimentales obtenidos a nivel del mar para el rango de temperatura investigado, con pocas excepciones. En general, los factores de corrección dieron tiempos de aceleración más cercanos a los medidos por los experimentos en carretera en condiciones de 928 mbar y 22,8 °C.

TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	CF1	CF2	CF3	CF4
14,0	94,5%	94,5%	94,5%	94,5%
14,5	94,5%	94,5%	94,5%	94,5%
15,0	94,5%	94,5%	94,5%	94,5%
15,5	94,5%	94,5%	94,5%	94,5%
16,0	94,5%	94,5%	94,5%	94,5%
16,5	94,5%	94,5%	94,5%	94,5%
17,0	94,5%	94,5%	94,5%	94,5%

Figura 2. Tiempo de aceleración de 40

a 100 km/h. La figura 3 muestra que, para el tiempo de aceleración de 80 a 120 km/h, el factor de corrección CF1 da los resultados que mejor se aproximan a los valores experimentales en carretera, con una discrepancia media del 1,31 %. El tiempo de aceleración del factor de corrección CF2 muestra los segundos mejores resultados, con una discrepancia media del 1,49 % con respecto a los experimentos en carretera. Los factores de corrección CF4 y CF3 mostraron resultados cuyas discrepancias medias con los datos experimentales de carretera fueron de 1,59 y 2,34 %, respectivamente. En este rango de velocidad, todos los factores de corrección proporcionaron tiempos de aceleración que sobrepredicen los valores de los experimentos en carretera a una altitud de 827 m sobre el nivel del mar, para todas las temperaturas probadas. A nivel del mar, los factores de corrección dieron tiempos de aceleración con una mejor aproximación a la carretera datos experimentales a una temperatura de 28,2 °C.

TEMPERATURA AMBIENTE (0C)	CF1	CF2	CF3	CF4	EXP
20	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5
24	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0
28	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5
32	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0
36	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5

Figura 3. Tiempo de aceleración de 80 a 120 km/h. Para el tiempo de aceleración de 0 a 400 m, los mejores resultados se mostraron nuevamente con los factores de corrección CF1, CF2 y CF3, como muestra la Fig. 4. El tiempo de aceleración calculado a partir del factor de corrección CF2 mostró la menor discrepancia con respecto a los datos de los experimentos en carretera, con un valor medio del 0,41 %. El factor de corrección CF4 mostró la comparación de los factores de corrección de potencia del motor para ... 284 / Vol. XXV, N° 3, julio-septiembre de 2003 ABCM discrepancias más altas con respecto a los valores experimentales de carretera, de 0,81 %. Los tiempos de aceleración calculados a partir de los factores de corrección en este rango de recorrido mostraron los resultados más cercanos a los datos experimentales de carretera dentro de los límites de presiones y temperaturas ensayadas.

TEMPERATURA AMBIENTE (0C)	CF1	CF2	CF3	CF4	EXP
18,0	18,0	18,5	19,0	19,5	19,5
18,5	18,5	19,0	19,5	20,0	20,0
19,0	19,0	19,5	20,0	20,5	20,5
19,5	19,5	20,0	20,5	21,0	21,0
20,0	20,0	20,5	21,0	21,5	21,5

Figura 4. Tiempo de aceleración de 0 a 400 m. El tiempo de aceleración para el rango más grande ensayado, de 0 a 1000 m, muestra los resultados de los factores de corrección CF1, CF2 y CF3 con una mejor aproximación a los resultados experimentales de la carretera, como se ve en la Fig. 5. El tiempo de aceleración calculado a partir del factor de corrección CF2 mostró la menor discrepancia media con respecto a los datos experimentales en carretera, del 0,33 %. Los mejores enfoques a partir de los cálculos del factor de corrección se encontraron para las condiciones atmosféricas a 827 m sobre el nivel del mar.

TEMPERATURA AMBIENTE (0C)	CF1	CF2	CF3	CF4	EXP
18,0	18,0	18,5	19,0	19,5	19,5
18,5	18,5	19,0	19,5	20,0	20,0
19,0	19,0	19,5	20,0	20,5	20,5
19,5	19,5	20,0	20,5	21,0	21,0
20,0	20,0	20,5	21,0	21,5	21,5

Figura 5. Tiempo de aceleración de 0 a 1000 m. Para la mayoría de los resultados obtenidos, los factores de corrección CF1, CF2 y CF3 produjeron una mejor concordancia entre los experimentos de laboratorio y los de carretera que el factor de corrección CF4. A diferencia de los otros tres factores de corrección investigados, que consideran una relación directamente proporcional entre la potencia de salida y la presión atmosférica (Ecs. (1) a (3)), el factor de corrección CF4 considera que la potencia de salida cambia con la presión atmosférica hasta un exponente de potencia de 1,2 (Ec. (4)). Esa es probablemente la razón por la cual el factor de corrección CF4 produjo resultados con mayores discrepancias. A partir de estos resultados, se puede concluir que el rendimiento del vehículo en carretera tiene una respuesta diferente a las

variaciones de presión, temperatura y humedad que las propuestas para corregir la potencia del motor por las Ecs. (1) a (4). Las constantes y consideraciones aplicadas por las Ecs. (5) a (23) para correlacionar el tiempo de aceleración y la potencia del motor puede haber influido en las diferencias observadas entre los valores calculados y experimentales. La medición directa del par disponible en las ruedas del vehículo eliminaría la necesidad de convertir la potencia del motor en tiempo de aceleración y, por lo tanto, proporcionaría una evaluación más precisa de los factores de corrección de potencia. Conclusiones Se observó que la presión atmosférica es un parámetro más relevante para influir en el rendimiento del motor que la temperatura del aire. Las pruebas en carretera confirmaron que el tiempo de aceleración aumenta con el aumento de la temperatura del aire y la disminución de la presión atmosférica. Las tendencias observadas en los resultados indican que las variaciones en la temperatura y la presión atmosféricas influyen más en la potencia de salida del motor que en la potencia de carga en carretera. Los factores de corrección de potencia evaluados en este trabajo que mostraron los resultados más cercanos a los datos experimentales de carretera fueron los recomendados por las normas DIN 70020, SAE J 1349 y JIS D 1001. De ellos, el factor de corrección indicado por la norma SAE J 1349 es el que produjo los mejores resultados. El tiempo de aceleración del vehículo no depende de la presión atmosférica, la temperatura y la humedad descritas por los factores de corrección de potencia del motor evaluados en este trabajo. La medición directa del par de la rueda en carretera puede permitir una mejor evaluación de los factores de corrección de potencia. Agradecimientos Los autores agradecen a FIAT Automóveis S.A. por el apoyo financiero de este proyecto

Efecto de la composición del combustible y la altitud sobre las emisiones reguladas de un motor de gas natural controlado en circuito cerrado y de combustión pobre 971707

El gas natural presenta varios desafíos a los fabricantes de motores para su uso como combustible de combustión pobre para motores de servicio pesado. Esto se debe a que el gas natural puede variar en composición y la variación es lo suficientemente grande como para producir cambios significativos en la estequiometría del combustible y su índice de octanaje. De manera similar, la operación a gran altitud puede presentar desafíos. El efecto más significativo de la altitud es una presión barométrica más baja, típicamente 630 mm Hg a 1600 m en comparación con un valor del nivel del mar de 760 mm. Esto puede reducir el impulso del turbocompresor a bajas velocidades, lo que genera mezclas más ricas de lo deseado. El propósito de este programa de prueba fue determinar el efecto de la composición del gas natural y la altitud sobre las emisiones reguladas y el rendimiento de un motor Cummins B5.9G. El motor es un motor de gas natural exclusivo, de combustión pobre, con control de circuito cerrado y encendido por chispa. Para las pruebas de composición del combustible, el motor estaba funcionando a aproximadamente 1600 m (5280 pies) sobre el nivel del mar. El rendimiento y las emisiones del motor se midieron mediante la prueba de emisiones transitorias de la EPA para motores diésel y de combustible alternativo definida en el Código de Regulaciones Federales según 40 CFR, Parte 86, Subparte N. El NMHC se determinó mediante un método de cromatografía de gases. El método CFR para el cálculo de NMHC se compara con un método de especiación interno. Se evaluaron cinco combustibles diferentes de gas natural. Los gases naturales tenían un contenido de metano del 76,9% al 90,3%. El contenido total de inertes osciló entre 17,3% y 3,6%. El contenido máximo de etano fue del 5,4%. Se descubrió que el motor funciona bien con todos los gases, incluido el gas metano más bajo. La economía

neta de combustible basada en energía no se vio afectada por la composición del combustible. Las emisiones de CO y PM no se vieron afectadas por la composición del gas combustible. Las emisiones de NO_x tampoco se vieron afectadas por la composición del combustible. El THC tiende a disminuir a medida que aumenta el poder calorífico del combustible. No se observa tal tendencia en el caso de los NMHC. Los resultados adquiridos en altitud se compararon con los resultados obtenidos a 152 m (500 pies). Los resultados de las pruebas mostraron que la potencia nominal y el par máximo se podían alcanzar a gran altura. El par del acelerador a fondo a velocidades inferiores a la velocidad máxima de par era aproximadamente un 20% menor que al nivel del mar, lo que es proporcional a la diferencia de presión barométrica. Las emisiones de PM, NO_x y NMHC no se vieron afectadas por la operación en altitud. Las emisiones de CO aumentaron ligeramente en altitud. Las emisiones de este motor están por debajo de todos los estándares actuales o propuestos para motores de servicio pesado en todos los combustibles probados tanto en altitudes altas como bajas. Se descubrió que el método CFR para el cálculo de NMHC tiene una repetibilidad deficiente. Se propone un método alternativo basado en la especiación de hidrocarburos.

El efecto de la presión ambiental en el mapa de rendimiento de un motor SI de dos tiempos 930503

Se ha investigado el efecto de la presión atmosférica sobre las características de rendimiento de un motor de dos tiempos de encendido por chispa con barrido del cárter. Se probó un motor aéreo de 2 pistones opuestos de 350 cc en un banco de pruebas experimental donde tanto la presión en el colector de admisión como la presión en el tubo de escape se controlaron por separado.

Los resultados experimentales se analizaron mediante un programa informático, el Programa MICE, que simula en detalle los distintos procesos que ocurren dentro del cilindro de un motor de combustión interna. El programa informático ha sido calibrado utilizando los resultados medidos al nivel del mar.

Se ha propuesto una correlación empírica para el factor de corrección de la potencia del motor en el rango de 100 a 44 kPa, donde la baja presión corresponde a una altitud estándar de 21.000 pies (7 km). El presente estudio sugiere que el factor de corrección es proporcional a la presión ambiental elevada a una potencia que depende del régimen del motor (entre 1 para régimen bajo y 2 para régimen alto). Estudios anteriores habían sugerido una potencia de 9/8 (1,125), pero su validez se limitaba a bajas revoluciones del motor y una presión ambiental mínima de 70 kPa, lo que corresponde a una altitud de hasta 10.000 pies (3 km).

La disminución de la presión y la temperatura atmosférica afecta a la densidad del aire y su composición, y en consecuencia, a las prestaciones de toda máquina térmica. Este problema es más acentuado en máquinas térmicas de desplazamiento volumétrico como los motores de combustión interna alternativos, y dentro de ellos, aún más en los de aspiración natural.

El rendimiento indicado disminuye con la altitud debido principalmente a que la presión en el cilindro es menor a lo largo de todo el ciclo del motor, si bien otros efectos relacionados con la incorporación del combustible también influyen. Todo ello provoca una pérdida de potencia

indicada. Aunque la potencia de pérdidas mecánicas se reduce ligeramente con la altitud debido a que la potencia de pérdidas de bombeo y la de rozamiento se reducen por la disminución de la contrapresión de escape y de presión en el cilindro respectivamente, esta disminución es mucho menos significativa que la de la potencia indicada. Por ello, algunos autores suponen el cambio en la potencia de pérdidas mecánicas como un porcentaje constante de la variación de la potencia indicada a medida que cambia la altitud (Xiaoping *et al.*, 1996), mientras que otros directamente la desprecian (SAE J1349, 1995; Heywood, 1988), suponiendo idéntica disminución para la potencia indicada y para la efectiva. Esta última suposición implica que el peso de las pérdidas mecánicas crezca frente a una potencia indicada que disminuye y que por lo tanto la pérdida relativa de potencia efectiva sea incluso mayor que la indicada y creciente al disminuir el rendimiento mecánico del motor.

Lizhong *et al.* (1995) realizaron ensayos en un motor diesel de inyección directa, aspiración natural, de 3.3 litros de cilindrada total y cuatro cilindros. Dejando constante el dosado relativo, obtuvieron una disminución del 24% en la potencia efectiva y un incremento del consumo específico de combustible cercano al 4% al operar a 2000 msnm (metros sobre el nivel del mar). Adicionalmente estudiaron el efecto que tenía dejar constante el consumo de combustible de máxima economía (consumo específico de combustible mínimo), obteniendo con el mismo motor, una disminución en la potencia efectiva en torno al 16% y un incremento en el consumo específico de combustible mínimo en torno al 6% al operar a la misma altura (2000 msnm).

Xiaoping *et al.*, (1996) desarrollaron un modelo para predecir el efecto de la presión y la temperatura ambiente sobre motores diesel turboalimentados (TC). Manteniendo constantes el régimen de giro del motor, la masa de combustible inyectado y la temperatura ambiente, obtuvieron una disminución en la potencia efectiva cercana al 4% al pasar de 0 a 3000 msnm. El efecto de la temperatura lo obtuvieron dejando constantes el régimen de giro, la masa de combustible inyectado y la altura sobre el nivel del mar. Al disminuir la temperatura ambiente de 20 a -15°C observaron un aumento de la potencia efectiva en torno al 7%. La compensación de potencia proporcionada por el turbogrupo se debió al incremento del dosado relativo y por tanto de la temperatura de escape, y a la disminución de la contrapresión de escape al aumentar la altitud.

En motores de encendido provocado con lazo de control cerrado, el requerimiento de dosado estequiométrico obliga a la unidad de control electrónico del motor a inyectar menos cantidad de combustible a medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar (menor disponibilidad de aire atmosférico). La menor temperatura exterior obliga a avanzar el ángulo de encendido ya que disminuye la velocidad de combustión. Olin y Maloney (1999) desarrollaron un algoritmo de cálculo basado en las ecuaciones de flujo a través de válvulas, que permite corregir los parámetros de la unidad de control electrónico en función de la presión barométrica.

Con el fin de establecer una base de comparación común es necesario aplicar factores de corrección para convertir la potencia en el terreno a potencia en condiciones estándar y viceversa. Esta corrección suele ser del tipo:

$$\frac{N_i}{N_{i0}} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^a \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^b \quad (1)$$

donde N_i , p y T son la potencia indicada, presión y temperatura del lugar de operación respectivamente, el subíndice 0 indica condiciones de referencia (normalmente 0 msnm).

La corrección por humedad se suele incorporar en el término de presión, restando de ésta la presión del vapor de agua atmosférico. En este trabajo no se aborda dicho efecto, que con diferencia influye menos sobre las prestaciones del motor que la presión y temperatura (Soares y Sodré, 2002).

Los valores de los exponentes a y b varían según el tipo de motor y las condiciones de operación. Éstos no provienen de un análisis teórico de las ecuaciones, sino que obedecen a un ajuste experimental para correlacionar el tipo de motor y las condiciones atmosféricas. El exponente a suele tomar el valor de la unidad para motores diesel y de encendido provocado (MEP) de aspiración natural, tanto de aplicación estacionaria como de automoción. La norma ISO 1585 (1992) adoptada también por la sociedad de normas técnicas de Brasil (Sodré y Soares, 2003) recomienda para MEP de automoción un valor de $a=1.2$ y *resta de la presión atmosférica la del vapor de agua*.

El exponente b suele variar entre -0.5 y -1 para motores de aspiración natural independientemente del tipo de aplicación, estacionaria o automoción, mientras que para motores sobrealimentados suele tomar valores mayores que la unidad. La norma ISO 3046-1 (1995) recomienda usar $b = -0.75$ para motores diesel de aspiración natural de aplicaciones estacionarias, mientras que la norma SAE J816b (1979) recomienda valores de $b = -0.7$ para el mismo tipo de motor. Ambas normas coinciden en recomendar valores de $a=1$ y $b=-0.5$ *para MEP de aspiración natural que usan combustibles líquidos*.

Para MEP de automoción la norma DIN 70020 (1986) recomienda $a=1$ y $b=-0.5$ *con condiciones atmosféricas de referencia de $p_0=1.01325$ bar y $T_0=293$ K*. La norma SAE J 1349 (1995) recomienda $a=1$ y $b=-0.5$, *pero resta de la presión la del vapor de agua en la atmósfera, siendo las condiciones de referencia $p_0=0.99$ bar, $T_0=302.4$ K y $p_{0v}=0.013$ bar*. Este factor de corrección se recomienda para un rango de presiones entre 0.95 y 1.01 bar y entre 288.5 y 316.3 K. La norma japonesa JIS D 1001 (Sodré y Soares, 2003), es similar a la norma SAE J1349 (1995), sólo que el valor de b es -0.75 y las condiciones de referencia son $p_0=1.01325$ bar, $T_0=293$ K. La norma ISO 1585 (Sodré y Soares, 2003) recomienda valores de $b=-0.6$, *siendo las condiciones de referencia $p_0=1$ bar, $T_0=298$ K y $p_{0v}=0.01$ bar*. Este factor de corrección se recomienda para un rango de presiones entre 0.8 y 1 bar y un rango de temperaturas entre 288 y 308 K.

En la práctica, los valores más usados en la literatura para motores de aspiración natural son $a=1$ y $b=-0.5$, que Heywood (1988) justifica por la dependencia directa entre la potencia y el gasto admitido, el cual depende del producto $P_{adm} \cdot T_{adm}^{-0.5}$. Existen, sin embargo, algunos autores que limitan la validez de esta correlación. Por ejemplo, Harari y Sher (1993) encontraron que los valores antes mencionados aplicados a motores de encendido provocado (MEP) de dos tiempos, solo tienen validez a régimenes de giro inferiores a 6000 rpm y presiones atmosféricas desde 70

kPa. Para regímenes de giro mayores a 6000 rpm, propusieron factores de corrección $a=2$ y $b=-0.8$ y cuya validez se extiende hasta los 44 kPa.

En Varela, (2001) se define la altura de restablecimiento del compresor para motores turbosobrealimentados de aviación como aquella a la cual el compresor está siendo utilizado a su capacidad máxima, con la misión de mantener la densidad igual a la de referencia, y por lo tanto la potencia desarrollada. Para lograr esto último es necesario mantener el gasto de aire independiente de las condiciones a la salida del compresor ($p_{adm,0}$ y $T_{adm,0}$), lo que hace necesario mantener la relación $P_{adm} \cdot T_{adm}^{-0.5}$ constante, justificación que coincide con la propuesta por Heywood (1988). Relacionando este término con los datos de presión y temperatura de remanso de la toma dinámica y la velocidad de vuelo de diseño de la aeronave, existen métodos para determinar la relación de compresión en el compresor necesaria para recuperar el gasto másico de admisión, y por tanto la potencia del motor.

Human et al. (1990) simularon el efecto de la altura (1800 msnm) en un sistema de muestreo a volumen constante (CVS) generando depresiones y contrapresiones en los colectores de admisión y escape. En un motor Caterpillar 3208 de aspiración natural, V-8, 10.4 litros de cilindrada, obtuvieron una disminución del par a plena carga (12%) al aumentar la altura, la cual fue aproximadamente constante en todo el rango de regímenes de giro del motor. En un motor Cummins NTCC-350 turboalimentado, 6 cilindros en línea, de 14 litros de cilindrada total, obtuvieron una disminución del par a plena carga entre 15 y 30% a velocidades inferiores a 1200 rpm (régimen de par máximo). A partir de este régimen de giro no se apreció diferencia al variar la altura, mostrando la importancia del turboalimentador. Chaffin y Ullman (1994) emplearon la misma instalación anterior para estudiar los efectos sobre las emisiones y las prestaciones en un motor Detroit Diesel serie 60, de 11.1 litros de cilindrada, 6 cilindros en línea, turboalimentado, postenfriado, que utilizaba un sistema de control electrónico con corrección por presión barométrica (DDEC II) operando a la altura de Ciudad de México (2160 msnm). En la prueba transitoria obtuvieron una disminución en el trabajo (kWh) en torno al 6.5%, y un incremento en el consumo específico de combustible en torno a 1.5% con respecto a 245 msnm. En la prueba estacionaria a plena carga midieron disminuciones en la potencia inferiores al 2% a 1200, 1500 y 1800 rpm, lo que mostró la importancia del turbocompresor y del control electrónico. Graboski y McCormick (1997) y McCormick *et al.* (1999) obtuvieron tendencias semejantes a 1600 msnm en un motor Cummins B5.9G de gas natural de quemado pobre con control de lazo cerrado y turboalimentado. El par efectivo a plena carga disminuyó en torno a 20% a regímenes de giro inferiores a 1600 rpm, y a partir de este régimen, no se apreció diferencia al variar la altura sobre el nivel del mar.

En vista de lo anterior, los fabricantes de motores han desarrollado diversos métodos para compensar el efecto de la altitud en sus motores, tales como la implementación de la turboalimentación o el uso de sensores barométricos que retroalimentan a la unidad de control electrónico para que actúe corrigiendo los parámetros de la inyección de combustible. Se han implementado algunos métodos de corrección por presión barométrica que no requieren el uso de sensores adicionales. Estos utilizan algoritmos de cálculo basados en las ecuaciones de flujo

compresible a través de una restricción. Las entradas al algoritmo se obtienen de los sensores existentes en el motor (Olin y Maloney, 1999).

En este artículo se cuantifican algunos de estos efectos; y se hace una estimación del efecto de la altitud sobre las prestaciones de motores de aspiración natural y turboalimentados sin sistemas correctores en función de la presión ambiental.

PLANTEAMIENTO

La altitud sobre el nivel del mar, z , tiene un importante efecto sobre las condiciones en las que se encuentra el aire y sobre su composición. Además de las variaciones de temperatura propias de las distintas capas de la atmósfera, la presión del aire disminuye a medida que crece la altitud del punto de medida, debido a la reducción del peso de la columna que soporta por encima, reducción que se debe tanto a la menor altura de la columna como a la menor densidad, ρ , del aire que la ocupa. Más concretamente, la variación de la presión a lo largo de un elemento diferencial de altura es debida al peso del aire que ocupa ese elemento por unidad de sección, es decir:

$$\frac{dp}{dz} = -g\rho \quad (2)$$

Este doble efecto de la disminución de la presión y de la densidad no es la única consecuencia de la altitud que pueda afectar al desarrollo de actividades humanas. Además, debido al diferente peso molecular de los componentes del aire, éste varía también su composición. En un elemento diferencial de volumen, este cambio de composición es causado por la variación de la presión parcial de cada componente i , generada como consecuencia de su diferencia de peso con respecto al de la mezcla de gases. Siendo n_i el número de moles y PM_i el peso molecular del componente i :

$$\frac{dp_i}{dz} = -g \frac{dn_i (PM_i - PM_a)}{dV} \quad (3)$$

No es objeto de la psicrometría estudiar las condiciones del aire más allá de la troposfera, pero sí conviene al menos conocer qué ocurre en el espesor atmosférico en el que puede existir población humana. Para ello, es necesario aceptar algunas hipótesis en relación a las siguientes cuestiones:

Comportamiento termodinámico del aire

La hipótesis más habitual en psicrometría es suponer comportamiento de gas ideal, ya que el factor de compresibilidad del aire, cuando la presión es inferior a 1 atm y la temperatura rara vez sobrepasa los límites $[-20,50]$ °C, es muy próximo a la unidad, y por tanto, el error cometido al considerarlo como gas perfecto es muy pequeño. Expresada en función de la densidad, ρ , la ecuación de estado del gas ideal (siendo R_a la constante másica del aire):

$$p = \rho R_a T \quad (4)$$

Perfil térmico de la columna de aire

La hipótesis más sencilla consiste en suponer que la temperatura es uniforme al variar la altitud (columna isoterma). Sin embargo, esta hipótesis puede no ser muy precisa ya que es conocida la

reducción de temperatura del aire con la altitud a lo largo del espesor de la troposfera (algo más de 10 km). Esta reducción puede manifestarse, bien suponiendo una tasa de enfriamiento constante (puede tomarse, por ejemplo, 6.5 K/km, o bien un perfil triangular con una temperatura constante de -55°C a 11000 m de altitud (Conan, 1990). En cualquier caso, en el rango de altitud habitable, la gran cantidad de factores que pueden influir sobre la temperatura del aire hace muy difícil disponer de hipótesis adecuadas. Debe tenerse presente, por tanto, que las expresiones que siguen permiten sólo obtener valores orientativos, y que las variaciones locales de temperatura pueden corregir dichos valores.

Suponiendo comportamiento del aire como gas ideal, las variaciones de la presión con la altitud (ecuación 2) y de la fracción molar del componente i (X_i) con la altitud (ecuación 3) se transforman en las siguientes ecuaciones, la primera de las cuales es conocida como ecuación hidrostática:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{R_a T} dz \quad (5)$$

$$\frac{dX_i}{X_i} = -\frac{g}{RT} (PM_i - PM_a) dz \quad (6)$$

Siendo R la constante universal de los gases, y R_a la específica del aire. Si se supone un perfil isotermo de la columna de aire, la integración de estas ecuaciones desde la altitud del nivel del mar (subíndice 0) hasta una altura genérica conduce a sendas leyes exponenciales:

$$p = p_0 e^{-\frac{gz}{R_a T}} \quad (7)$$

$$X_i = X_{i0} e^{-\frac{gz}{RT} (PM_i - PM_a)} \quad (8)$$

Mientras que si se supone un perfil triangular $dT = K dz$, la integración de las anteriores ecuaciones diferenciales da como resultado leyes de tipo potencial:

$$p = p_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-\frac{g}{R_a K}} \quad (9)$$

$$X_i = X_{i0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-\frac{g}{RK} (PM_i - PM_a)} \quad (10)$$

Los resultados de presión ambiental obtenidos con ambas hipótesis se representan en la [Fig. 1](#) para valores de altitud en el rango habitable. Las líneas continuas representan la columna isoterma a -20, -10, 0, 10 y 20°C de abajo hacia arriba respectivamente. Al igual que en las siguientes figuras, los resultados obtenidos bajo la hipótesis de columna isoterma corresponden a diversos valores de la temperatura de ésta, mientras que los obtenidos con columna triangular corresponden a una temperatura de 20°C a cota cero con vértice en -55°C a cota 11000 m.

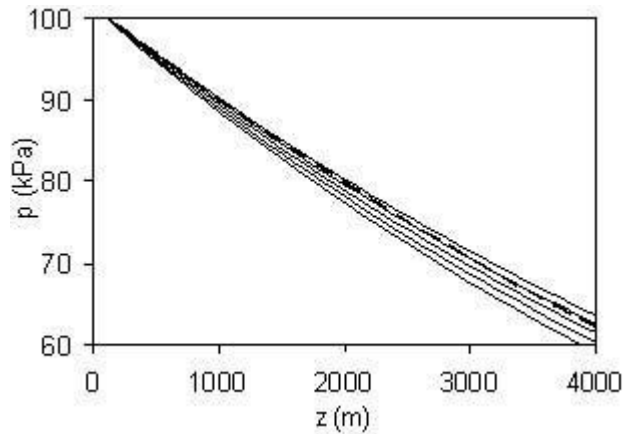


Fig. 1: Efecto de la altitud sobre la presión atmosférica. Columna isoterma (3/4) y columna triangular (---) con $T_{(z=0)} = 20^{\circ}\text{C}$

En esta figura se aprecia un efecto más notable al variar la presión con la altitud que al variar la temperatura, lo que se corresponde con los resultados experimentales de Soares y Sodré, (2002).

En concreto, la fracción molar de oxígeno en el aire disminuye con la altitud, al ser el oxígeno ($PM_{O_2} = 32 \text{ kg/kmol}$) más pesado que el aire ($PM_a < 29 \text{ kg/kmol}$), tal y como se observa en la Fig. 2, al aplicar las dos hipótesis de perfil térmico planteadas. Las líneas continuas representan la columna isoterma a $-20, -10, 0, 10$ y 20°C de abajo hacia arriba respectivamente. De otro lado, la fracción molar del nitrógeno aumenta ligeramente al ser algo más ligero que el aire. La compensación de estos dos efectos hace que las variaciones del peso molecular del aire seco sean muy pequeñas.

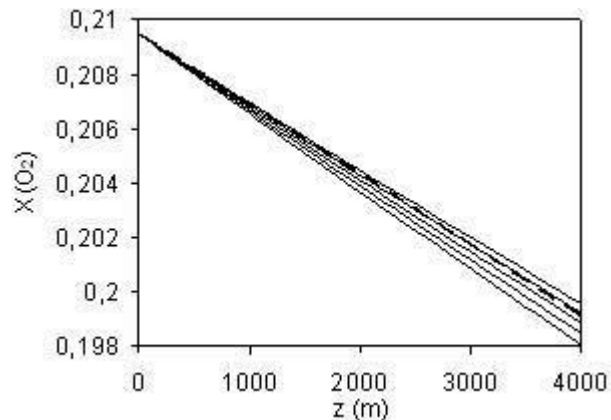


Fig. 2: Efecto de la altitud sobre la fracción molar de oxígeno. Columna isoterma (3/4) y columna triangular (---) con $T_{(z=0)} = 20^{\circ}\text{C}$

La concentración másica de oxígeno en el aire (C_{O_2}) disminuye con la altitud, tanto porque se reduce su fracción molar en el aire como porque cae la densidad de éste. En efecto:

$$C_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{V} = \frac{X_{O_2} P}{R_{O_2} T} \quad (11)$$

Sustituyendo en esta fórmula las expresiones, obtenidas con la hipótesis de columna isoterma, de la variación de la presión y la fracción molar de oxígeno, ecuaciones (7) y (8) respectivamente; y escribiendo el resultado en función de la concentración de oxígeno a cota cero:

$$C_{O_2} = C_{O_2,0} e^{-\frac{gz}{R_{O_2} T}} \quad (12)$$

y haciendo lo propio a partir de las expresiones obtenidas con la hipótesis de columna triangular, ecuación (9) y ecuación (10):

$$C_{O_2} = C_{O_2,0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\left(\frac{g}{R_{O_2} K} + 1 \right)} \quad (13)$$

La Fig. 3 muestra que a medida que la altitud aumenta la concentración de oxígeno disminuye, cualquiera que sea la temperatura ambiental. En la figura las líneas continuas representan la columna isoterma a -20, -10, 0, 10 y 20°C respectivamente de arriba hacia abajo. La reducción en la concentración de oxígeno es menos pronunciada al aplicar la hipótesis de columna triangular.

En cualquier caso, de los dos efectos que contribuyen a la disminución de la concentración de oxígeno con la altitud, el más importante es, con diferencia, el efecto de la presión. Pero además, es necesario indicar que los cambios de fracción molar (consecuencia de un proceso de difusión molecular) son normalmente inapreciables, debido a la preponderancia de los movimientos convectivos macroscópicos que desplazan los gases verticalmente (Wayne, 2000).

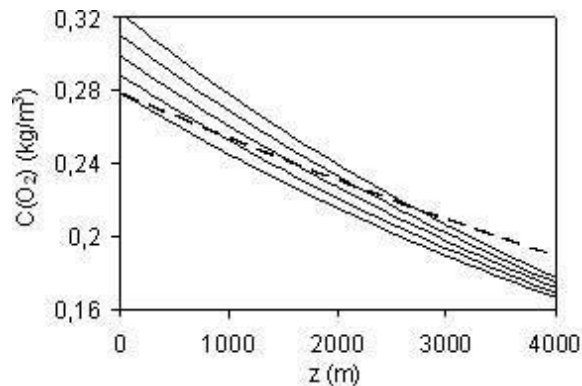


Fig. 3: Efecto de la altitud sobre la concentración de oxígeno. Columna isoterma (3/4) y columna triangular (---) con $T_{(z=0)} = 20^{\circ}\text{C}$

Los efectos mostrados sobre la presión, temperatura, fracción molar de oxígeno y su concentración, pueden a su vez tener distinta influencia sobre las prestaciones del motor, sobre el proceso de combustión y sobre las emisiones contaminantes. En este trabajo solo se presentan las conclusiones más relevantes sobre las prestaciones del motor, dejándose para un trabajo posterior el estudio de los efectos sobre la combustión y las emisiones.

EFECTO SOBRE LAS PRESTACIONES

Las prestaciones máximas de cualquier motor alternativo vienen limitadas por la capacidad de renovar la masa de aire en el cilindro, que para una configuración determinada (cilindrada, sección de entrada en válvulas y geometría de colectores, etc.), se expresa por medio del rendimiento volumétrico (h_v). Para cuantificar el efecto de la altitud sobre estas variables en motores de aspiración natural puede hacerse uso de la ecuación (1) para la potencia indicada y de la ecuación (14) para h_v (Heywood, 1988), (Harari y Sher, 1993), (Soares y Sodré, 2002):

$$\frac{\eta_v}{\eta_{v0}} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^b \quad (14)$$

Tomando $b=-0.5$ en la ecuación (1) y haciendo uso de la hipótesis de columna triangular (partiendo de 20°C a $z=0$ msnm), se obtienen los efectos mostrados en la [Fig. 4](#).

Por otra parte la norma ISO 3046-1 (1995) recomienda el uso de la ecuación (15) para ajustar la potencia efectiva de motores estacionarios por variación en las condiciones ambientales. En esta ecuación, el factor de corrección de la potencia indicada, se ajusta con el rendimiento mecánico:

$$\frac{N_e}{N_{e0}} = \frac{N_i}{N_{i0}} - 0.7 \left(1 - \frac{N_i}{N_{i0}} \right) \left(\frac{1}{\eta_m} - 1 \right) \quad (15)$$

donde N_e es la potencia efectiva, hm es el rendimiento mecánico del motor; y para el cálculo de relación de potencias indicadas se propone, si se desprecia el efecto de la humedad del ambiente y de la temperatura del refrigerante del aire de admisión, la misma ecuación (1), donde los exponentes a y b toman diferentes valores en función del tipo de motor y de las condiciones de operación. Para motores diesel de aspiración natural cuya potencia estaría limitada por insuficiente exceso de aire, $a=1$ y $b=-0.75$; mientras que para motores diesel cuatro tiempos, turboalimentados, sin interenfriador (*intercooler*), de media o baja velocidad recomienda $a=1$ y $b=-2$, independientemente del grado de sobrealimentación del motor. La ecuación (15) es igual a la ecuación (1) cuando no se considera el efecto del rendimiento mecánico ($hm=1$).

Al representarla gráficamente ([Fig. 4](#)) se observa, tal y como se ha mencionado, que al disminuir el rendimiento mecánico del motor, las pérdidas de potencia efectiva se acentúan con respecto de las de potencia indicada. Las líneas representan los casos de $hm = 1, 0.95, 0.9, 0.85$ y 0.8 de arriba hacia abajo respectivamente.

Además, esta disminución de la potencia con la altura es aproximadamente constante en todo el rango de regímenes de giro del motor, por lo que puede extenderse también al par (Human et al., 1990), (Lizhong *et al.*, 1995).

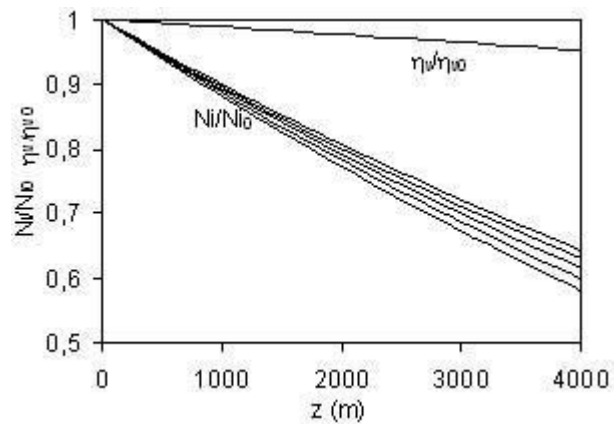


Fig. 4: Efecto de la altitud sobre el rendimiento volumétrico (h_v/h_{v0}) y la potencia efectiva máxima (N_i/N_{i0}) de un motor de aspiración natural suponiendo columna triangular

En los motores diesel turboalimentados, el efecto de la altitud sobre la potencia no puede obtenerse como una superposición de los efectos sobre el turbocompresor y sobre el motor alternativo, puesto que ambas máquinas están interrelacionadas. De hecho, el gasto de aire (\dot{m}_a) que el compresor es capaz de trasegar suele corregirse por medio de la siguiente ecuación (similar a la corrección de potencia de un motor de aspiración natural):

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{a0}} = \frac{p}{p_0} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-0.5} \quad (16)$$

Un motor con determinado turbogrupo regulado para que entregue la cantidad de aire necesaria en el punto de máximo par, al nivel del mar tendría un comportamiento, en el mapa par efectivo – régimen ($M-n$), similar al representado en la [Fig. 5a](#).

En línea continua se ha representado el par máximo en función del régimen de giro que el motor es capaz de entregar a nivel del mar. Al trabajar en altitud, existe una zona a bajo régimen de giro en la que el turbogrupo no tiene efecto positivo sobre el gasto de aire que llega al motor, de manera que éste no es capaz de entregar el par exigido a nivel del mar. A partir de un determinado régimen, la sobrealimentación anula el defecto de aire provocado por la altitud, de manera que no sólo se compensa dicho efecto, sino que el turbo podría llegar a introducir más aire en el motor y con ello lograr más par efectivo.

Para compensar el efecto de falta de aire por la altitud en todo el rango de regímenes, los motores suelen equiparse con un turbogrupo capaz de compensar dicho efecto a cualquier régimen de giro,

incorporando para la Zona de Regulación sistemas de control como válvula de control de flujo (*waste-gate*), turbina de geometría variable (TGV), etc. (Fig. 5b).

Puede suponerse que el motor sobrealimentado se comporta como un motor de aspiración natural sometido a la presión y temperatura de admisión (después del compresor). Denominando p_{adm} y T_{adm} a la presión y temperatura de la admisión y adoptando las expresiones propuestas por Heywood (1988) para motores de aspiración natural, la expresión queda:

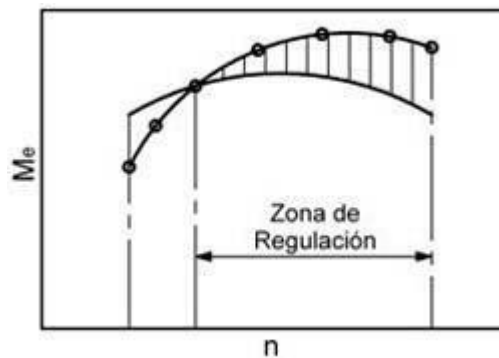
$$\left(\frac{N_i}{N_{i0}}\right)_{T.C.} = \frac{p_{adm}}{p_{adm,0}} \cdot \left(\frac{T_{adm}}{T_{adm,0}}\right)^{-0.5} \quad (17)$$

$$= \frac{p_{adm}}{p} \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \frac{p_0}{p_{adm,0}} \cdot \left(\frac{T_{adm}}{T} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot \frac{T_0}{T_{adm,0}}\right)^{-0.5}$$

Escribiendo esta expresión en función del grado de sobrealimentación a la altitud z ($\pi = p_{adm}/p$), y del grado de sobrealimentación al nivel del mar ($\pi_0 = p_{adm,0}/p_0$), y relacionando las condiciones de entrada y salida del compresor por medio de una transformación politrópica de exponente n , se obtiene la siguiente expresión:

$$\left(\frac{N_i}{N_{i0}}\right)_{T.C.} = \left(\frac{\pi}{\pi_0}\right)^{0.5 + \frac{0.5}{n}} \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-0.5} \quad (18)$$

En la Fig. 6 se representa la variación de la potencia indicada con la altitud para diferentes grados de sobrealimentación, siendo las líneas $p/p_0 = 1, 1.2, 1.4,$ y 1.6 , respectivamente de abajo hacia arriba. Las curvas se han obtenido con la ecuación (18), suponiendo un exponente politrópico $n=1.4$.



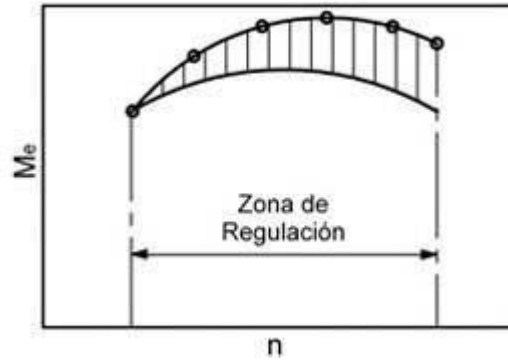


Fig. 5: Efecto de la altitud en un motor sobrealimentado. $z=0$ ($\frac{3}{4}$) y $z \gg 0$ (Æ)

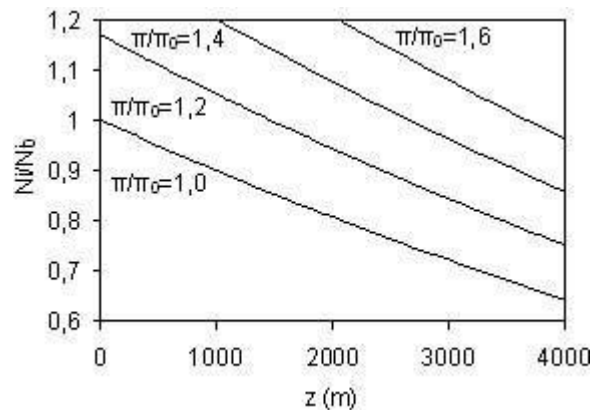


Fig. 6: Potencia indicada en función de la altitud para diferentes grados de sobrealimentación (p/p_0) suponiendo columna triangular

Como se aprecia en la Fig. 6, la recuperación de prestaciones del motor con la altitud depende del grado de sobrealimentación. Sin embargo, en algunos casos como por ejemplo la Norma ISO 3046-1 (1995), a propuesta del *International Council on Combustion Engines* (CIMAC), se acepta para todo tipo de motores diesel estacionarios, sobrealimentados sin interenfriador, una pérdida de potencia cuantificada por los exponentes $a=0.7$ y $b=-2$ en la ecuación (1), independientemente del grado de sobrealimentación. Es evidente que la validez de esta correlación no puede ser independiente del grado de sobrealimentación, ni por lo tanto del grado de carga del motor, por lo que es de suponer que dicho organismo adoptó un grado de sobrealimentación fijo.

Suponiendo una compresión isoentrópica con $n=1.4$, y suponiendo que los motores sobrealimentados equipan turbogrupos sobredi-mencionados de tal forma que en ningún caso experimenten pérdida de potencia ($N_i/N_{i0} = 1$), tal como se argumenta en Lapuerta *et al.* (2005), puede despejarse la siguiente ecuación, que proporciona el grado de sobre-alimentación que permitiría compensar por completo la pérdida de potencia con la altitud.

$$\pi = \pi_0 \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right)^{-1.16667} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0.58336} \quad (19)$$

Este resultado se ha representado en la [Fig. 7](#) para diversas condiciones de sobrealimentación de diseño, descritas por el grado de sobrealimentación a nivel del mar (π_0), que pueden corresponder a diferentes condiciones operativas de un mismo motor o de diferentes motores. El caso de $\pi_0=1$ correspondería a un motor que al nivel del mar no sobrealimenta, y que al elevarse en altitud solo lo hace en la medida necesaria para mantener la potencia. Este resultado constituye una orientación tanto para el dimensionamiento de grupos de sobrealimentación que vayan a equipar motores que operen en altura, como de los sistemas de compensación (*waste-gate*, turbinas de geometría variable, etc.) que dichos motores requieren cuando operan al nivel del mar para no sobrepasar la potencia nominal.

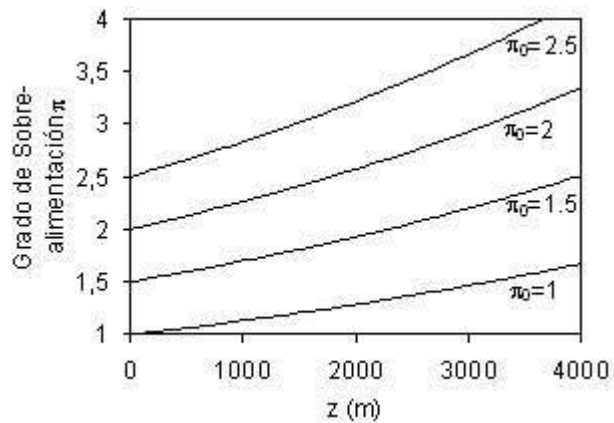


Fig. 7: Efecto del grado de sobrealimentación del compresor para un motor que no cambia su potencia indicada con la altitud

El mapa de condiciones de sobrealimentación de la [Fig. 7](#) se utiliza para analizar los procesos de mezcla y combustión en motores diesel y los procesos de formación de contaminantes.

CONCLUSIONES

Para estimar los efectos de la altitud sobre cualquier motor de combustión interna, es adecuado utilizar la ecuación hidrostática atmosférica suponiendo un perfil triangular de temperaturas.

La altitud sobre el nivel del mar ejerce efectos tanto sobre la presión y temperatura atmosféricas como sobre la concentración de oxígeno en el aire y la composición de éste. Sin embargo, para cuantificar el efecto sobre las prestaciones del motor, basta con considerar el efecto sobre las condiciones termodinámicas.

La altitud disminuye notablemente la potencia indicada, y por tanto la efectiva, desarrollada por un motor de aspiración natural, en todo el rango de regímenes de giro. Sin embargo este efecto se

reduce al turbosobrealimentar el motor, pudiendo incluso llegar a compensarse tal reducción a alto régimen.

Se ha obtenido una expresión que permite calcular el incremento de relación de compresión del turbogruppo, necesario para evitar cualquier pérdida de potencia al aumentar la altitud.

Las estrategias más recientes de diseño tienden a sobredimensionar el turbogruppo con el fin de evitar la pérdida de potencia a bajo régimen, limitando el exceso de potencia que éste proporcionaría a alto régimen, por medio de sistemas de compensación electrónica-mente gobernados.

NOMENCLATURA

A, B	Exponentes empíricos del ajuste
C	Concentración
G	Aceleración de la gravedad
Me	Par efectivo
\dot{m}	Gasto másico
N	Exponente politrópico
Es	Número de muelas de y
N	Régimen de giro del motor
No	Potencia efectiva
Es	Potencia indicada
P	Presión
PM	Peso molecular
R	Constante universal gases
T	Temperatura
V	Volumen del gas
X	Fracción molar
Con	Altitud

H_m	Rendimiento mecánico
H_v	Rendimiento volumétrico
p	Grado de sobrealimentación
r	Densidad

Subíndices:

0	Condiciones de referencia (0 msnm)
U_n	Aire
Ad_m	Admisión del motor
Y_o	Componente mezcla gaseosa