



Universidad de Valladolid



PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TESIS DOCTORAL:

**ESTIMACIÓN DE PRESTACIONES, CONSUMO DE
COMBUSTIBLE Y EMISIONES DE VEHÍCULOS DE
TRANSPORTE DE PASAJEROS CON UN MOTOR DIESEL
DE ASPIRACIÓN NATURAL DEPENDIENDO DE LAS
CONDICIONES AMBIENTALES Y OPERATIVAS**

Presentada por John Jairo Ceballos para optar al grado de
Doctor/a por la Universidad de Valladolid

Director: Dr. Francisco Tinaut Fluixá

Tutor: Dr. Andrés Melgar Bachiller





Universidad de Valladolid

TESIS DOCTORAL

Estimación de prestaciones, consumo de combustible y emisiones
de vehículos de transporte de pasajeros con un motor diésel de
aspiración natural dependiendo de las condiciones ambientales y
operativas

Presentado por:

John Jairo Ceballos Marcillo, M.Sc.

Director: Dr. Francisco Tinaut Fluixá

Tutor: Dr. Andrés Melgar Bachiller

Valladolid, 2021

TRIBUNAL CALIFICADOR

Presidente: _____

Secretario: _____

Vocal: _____

Suplentes: _____

Agradecimientos

La vida está llena de personas que te aportarán un granito de arena en tu camino, y en este camino llamado Doctorado quiero agradecer en primer lugar a mi Mentor, Francisco Tinaut, quien ha sido como un segundo padre aquí en España, quien me supo guiar en el campo académico, gracias a su dirección, paciencia y apoyo, en los momentos buenos y los momentos malos, he podido obtener resultados en mi formación profesional con los que ni en mis mejores sueños pensé poder alcanzarlos.

Para mí la familia siempre lo es todo, y mi Madre, mis hermanas y mis sobrinos han sido mi pilar, mi fuerza, mis alegrías y mis tristezas; a ellos les agradezco inmensamente el apoyo en todos estos años de investigación. Una mención muy especial a una personita tan importante para mí, mi esposita Eli, quien, si bien solo estuvo en este trayecto final, ha evitado a toda costa que desista de continuar con este sueño, cuando las nubes de la pandemia y la tragedia estuvieron sobre mí, gracias mil por todo.

Es muy cierto lo que alguna vez una persona muy sabia me dijo, *“el momento indicado no es el que tú escoges, sino el que el destino ha preparado para tí”*, y ahora que esta etapa de mi vida está culminando, no puedo más que agradecer a esa persona que luchó a mi lado desde el primero momento, aquella que siempre me tiró de las orejas cuando veía nubarrones a lo lejos, aquel ser especial que cada día y cada noche me dio palabras de aliento y confianza para lograr lo que siempre he querido, estas palabras van para ti amado padre.

Siempre que conversábamos me preguntabas *“¿ya terminas el doctorado?”*, yo siempre te contestaba con una sonrisa *“vaya alistando la visa que este finde defiendo”*, pues ya el momento está cerca y usted amado padre lo va a poder ver desde primera fila, porque gracias a usted estoy aquí, gracias a usted soy la persona que soy. GRACIAS PADRE ETERNO, TUS BENDICIONES SOBRE MÍ SIEMPRE, ¡DESDE DONDE ESTÉS... ESTE LOGRO VA POR TI!, recuerda que *Tu tigre lo ha logrado!!!...*

Valladolid, 7 de Octubre 2021

John Ceballos

Resumen

La presente tesis tiene como eje central el establecimiento de medios para evaluar, de forma eficiente y con coste económico contenido, diversos aspectos en relación con la movilidad y el transporte público en Ecuador, como base para la posterior definición de políticas de control y regulación, tanto a nivel local como regional. De esta forma, el objetivo principal se centra en la posibilidad de estimar las prestaciones, el consumo de combustible y las emisiones de vehículos de transporte público propulsados con motores de combustión interna tipo diésel, considerando el efecto de las fuertes diferencias de presión atmosférica, temperatura ambiente y humedad del aire en las distintas regiones del Ecuador.

Para tal efecto, el marco de estudio se ha dividido en tres fases fundamentales: una primera fase de estudio individual de la influencia de los parámetros ambientales sobre el funcionamiento de un motor diésel de aspiración natural ADE360N (con norma de referencia de emisiones Euro III), partiendo de la reproducción de sus prestaciones en condiciones de referencia; posteriormente, una segunda fase de elaboración de mapas característicos de funcionamiento de dicho motor en las diferentes condiciones de presión atmosférica y temperatura ambiente, finalizando con una fase de aplicación al funcionamiento de un autobús BUSSCAR Bus 340 – Mercedes Benz MB OF-1722, empleando perfiles de conducción, altitud y comportamiento del conductor reales.

Acorde al estado de la técnica previo, es conocido que las condiciones ambientales tienen un gran impacto en las prestaciones y emisiones del transporte, más aún en países localizados en América Latina, siendo de especial interés el Ecuador por su configuración orográfica diversa, existiendo una clara diferencia de altitud, temperatura y humedad en diferentes puntos de su mapa nacional. Con base a este diagnóstico inicial, para llevar a cabo este análisis, se tomaron en cuenta como referencias relevantes las condiciones de tres ciudades: Guayaquil (4 m.s.n.m.), Santa Isabel (1641 m.s.n.m.) y Ambato (2500 m.s.n.m.), siendo representativas de las condiciones en las tres regiones continentales del país (Costa, Sierra y Oriente).

La metodología desarrollada está enfocada a estimar en primera aproximación las prestaciones, el consumo y las emisiones del motor diésel de aspiración natural al cambiar

las condiciones ambientales asociadas con la altitud. Se ha utilizado el paquete informático AVL BOOST™ para calcular el comportamiento del motor cuando se modifican las condiciones del aire admitido al variar la presión, la temperatura y la humedad ambiente, en condiciones de cantidad de combustible constante, realizándose un estudio paramétrico completo de los efectos individuales y combinados de dichas variables. El proceso de combustión se simula usando una ley de doble Wiebe para especificar la tasa de liberación de calor (Rate of Heat Release ROHR) con distintos valores de los parámetros en función de las condiciones operativas del motor.

Para identificar el efecto individual de cada uno de los factores ambientales a estudiar, tanto en el estudio paramétrico de variación de la temperatura como en la variación de la presión atmosférica, se consideraron dos niveles de análisis. En primer lugar, se desarrolla un estudio que se ha denominado de alcance regional, en el cual se estiman las prestaciones del motor en las condiciones de referencia correspondientes a las características atmosféricas de las tres ciudades, con rangos de variación para la presión atmosférica entre 1012,8 hPa (Guayaquil, 4 m.s.n.m.) y 813,2 hPa (Ambato, 2500 m.s.n.m.), y para la temperatura ambiente entre 26,5°C a 12,5°C (para las dos ciudades extremas). Posteriormente, para estos valores de referencia de cada ciudad, se ha realizado un estudio paramétrico a nivel local, en el cual se modifican las condiciones de presión de referencia considerando situaciones de anticiclón (aumento local de la presión, +2 kPa) y borrasca (reducción local de la presión, -2 kPa), y de forma independiente se varía la temperatura (de 0°C a 40°C, en intervalos de 20 K), así como la humedad relativa (para valores de 0% - aire seco-, 40%, 60% y 100%).

De los resultados obtenidos en esta primera parte, se observa que, al variar la temperatura ambiente entre 0°C y 40°C, los valores calculados para BSFC (consumo específico de combustible, g/kWh), y las emisiones específicas (g/kWh) de NO_x, CO y Soot tienen un ligero crecimiento, junto con una disminución de BMEP (presión media efectiva, bar). El efecto de la diferencia de altitud entre la ciudad a nivel del mar (Guayaquil) y la más alta considerada (Ambato) equivale a una variación total de la presión de 20 kPa, obteniéndose que cuando la presión atmosférica se reduce debido a una mayor altitud, a una misma temperatura ambiente, hay un aumento de BSFC, CO y Soot, y una reducción en BMEP y NO_x. A nivel local, suponiendo condiciones de temperatura ambiente constantes de 20°C, la presencia de anticiclón (+2 kPa) conduce a una reducción ligera

de BSFC, acompañada de crecimientos de BMEP y de la emisión de NOx. Los efectos de una borrasca (-2kPa) a temperatura constante son cuantitativamente similares, aunque con variaciones de sentido contrario. La influencia de la humedad relativa tiene resultados prácticamente despreciables sobre las variables de salida (inferiores al 0.1% por cada punto porcentual de variación de la humedad relativa).

Una de las aportaciones relevantes de la presente tesis es la elaboración de los mapas característicos de comportamiento del motor para las diversas condiciones regionales de referencia (con la presión y temperatura ambientes asociadas a cada altitud). Estos mapas representan la variación de los factores de consumo de combustible, o factores de emisión según corresponda, acordes a la variación de la BMEP debida a las condiciones ambientales para cada régimen de giro. Estos mapas constituyen parte de los datos de entrada al código de simulación del motor para la estimación de prestaciones, consumo de combustible y emisiones en estas condiciones.

Partiendo de lo anterior, se realizan estimaciones del comportamiento del autobús BUSSCAR Bus 340 – Mercedes Benz MB OF-1722, usando recorridos con perfiles reales de velocidad, altitud y comportamiento del conductor. Para esta simulación del vehículo en su conjunto se utiliza el paquete informático AVL CRUISE™. En primer lugar, se ha definido un recorrido tipo, utilizable en todas las ciudades de análisis, y a continuación se ha considerado el efecto combinado de la presión y la temperatura atmosféricas, restringido a condiciones de aire seco, con una densidad corregida para tener en cuenta la humedad. El efecto cuantitativo de la temperatura y la presión sobre las variables del vehículo se ha evaluado mediante coeficientes de sensibilidad (% de cambio de la variable por cada °C o por cada kPa). Se ha obtenido que cuando aumenta la temperatura ambiente se observa una muy ligera reducción de BMEP (-0.05%/°C), con un muy ligero incremento del consumo total de combustible acumulado (entre +0.06%/°C y +0.08%/°C), junto con incrementos un poco mayores de NOx, CO y Soot. Cuando disminuye la presión atmosférica, la BMEP disminuye (-0.03%/kPa), el consumo acumulado aumenta (+0.20%/kPa), los NOx disminuyen (-0.44%/kPa), mientras que hay incrementos de Soot mayores (+8.54%/kPa). Adicionalmente se ha analizado el efecto de las variaciones de la presión y la temperatura ambientes al pasar de una ciudad a otra sobre el consumo del vehículo (l/100km) y los factores de emisión (g/km) de los tres contaminantes considerados.

Finalmente, se recalcan como aportaciones de la tesis la obtención de un conjunto de correlaciones estadísticas, en forma de expresiones potenciales, con exponentes característicos para cada variable, que permiten estimar los valores de presión media efectiva, consumo de combustible y emisiones, teniendo en cuenta la variación de presión y temperatura ambientes asociada a la altitud, en base a un valor de referencia de cada variable. Se considera que esto puede ser de gran utilidad para la elaboración de próximos inventarios regionales y locales de consumos y emisiones contaminantes del transporte en la República del Ecuador.

Abstract

The central axis of this thesis is the establishment of efficient means of estimation, at a contained economic cost, in relation to mobility and public transport in Ecuador, as a base measure for the subsequent definition of control and regulation policies, both at the local and regional level. Hence, the main objective is focused on the possibility of estimating the performance, fuel consumption and emissions of public transport vehicles powered by alternative diesel-type internal combustion engines, considering the effect of strong atmospheric pressure differences, as well as ambient temperature and air humidity variation in the different regions of Ecuador.

For this purpose, this study has been divided into three fundamental phases: a first phase of individual study of the environmental parameters on the operation of an ADE360N naturally aspirated diesel engine, starting from the reproduction of its performance under reference conditions; later, a second phase of elaboration of characteristic maps for the aforementioned engine in different conditions of atmospheric pressure and ambient temperature, ending with a phase of application to the operation of a BUSSCAR Bus 340 - Mercedes Benz MB OF-1722, using real driving, altitude and driver behavior profiles.

According to an initial review of the state of the art, it is known that environmental conditions have a great impact on transport performance and emissions, mainly in countries located in Latin America, being Ecuador of special interest due to its diverse orographic configuration, with clear differences in altitude, temperature and humidity at different points on its national map. Based on this initial diagnosis, to carry out this analysis, relevant data from three cities were taken into account: Guayaquil (4 MASL), Santa Isabel (1641 MASL) and Ambato (2500 MASL), being representative of the conditions in the three continental regions of the country (Costa, Sierra and Oriente).

The methodology developed is focused on estimating, in a first approximation, the performance, consumption and emissions of the naturally aspirated diesel engine when the environmental conditions associated with altitude change. The AVL BOOST™ software package has been used to calculate the behavior of the engine when the conditions of the admitted air change as the ambient pressure, temperature and humidity vary, under conditions of constant fuel quantity, carrying out a complete parametric study

of the individual and combined effects of these variables. The combustion process is simulated using a double Wiebe law to specify the Rate of Heat Release ROHR with different parameter values depending on the operating conditions of the engine.

To distinguish the individual effect of each of the environmental factors to be studied, both in the parametric study of temperature variation and the variation of atmospheric pressure, two levels of analysis were considered. In the first place, a regional study was developed, in which engine performance is estimated under the reference conditions corresponding to the atmospheric characteristics of each city, with variation ranges between 1012.8 hPa (Guayaquil, 4 MASL) and 813.2 hPa (Ambato, 2500 MASL) for atmospheric pressure, and between 26.5 °C to 12.5 °C for ambient temperature. Subsequently, on these reference values, a parametric study is carried out at the local level, in which the reference pressure conditions are modified considering anticyclone situations (local increase in pressure, +2 kPa) and storm (local reduction in pressure, -2 kPa), and independently the temperature is varied (from 0°C to 40°C, in steps of 20 K), as well as the relative humidity (for values of 0% -dry air-, 40%, 60% and 100%).

From the results obtained in this first part, it is observed that, by varying the ambient temperature between 0°C and 40°C, the values calculated for BSFC (specific fuel consumption, g/kWh), and the specific emissions (g/kWh) of NO_x, CO, and Soot have a slight growth, along with a decrease in BMEP (mean effective pressure, bar). The effect of the difference in altitude between the city at sea level (Guayaquil) and the highest one considered (Ambato) is equivalent to a total pressure variation of 20 kPa, obtaining that when the atmospheric pressure is reduced due to a higher altitude, at the same ambient temperature, there is an increase in BSFC, CO and Soot, and a reduction in BMEP and NO_x. At the local level, assuming constant ambient temperature conditions of 20°C, the presence of anticyclone (+2 kPa) leads to a slight reduction in BSFC, accompanied by increases in BMEP and the emission of NO_x. The effects of a storm (-2kPa) at constant temperature are similar, although with variations in the opposite direction. The influence of relative humidity has practically negligible results on the output variables (less than 0.1% for each percentage point of variation in relative humidity).

One of the relevant contributions of this thesis is the elaboration of characteristic maps of engine behavior for the various regional reference conditions (with the ambient pressure

and temperature associated with each altitude). These maps represent the variation in fuel consumption factors, or emission factors as appropriate, according to the variation in BMEP due to environmental conditions for each engine speed. These maps constitute part of the input data to the engine simulation code for the estimation of performance, fuel consumption and emissions under these conditions.

Based on the above, estimates of the behavior of the BUSSCAR Bus 340 - Mercedes Benz MB OF-1722 are made, using routes with real profiles of speed, altitude and driver behavior. The AVL CRUISE™ software package is used for simulation of the vehicle as a whole. In the first place, a typical route has been defined, usable in all the analyzed cities, and then the combined effect of atmospheric pressure and temperature has been considered, restricted to dry air conditions, with density corrected to take into account humidity. The quantitative effect of temperature and pressure on the vehicle variables has been evaluated using sensitivity coefficients (% of change of the variable for each °C or for each kPa). When the ambient temperature increases, a very slight reduction in BMEP is observed (-0.05%/°C), with a very slight increase in the total accumulated fuel consumption (between +0.06%/°C and +0.08%/°C), along with slightly larger increases in NO_x, CO, and Soot. When atmospheric pressure decreases, BMEP decreases (-0.03%/kPa), accumulated consumption increases (+ 0.20%/kPa), NO_x decreases (-0.44%/kPa), while there are higher Soot increases (+8.54 %/kPa). Additionally, the effect of variations in ambient pressure and temperature, when moving from one city to another, on vehicle consumption (l/100km) and emission factors (g/km) of the three pollutants considered has been analyzed.

Finally, other main contributions of the thesis are a set of statistical correlations, in the form of power-laws, with characteristic exponents, that allow estimating the values of mean effective pressure, fuel consumption and emissions, taking into account the variation of ambient pressure and temperature associated with altitude, based on a reference value for each variable. It is considered that this can be very useful for the establishment of future regional and local inventories of consumption and polluting emissions from transport in the Republic of Ecuador.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	Introducción.....	2
1.1.	Antecedentes y justificación de la investigación	2
1.2.	Objetivos	7
1.3.	Hipótesis de Partida.....	8
1.4.	Metodología	9
1.5.	Desarrollo del documento	10
2.	Fundamentos conceptuales y estado de la técnica.....	15
2.1.	Fundamentos de influencia de la altitud sobre la composición del aire y el proceso de combustión	15
2.1.1.	Efecto de la altitud sobre la composición del aire seco	15
2.1.2.	Efecto de la altitud sobre la composición del aire húmedo.....	18
2.1.3.	Efecto de la altitud sobre dosado estequiométrico y emisión de CO ₂	20
2.2.	Fundamentos de operación y funcionamiento de motores diésel de aspiración natural.....	21
2.2.1.	Parámetros geométricos	22
2.2.2.	Parámetros de funcionamiento	24
2.2.3.	Parámetros indicados y efectivos	26
2.2.4.	Curvas características	27
2.3.	Fundamentos de operación y prestaciones de autobuses de motor diésel.....	32
2.3.1.	Categorización de vehículos autobuses.....	32
2.3.2.	Ciclos de operación y recorrido tipo	35
2.3.3.	Factores de influencia en el consumo y emisiones en autobuses.....	37
2.4.	Fundamentos y modelos de emisiones contaminantes.....	39
2.4.1.	Formación y parámetros de caracterización de emisiones.....	39
2.4.2.	Modelos de formación emisiones contaminantes	41

2.4.3. Normativa de control de emisiones Euro III	44
2.5. Revisión del estado de la técnica sobre el efecto de las condiciones ambientales en motores y vehículos diésel	48
2.5.1. Efectos sobre el comportamiento de motores diésel.....	49
2.5.2. Efectos sobre autobuses de transporte público de pasajeros motor diésel. .	56
3. Simulación de prestaciones y emisiones de motor diésel de aspiración natural	63
3.1. Modelo de simulación del motor ADE360N mediante AVL BOOST™	63
3.2. Configuración orográfica en Ecuador	64
3.3. Reproducción de prestaciones del motor proporcionadas por el fabricante.	66
3.4. Estimación de valores de entrada al modelo AVL BOOST™ para distintas altitudes	70
3.5. Condiciones ambientales y datos de entrada al modelo AVL BOOST™ para distintas altitudes – aire seco.....	73
3.6. Condiciones ambientales y valores de entrada al modelo AVL BOOST™ para distintas altitudes – aire húmedo.....	75
4. Efecto de las variables ambientales sobre las prestaciones y emisiones del motor diésel ADE 360N.....	82
4.1. Variación de la temperatura ambiente para cada altitud.....	83
4.1.1. Efecto sobre BMEP	83
4.1.2. Efecto sobre BSFC	85
4.1.3. Efecto sobre la emisión de NOx.....	87
4.1.4. Efecto sobre la emisión de CO	89
4.1.5. Efecto sobre la emisión de Soot	91
4.2. Variación de la presión atmosférica para cada altitud	94
4.2.1. Efecto sobre BMEP	94
4.2.2. Efecto sobre BSFC	96
4.2.3. Efecto sobre la emisión de NOx.....	99
4.2.4. Efecto sobre la emisión de CO.....	101

4.2.5. Efecto sobre la emisión de Soot	104
4.3. Variación de la humedad relativa para cada altitud	106
4.3.1. Efecto sobre BMEP	107
4.3.2. Efecto sobre BSFC	108
4.3.3. Efecto sobre la emisión de NOx.....	109
4.3.4. Efecto sobre la emisión de CO	111
4.3.5. Efecto sobre la emisión de Soot	112
4.4. Obtención de coeficientes de sensibilidad y de correlaciones estadísticas de influencia de la temperatura y presión atmosféricas	113
4.4.1. Coeficientes de sensibilidad de BMEP	114
4.4.2. Coeficientes de sensibilidad de BSFC	117
4.4.3. Coeficientes de sensibilidad de CO2.....	118
4.4.4. Coeficientes de sensibilidad para otras emisiones	119
4.4.5. Bondad de las correlaciones estadísticas.....	121
5. Simulación de prestaciones y emisiones de un autobús diésel con perfiles de conducción reales	125
5.1. Características del sistema de propulsión y del vehículo para su simulación mediante AVL CRUISE™.....	125
5.2. Configuración de las condiciones de simulación y del ciclo de conducción en AVL CRUISE™	128
5.2.1 Unidades lógicas de control de conducción	128
5.2.2 Establecimiento de condiciones de conducción representativas	131
5.2.3 Configuración del ciclo de conducción Cycle Run.....	134
5.2.4 Integración de las curvas características del motor de AVL BOOST™ en el modelo del vehículo AVL CRUISE™.....	135
5.3. Conformación de mapas característicos del motor para distintas altitudes.....	137
5.3.1. Variables de entrada para distintas condiciones de temperatura y presión atmosférica	137

5.3.2. Mapas característicos de consumo de combustible y emisiones de NO _x , CO y Soot del motor para distintas altitudes	140
6. Resultados de las condiciones de funcionamiento del vehículo BUSSCAR Bus 340 – Mercedes Benz MB OF-1722.....	148
6.1. Descripción de las condiciones de funcionamiento reales utilizadas.....	148
6.2. Variación de la temperatura ambiente para cada altitud	150
6.2.1. Efecto sobre BMEP	150
6.2.2. Efecto sobre el consumo de combustible	153
6.2.3. Efecto sobre la emisión de NO _x	157
6.2.4. Efecto sobre la emisión de CO	159
6.2.5. Efecto sobre la emisión de Soot	162
6.3. Variación de la presión ambiente para cada altitud	164
6.3.1. Efecto sobre BMEP	165
6.3.2. Efecto sobre el consumo de combustible	167
6.3.3. Efecto sobre la emisión de NO _x	170
6.3.4. Efecto sobre la emisión de Soot	173
7. Conclusiones y sugerencias para trabajos futuros	178
7.1. Conclusiones.....	178
7.1.1. Conclusiones Generales	178
7.1.2. Conclusiones Específicas	180
7.2. Principales aportaciones de la Tesis Doctoral.....	187
7.3. Sugerencias para trabajos futuros.....	188
Bibliografía.....	191
Anexo I	201
Anexo II	209

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1-1 Calidad del aire (medido en PM 2.5) de las ciudades de América Latina.....	3
Fig. 1-2 Calidad de los combustibles, según normas Euro, para diferentes países de Latinoamérica	4
Fig. 1-3 Calidad del diésel, según el contenido en ppm de azufre, para diferentes países de Latinoamérica	5
Fig. 1-4 Calidad del diésel, según el contenido en ppm de azufre, para diferentes ciudades del Ecuador	5
Fig. 2-1 Reactivos y Resultantes – Combustión MCI A	15
Fig. 2-2 Esquema de un motor de combustión interna diésel.....	22
Fig. 2-3 Parámetros geométricos característicos de una válvula.....	24
Fig. 2-4 Ejemplo de curvas de potencia, torque y consumo de combustible	29
Fig. 2-5 Optimización del rendimiento volumétrico de acuerdo a diferentes mejoras en variables de diseño del motor diésel	31
Fig. 2-6 Optimización del rendimiento volumétrico de acuerdo a diferentes mejoras en variables de diseño del motor diésel	32
Fig. 2-7 Modos de análisis por régimen de giro y potencia para el cálculo de emisiones de NOx según el ciclo estacionario europeo ESC	45
Fig. 2-8 Etapas de medición segundo a segundo dentro el ciclo ETC	46
Fig. 2-9 Modos de muestreo con relación al régimen de giro y grado de carga para la estimación de humos según el ciclo de prueba de respuesta a la carga del motor ELR	46
Fig. 2-10 Efecto de la altitud sobre el rendimiento volumétrico (η_v/η_{vo}) y la potencia efectiva máxima (N_i/N_{io}) de un motor de aspiración natural suponiendo una columna triangular	50
Fig. 2-11 Presión dentro del cilindro versus el volumen de la cámara de combustión a diferentes altitudes	51

Fig. 3-1 Diseño del modelo en AVL BOOST™ aplicado a la configuración del motor ADE 360N Series de 6 cilindros	63
Fig. 3-2 Diagrama de procesos de simulación AVL BOOST™ para las condiciones de referencia del fabricante	68
Fig. 3-3 Curvas de Torque y Potencia – Fabricante – AVL BOOST™.....	69
Fig. 3-4 Curvas de rendimientos del motor ADE 360N Series para el modelo en AVL BOOST™, para ambientes de aire seco y aire húmedo (indicado en *).....	70
Fig. 3-5 Diagrama de procesos de simulación con AVL BOOST™ para las condiciones características de cada ciudad seleccionada	75
Fig. 4-1 Diagrama de procesos de simulación en AVL BOOST™ para el estudio paramétrico de cada variable ambiental por separado.....	82
Fig. 4-2 Dependencia relativa de la BMEP con respecto a la temperatura para tres regímenes de giro (1200, 1600 y 2400 rpm)	84
Fig. 4-3 Efecto de la Temperatura sobre valores absolutos de la BMEP para tres presiones ambiente características a tres regímenes de giro.....	85
Fig. 4-4 Dependencia relativa de BSFC con respecto a la temperatura para tres presiones ambiente características a tres regímenes de giro (1200RPM, 1600RPM y 2400RPM)	86
Fig. 4-5 Efecto de la Temperatura sobre valores absolutos de BSFC para tres presiones ambiente características en tres regímenes de giro (1200RPM, 1600RPM y 2400RPM)	87
Fig. 4-6 Dependencia relativa de la emisión de NOx con respecto a la temperatura para tres presiones ambiente características a tres regímenes de giro (1200RPM, 1600RPM y 2400RPM).....	87
Fig. 4-7 Efecto de la Temperatura sobre valores absolutos de NOx para tres presiones ambiente características en tres regímenes de giro (1200RPM, 1600RPM y 2400RPM)	88
Fig. 4-8 Dependencia relativa de las emisiones de CO con respecto a la temperatura para tres presiones ambiente características a tres regímenes de giro (1200RPM, 1600RPM y 2400RPM).....	89

Fig. 4-9 Efecto de la Temperatura sobre valores absolutos de CO para tres presiones ambiente características en tres regímenes de giro (1200RPM, 1600RPM y 2400RPM)	90
Fig. 4-10 Dependencia relativa de Soot con respecto a la temperatura para tres presiones ambiente características a tres regímenes de giro (1200RPM, 1600RPM y 2400RPM).	92
Fig. 4-11 Efecto de la Temperatura sobre valores absolutos de Soot para tres presiones ambiente características en tres regímenes de giro (1200RPM, 1600RPM y 2400RPM)	93
Fig. 4-12 Efecto de la variación regional de la presión atmosférica sobre la BMEP a 0°C, 20°C y 40°C	95
Fig. 4-13 Efecto de la variación local de la presión atmosférica sobre la BMEP con características de anticiclón y borrasca	96
Fig. 4-14 Efecto porcentual acumulado de la variación de la presión atmosférica sobre la BSFC a 0°C, 20°C y 40°C.....	97
Fig. 4-15 Efecto promedio de la variación local de la presión atmosférica sobre el BSFC con características de anticiclón y borrasca.....	98
Fig. 4-16 Efecto porcentual acumulado de la variación de la presión atmosférica sobre la emisión de NOx a 0°C, 20°C y 40°C	100
Fig. 4-17 Efecto de la variación local de la presión atmosférica sobre NOx con características de anticiclón y borrasca.	101
Fig. 4-18 Efecto porcentual acumulado de la variación de la presión atmosférica sobre la emisión de CO a 0°C, 20°C y 40°C.....	102
Fig. 4-19 Efecto promedio de la variación local de la presión atmosférica sobre CO con características de anticiclón y borrasca.	103
Fig. 4-20 Efecto porcentual acumulado de la variación de la presión atmosférica sobre la emisión de Soot a 0°C, 20°C y 40°C.....	104
Fig. 4-21 Efecto promedio de la variación local de la presión atmosférica sobre Soot con características de anticiclón y borrasca.	106
Fig. 4-22 Efecto de la humedad relativa ambiental sobre BMEP a 0°C, 20°C y 40°C.	107

Fig. 4-23 Efecto de la humedad relativa ambiental sobre BSFC a 0°C, 20°C y 40°C..	108
Fig. 4-24 Efecto de la humedad relativa ambiental sobre la emisión de NOx a 0°C, 20°C y 40°C	110
Fig. 4-25 Efecto de la humedad relativa sobre la emisión de CO a 0°C, 20°C y 40°C.	111
Fig. 4-26 Efecto de la humedad relativa sobre la emisión de Soot a 0°C, 20°C y 40°C	112
Fig. 4-27 Diagrama de procesos de obtención de correlaciones y coeficientes de ajuste estadísticos.....	114
Fig. 4-28 Efecto de la temperatura y la presión atmosférica sobre la BMEP. AVL BOOST™	115
Fig. 4-29 Efecto de la temperatura y la presión atmosférica sobre BSFC para cada uno de los regímenes de giro considerados	117
Fig. 4-30 Efecto de la temperatura y la presión atmosférica sobre la emisión de NOx, CO y Soot.....	119
Fig. 4-31 Comparación de valores de $BMEP_{z_{avg}}$ y $BSFC_{z_{avg}}$ – AVL BOOST™ y las correlaciones obtenidas.....	122
Fig. 4-32 Comparación de valores de $NOx_{z_{avg}}$ y $Soot_{z_{avg}}$ de AVL BOOST™ y las correlaciones obtenidas.....	123
Fig. 4-33 Comparación de valores de $CO_{z_{avg}}$ de AVL BOOST™ y las correlaciones obtenidas.....	123
Fig. 5-1 Diseño del modelo en AVL CRUISE™ aplicado al vehículo BUSSCAR Mercedes Benz MB OF-1722.....	127
Fig. 5-2 Curva característica de funcionamiento del embrague – Control AMT	130
Fig. 5-3 Perfil de Velocidad y Altitud – Recorrido Estándar Ida.....	132
Fig. 5-4 Perfil de Velocidad y Altitud – Recorrido Estándar Vuelta	133
Fig. 5-5 Diagrama de procesos de simulación con AVL CRUISE™ para las condiciones características de cada ciudad seleccionada	136
Fig. 5-6 Variables de entrada generales y estimaciones de salida de los mapas característicos desarrollados con AVL BOOST™	138

Fig. 5-7 Relación de BMEP con respecto al dosado relativo para el motor ADE360N a 0°C y el límite máximo de generación de humos	139
Fig. 5-8 Mapas característicos de V_f , para las tres ciudades seleccionadas, a diferentes regímenes de giro, a temperaturas de 0°C, 20°C y 40°C.....	141
Fig. 5-9 Mapas característicos de NO _x , para las tres ciudades seleccionadas, a diferentes regímenes de giro, a temperaturas de 0°C, 20°C y 40°C.....	143
Fig. 5-10 Mapas característicos de CO, para las tres ciudades seleccionadas, a diferentes regímenes de giro, a temperaturas de 0°C, 20°C y 40°C.....	144
Fig. 5-10 Mapas característicos de Soot, para las tres ciudades seleccionadas, a diferentes regímenes de giro, a temperaturas de 0°C, 20°C y 40°C.....	145
Fig. 6-1 Diagrama de procesos de simulación en AVL CRUISE™ para el estudio paramétrico de cada variable ambiental por separado.....	149
Fig. 6-2 Perfil de velocidad deseado, perfil de velocidad conseguido y distancia recorrida en el tramo de ida.....	149
Fig. 6-3 Perfil de velocidad deseado, perfil de velocidad conseguido y distancia recorrida en el tramo de vuelta.....	150
Fig. 6-4 Variación de BMEP a tres temperaturas características (0°C, 20°C, 40°C). Recorrido de ida.....	152
Fig. 6-5 Variación de BMEP a tres temperaturas características (0°C, 20°C, 40°C). - Recorrido de vuelta.....	152
Fig. 6-6 Perfil de velocidad y consumo de combustible acumulado en aceleración, velocidad constante y desaceleración a tres temperaturas ambiente para las tres presiones atmosféricas características. Recorrido de ida y vuelta.....	154
Fig. 6-7 Flujo másico de combustible y consumo de combustible acumulado a tres temperaturas ambiente para las tres presiones atmosféricas características. - Recorrido de ida y vuelta.....	155
Fig. 6-8 Consumo de combustible FC con respecto a la variación de la temperatura para tres presiones ambiente características en perfil real de conducción	156
Fig. 6-9 Efecto de la variación de la temperatura sobre valores absolutos de la FC_{acum} (g/km) para tres presiones ambiente características.	157

Fig. 6-10 Perfil de Velocidad y emisión de NOx_{acum} a tres temperaturas ambiente para tres presiones atmosféricas– recorrido de ida y vuelta.	158
Fig. 6-11 Efecto de la variación de la temperatura sobre valores absolutos de NOx_{acum} (g/km) para tres presiones ambiente características.	158
Fig. 6-12 Emisión de NOx_{acum} con respecto a la variación de la temperatura para tres presiones ambiente características en conducción real.....	159
Fig. 6-13 Perfil de Velocidad y emisión de CO_{acum} a tres temperaturas ambiente para tres presiones atmosféricas características - Recorrido de ida.	160
Fig. 6-14 Perfil de Velocidad y emisión de CO_{acum} a tres temperaturas ambiente para tres presiones atmosféricas características - Recorrido de vuelta.	161
Fig. 6-15 Efecto de la variación de temperatura sobre valores absolutos de CO_{acum} (g/km) para tres presiones ambiente características	161
Fig. 6-16 Emisión de CO_{acum} con respecto a la variación de la temperatura para tres presiones ambiente características en conducción real.....	162
Fig. 6-17 Perfil de Velocidad y emisión de Soot acumulada $Soot_{acum}$ a tres temperaturas ambiente para tres presiones atmosféricas características - Recorrido de ida y vuelta.	163
Fig. 6-18 Efecto de la variación de temperatura sobre valores absolutos de $Soot_{acum}$ (g/km) para tres presiones ambiente características	164
Fig. 6-19 Emisión de Soot acumulada $Soot_{acum}$ con respecto a la variación de la temperatura para tres presiones ambiente características en conducción real	164
Fig. 6-20 Efecto de la variación local de la presión atmosférica sobre la BMEP en situaciones de anticiclón y borrasca para los recorridos conducción real ...	166
Fig. 6-21 Consumo de combustible FC_{acum} con respecto a la variación de la presión atmosférica para tres temperaturas ambiente características en condiciones de conducción real.....	168
Fig. 6-22 Efecto de la variación de la presión ambiente sobre valores absolutos de FC_{acum} (g/km) a 0°C, 20°C y 40°C.....	168

Fig. 6-23 Efecto de la variación local de la presión atmosférica sobre FC_{avg} con características de anticiclón y borrasca en condiciones de conducción real 169

Fig. 6-24 Consumo de combustible NOx_{acum} con respecto a la variación de la presión atmosférica para tres temperaturas ambiente características en condiciones de conducción real..... 171

Fig. 6-25 Efecto de la variación de la presión ambiente sobre valores absolutos de NOx_{acum} (g/km) a 0°C, 20°C y 40°C. 171

Fig. 6-26 Efecto de la variación local de la presión atmosférica sobre NOx_{avg} con características de anticiclón y borrasca en recorrido de conducción real.... 173

Fig. 6-27 Consumo de combustible $Soot_{acum}$ con respecto a la variación de la presión atmosférica para tres temperaturas ambiente características en condiciones de conducción real..... 174

Fig. 6-28 Efecto de la variación de la presión ambiente sobre valores absolutos de $Soot_{acum}$ (g/km) a 0°C, 20°C y 40°C..... 175

Fig. 6-29 Efecto de la variación local de la presión atmosférica sobre $Soot_{avg}$ con características de anticiclón y borrasca en recorrido de conducción real.... 176

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Parámetros geométricos del cilindro y el mecanismo biela - manivela	22
Tabla 2-2 Parámetros geométricos del sistema de válvulas de admisión y escape	24
Tabla 2-3 Parámetros de funcionamiento de un motor de combustión	25
Tabla 2-4 Parámetros indicados de un motor de combustión.....	26
Tabla 2-5 Parámetros efectivos de un motor de combustión.....	27
Tabla 2-6 Definiciones aplicadas al estudio de carrocerías y vehículos de transporte...	34
Tabla 2-7 Tipos de movimientos comerciales interurbanos	36
Tabla 2-8 Reacciones de formación de compuestos de nitrógeno según el mecanismo de Zeldovich	42
Tabla 2-9 Reacciones de formación de monóxido de carbono según el modelo de Onorati et al.	42
Tabla 2-10 Reacciones de formación de soot según el modelo de Schubiger et al.	43
Tabla 2-11 Valores límites de emisión – Normativa Euro III	47
Tabla 2-12 Propiedades características del diésel – Normativa Euro III – INEN 1489.	48
Tabla 3-1 Información Técnica Motor ADE 360N Series	64
Tabla 3-2 Características ambientales medias de ciudades seleccionadas del Ecuador.	65
Tabla 3-3 Características Perfil Real – Aire Seco	65
Tabla 3-4 Características Perfil Real – Aire Húmedo	66
Tabla 3-5 Comparativa de los resultados del modelo en AVL BOOST™ con los datos del fabricante del motor	69
Tabla 3-6 Valores estimados de presión media efectiva BMEP y rendimiento volumétrico η_v	73
Tabla 3-7 Valores estimados de gasto de aire y gasto de combustible necesarios para el cálculo de dosado en cada ciudad.....	74
Tabla 3-8 Características aire húmedo variación de humedad relativa - Guayaquil.	76
Tabla 3-9 Características aire húmedo – variación de humedad relativa - Ambato.....	76

Tabla 3-10 Características de BMEP - variación de humedad relativa - Guayaquil.....	77
Tabla 3-11 Características de BMEP – variación de humedad relativa - Ambato.....	77
Tabla 4-1 Sensibilidad promedio de BMEP con la temperatura ambiente para tres presiones ambiente características cuando varía de forma regional debido a la altitud.....	84
Tabla 4-2 Sensibilidad de la BSFC en dos rangos de temperatura (baja – media, alta) para tres presiones ambiente características cuando ésta varía de forma regional debido a la altitud	85
Tabla 4-3 Sensibilidad promedio de BSFC con la temperatura ambiente para tres presiones ambiente características cuando varía de forma regional debido a la altitud.....	86
Tabla 4-4 Sensibilidad de NOx en dos rangos de temperatura (baja - media, alta) para tres presiones ambiente características cuando varía de forma regional debido a la altitud.....	88
Tabla 4-5 Sensibilidad de la emisión de NOx con la temperatura ambiente para tres presiones ambiente características cuando varía de forma regional debido a la altitud.....	88
Tabla 4-6 Sensibilidad de CO en dos rangos de temperatura (baja - media, alta) para tres presiones ambiente características cuando varía de forma regional debido a la altitud.....	90
Tabla 4-7 Sensibilidad de la emisión de CO con la temperatura ambiente para tres presiones ambiente características cuando varía de forma regional debido a la altitud.....	91
Tabla 4-8 Sensibilidad de la emisión de Soot con la temperatura ambiente para tres presiones ambiente características cuando varía de forma regional debido a la altitud.....	92
Tabla 4-9 Sensibilidad de Soot en dos rangos de temperatura (baja - media, alta) para tres presiones ambiente características cuando varía de forma regional debido a la altitud.....	93

Tabla 4-10 Sensibilidad de BMEP en tres rangos de temperatura para dos presiones ambiente características cuando varía de forma regional debido a la altitud	94
Tabla 4-11 Sensibilidad local de la BMEP en presencia de anticiclón y borrasca (± 2 kPa _{atm}) para tres presiones ambiente características a 20°C.....	95
Tabla 4-12 Sensibilidad de BSFC en tres rangos de temperatura (baja, media y alta) para dos presiones ambiente características cuando ésta varía de forma regional debido a la altitud	97
Tabla 4-13 Sensibilidad local de la BSFC en presencia de anticiclón y borrasca (± 2 kPa _{atm}) para tres presiones ambiente características a 20°C.....	98
Tabla 4-14 Sensibilidad de NOx en tres rangos de temperatura (baja, media y alta) para dos presiones ambiente características cuando ésta varía de forma regional debido a la altitud.	99
Tabla 4-15 Sensibilidad local de la emisión de NOx en presencia de anticiclón y borrasca (± 2 kPa _{atm}) para tres presiones ambiente características a 20°C.	100
Tabla 4-16 Sensibilidad de CO en tres rangos de temperatura (baja, media y alta) para dos presiones ambiente características cuando ésta varía de forma regional debido a la altitud	102
Tabla 4-17 Sensibilidad local de la emisión de CO en presencia de anticiclón y borrasca (± 2 kPa _{atm}) para tres presiones ambiente características a 20°C.	104
Tabla 4-18 Valores promedio de emisión de Soot en presencia de anticiclón y borrasca (± 2 kPa _{atm}) para tres presiones ambiente características.	105
Tabla 4-19 Sensibilidad local de la emisión de Soot en presencia de anticiclón y borrasca (± 2 kPa _{atm}) para tres presiones ambiente características a 20°C.	106
Tabla 4-20 Valores promedio de BMEP para dos presiones ambiente características – Variación de Humedad Relativa.....	108
Tabla 4-21 Valores promedio de BSFC para dos presiones ambiente características – Variación de Humedad Relativa.....	109
Tabla 4-22 Valores promedio de NOx para dos presiones ambiente características – Variación de Humedad Relativa.....	110

Tabla 4-23 Valores promedio de CO para dos presiones ambiente características – Variación de Humedad Relativa.....	112
Tabla 4-24 Valores promedio de Soot para dos presiones ambiente características – Variación de Humedad Relativa.....	113
Tabla 4-25 Δ BMEP/ Δ Tamb para Guayaquil, Santa Isabel y Ambato	115
Tabla 4-26 Δ BMEP/ Δ Patm para 0°C, 20°C y 40°C.	116
Tabla 4-27 Δ BSFC/ Δ Tamb para Guayaquil, Santa Isabel y Ambato	118
Tabla 4-28 Δ BSFC/ Δ Patm para 0°C, 20°C y 40°C.....	118
Tabla 4-29 Δ ER/ Δ Tamb para Guayaquil, Santa Isabel y Ambato	120
Tabla 4-30 Δ ER/ Δ Patm para 0°C, 20°C y 40°C.....	120
Tabla 4-31 Estudio de R ² y error típico.....	121
Tabla 5-1 Características constructivas BUSSCAR Bus 340 – Mercedes Benz MB OF-1722	125
Tabla 5-2 Variables de control para Mercedes Benz MB G 85-6 (Gear Box Control) en condiciones de cambio con respecto al régimen de giro	129
Tabla 5-3 Variables de control de AMT para control y manejo del embrague.....	129
Tabla 5-4 Variables de configuración inicial del Cockpit.....	130
Tabla 5-5 Variables específicas del conductor dentro del cycle run	131
Tabla 5-6 Datos característicos de recorrido estándar (ida y vuelta)	133
Tabla 5-6 Variables de configuración de Cycle Run con método de cálculo Quasi-Stationary.....	134
Tabla 5-7 Propiedades del módulo motor ADE360N en AVL CRUISE™	135
Tabla 6-1 Sensibilidad promedio de BMEP con la temperatura ambiente para tres presiones ambiente características en condiciones de conducción real.....	151
Tabla 6-2 Sensibilidad de FC _{acum} con la variación de la temperatura para tres presiones ambiente características en condiciones de conducción real.....	153

Tabla 6-3 Consumo de combustible FC_{acum} en aceleración, velocidad constante y desaceleración con respecto a la variación de la temperatura para tres presiones ambiente características	153
Tabla 6-4 Sensibilidad de NOx_{acum} con la variación de la temperatura para tres presiones ambiente características en condiciones de conducción real.....	157
Tabla 6-5 Sensibilidad de CO_{acum} con la variación de la temperatura para tres presiones ambiente características en condiciones de conducción real.....	160
Tabla 6-6 Sensibilidad de $Soot_{acum}$ con la variación de la temperatura para tres presiones ambiente características en condiciones de conducción real.....	162
Tabla 6-7 Sensibilidad de BMEP en tres rangos de temperatura (baja, media y alta) para dos presiones ambiente características cuando esta varía de forma regional debido a la altitud en condiciones de conducción real	165
Tabla 6-8 Sensibilidad local de la BMEP en presencia de anticiclón y borrasca (± 2 kPa_{patm}) para tres presiones ambiente características a 20°C en recorrido de conducción real (ida y vuelta).	166
Tabla 6-9 Sensibilidad de FC_{acum} en tres rangos de temperatura (baja, media y alta) para dos presiones ambiente características cuando esta varía de forma regional debido a la altitud en condiciones de conducción real	167
Tabla 6-10 Sensibilidad local de FC_{avg} en presencia de anticiclón y borrasca (± 2 kPa_{patm}) para tres presiones ambiente características a 20°C en recorrido de conducción real (ida y vuelta).	169
Tabla 6-11 Sensibilidad de NOx_{acum} en tres rangos de temperatura (baja, media y alta) para dos presiones ambiente características cuando esta varía de forma regional debido a la altitud en condiciones de conducción real	170
Tabla 6-12 Sensibilidad local de NOx_{avg} en presencia de anticiclón y borrasca (± 2 kPa_{patm}) para tres presiones ambiente características a 20°C en recorrido de conducción real (ida y vuelta).	172
Tabla 6-13 Sensibilidad de $Soot_{acum}$ en tres rangos de temperatura (baja, media y alta) para dos presiones ambiente características cuando esta varía de forma regional debido a la altitud en condiciones de conducción real	173

Tabla 6-14 Sensibilidad local de $Soot_{avg}$ en presencia de anticiclón y borrasca (± 2 kPa $_{atm}$) para tres presiones ambiente características a 20°C en recorrido de conducción real (ida y vuelta). 175

Nomenclatura

Variable	Definición
δ_h	Relación aire seco – aire húmedo $\delta_h = \left(\frac{1}{1+\omega}\right)$
ε_{ren}	Coefficiente del grado de renovabilidad del combustible
ϕ	Humedad relativa
$\rho_{a.seco}$	Densidad del aire seco
$\rho_{a.hum}$	Densidad del aire húmedo
\mathfrak{R}	Constante universal de los gases
ψ	Relación de fracciones molares Nitrógeno - Oxígeno $\left(\psi = \frac{X_{N_2}}{X_{O_2}}\right)$
ψ_{ref}	Valor de ψ a altitudes de referencia
σ_a	Factor de influencia del aire seco en el proceso de combustión
τ_{char}	Tasa de liberación de calor global
ω	Humedad absoluta
$BMEP_{ref}$	Presión media efectiva de referencia
$BMEP_z$	Presión media efectiva a una altitud z
$CO2_{x,z}$	Tasa de emisión de CO2 para un combustible de composición $C_nH_mO_pS_u$ a una altitud z
$e_{CO2_{x,z}}$	Factor de emisión de CO2 para un combustible de composición $C_nH_mO_pS_u$
$e_{CO2_{ref}}$	Factor de emisión de CO2 para un combustible de referencia
EE_i	Índice de emisión en función de la potencia efectiva desarrollada por el motor
EI_i	Índice de emisión para la especie contaminante i
F_r	Dosado relativo (<1 motores diésel)
F_{st}	Dosado estequiométrico
g	Aceleración de la gravedad
H_V	Poder calorífico del diésel
i	Tipo de motor (1/2 para 4 tiempos)
K_{hum}	Factor de corrección de la densidad del aire húmedo

K_T	Gradiente térmico
m	Número de moles de hidrógeno en el combustible
m_i	Masa de la especie contaminante
$m_{a.seco}$	Masa de aire seco
\dot{m}_{f_n}	Masa de consumo de combustible a punto n dentro del ciclo
m_{H_2O}	Masa de vapor de agua
n	Número de moles de carbono en el combustible
$N_{e_{ref}}$	Potencia efectiva de referencia
N_{e_z}	Potencia efectiva a una altitud z
$N_{i_{ref}}$	Potencia indicada de referencia
N_{i_z}	Potencia indicada a una altitud z
p	Número de moles de oxígeno en el combustible
PM_a	Peso molar del aire
$PM_{a.hum}$	Peso molar del aire húmedo
PM_i	Peso molar del componente i
PM_{N_2}	Peso molar del nitrógeno
PM_{O_2}	Peso molar del oxígeno
P_{ref}	Presión atmosférica de referencia
P_z	Presión atmosférica a una altitud z
P_{sat}	Presión de saturación del agua
P_{vap}	Presión del vapor de agua
Q_{lib}	Unidad de energía liberada por el combustible
R_a	Constante específica del aire $\left(R_a = \frac{R}{PM_a}\right)$
t	Temperatura en Celsius
T	Temperatura en Kelvin
T_{ref}	Temperatura atmosférica de referencia
T_z	Temperatura atmosférica a una altitud z
u	Número de moles de azufre en el combustible
$X_{i_{ref}}$	Fracción molar de referencia del componente i
\dot{V}_{f_n}	Volumen de consumo de combustible para punto n del ciclo de funcionamiento

X_{H_2O}	$mol_{H_2O} / mol_{a.seco}$ fracción molar aire húmedo $\left(X_{H_2O} = \omega \cdot \frac{PM_{a.dry}}{PM_{H_2O}}\right)$
X_{N_2}	Fracción molar del nitrógeno
X_{O_2}	Fracción molar del oxígeno
z	Altitud
z_{ref}	Altitud de referencia

CAPÍTULO 1

Introducción

1. Introducción.....	2
1.1. Antecedentes y justificación de la investigación	2
1.2. Objetivos	7
1.3. Hipótesis de Partida.....	8
1.4. Metodología	9
1.5. Desarrollo del documento	10

1. Introducción

1.1. Antecedentes y justificación de la investigación

La configuración orográfica de las diferentes regiones de Latinoamérica, especialmente del Ecuador, con diferencia considerable de altitud, temperatura y humedad, provoca una influencia importante en las prestaciones, consumo de combustible y emisión de gases contaminantes, obteniéndose resultados que difieren de los propuestos bajo los parámetros de diseño iniciales, y cuyas proyecciones estimadas se requieren analizar a profundidad desde un punto de vista teórico y práctico.

El origen de la problemática persistente, no tan solo de forma específica en la ciudad de Ambato (Ecuador), sino en gran parte del territorio ecuatoriano y latinoamericano, es el consumo de grandes cantidades de energía por parte del transporte motorizado, tal como apuntan (PBMC, 2016), donde "... en el ámbito mundial, la energía consumida en el sector transporte corresponde al 48% de la demanda total de petróleo y se estima que llegue al 77% en el 2020". Dichos consumos se ven reflejados en informes, como el presentado por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), quienes expusieron que, en países como Ecuador, además de otros pertenecientes a América Latina y el Caribe, la mayor parte del consumo se identificaba, para el año 2007, en forma de gasolina (49,9%) y diésel (41,5%), lo que caracteriza la importancia de estos combustibles en el área de la movilidad.

Estudios realizados sobre la contaminación del aire publicado en diarios nacionales del Ecuador (Comercio, 2016), demuestran que más de un cuarto de las ciudades de América Latina y el Caribe duplican o triplican los límites considerados como perjudiciales para la salud de sus ciudadanos (Fig. 1-1), debido principalmente a la presencia de vehículos de transporte urbano sin tecnologías de control de emisiones Euro I, Euro II, ni Euro III, sumado a la baja calidad de los combustibles.

Centrándose sobre los niveles de contaminación en la República del Ecuador, resultados de contados seguimientos realizados por el gobierno en el pasado apuntan a que, tal como lo señala (Mayorga et al., 2020) sobre la calidad del aire en las ciudades, se hayan registrado valores de 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Quito, 33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Santo Domingo, 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Milagro, mientras tanto que Ambato tiene 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ medidos en PM 2,5 con un límite

nacional de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cabe recalcar que esta estimación de contaminación combina tanto fuentes móviles y fijas, por cuanto existen otras limitaciones como la no existencia de un registro de monitoreo especializado en ninguna de las urbes, agregado a que los centros de supervisión no mantienen tecnologías modernas de seguimiento.

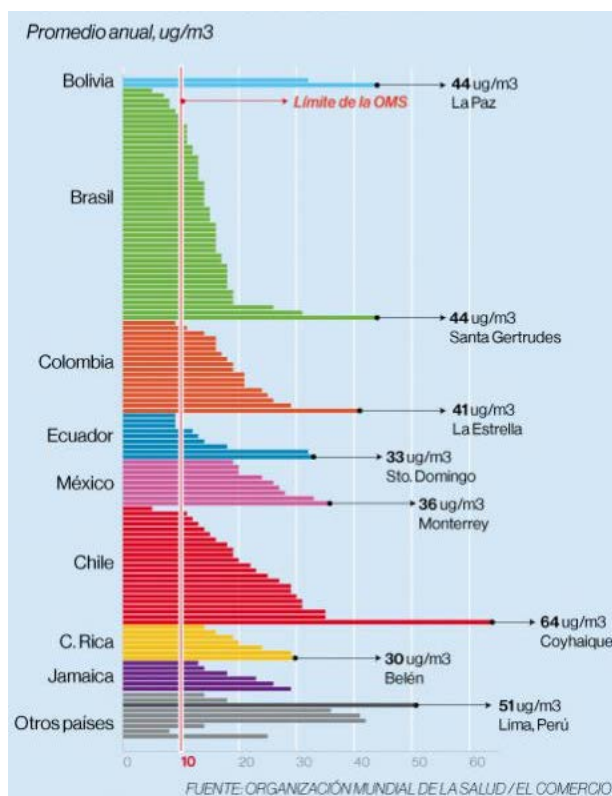


Fig. 1-1 Calidad del aire (medido en PM 2.5) de las ciudades de América Latina

La situación actual de la gestión ambiental en el Ecuador, como bien lo explica (Páez, 2012), es resultado de una nula articulación de la política ambiental, económica, social y tecnológica, que en palabras de los propios organismos oficiales se expresa en una débil institucionalidad ambiental. Este grado de deficiencia sobre el control de emisiones se debe, de forma resumida, a los siguientes factores:

- La falta de mecanismos articulados, sistemáticos y transparentes de seguimiento del cumplimiento de convenios internacionales, leyes nacionales y normas sectoriales o seccionales (Interamericano, 2007), que han dado paso a la aparición de conflictos socio ambientales asociados a casi todos los proyectos de desarrollo que se plantean o ejecutan a nivel nacional.
- Políticas, leyes, estrategias y reglamentos ambientales, que pese a su aparente amplitud, son insuficientes y desarticulados, y en algunos casos desactualizados;

donde por ejemplo, no existen políticas nacionales para el manejo de todos los recursos y las pocas políticas de control de emisiones se centran principalmente en sus tres ciudades principales: Quito, Cuenca y Guayaquil (Hernández et al., 2010).

- Una mínima participación de las instituciones públicas en la investigación experimental del fenómeno de contaminación disgregada por tipo de fuentes, existiendo así escasas centrales de seguimiento, con formación desactualizada, sin tecnología adecuada, ni medios de simulación efectivos en búsqueda del abaratamiento de costes de manutención de laboratorios especializados.

A la deficiente política gubernamental e institucional para el control de la contaminación medioambiental se suma otro factor muy importante, la calidad del combustible. Desde una perspectiva regional, en América Latina solamente países como Brasil, Chile o Argentina mantienen estándares de calidad Euro V en sus combustibles, donde Ecuador se encuentra entre los países con peor combustible de la región (Euro II para gasolinas, Euro I para diésel), por debajo de otras naciones con calidad intermedia de combustible como México, Colombia (Euro IV) y Uruguay, Perú (Euro III) (Fig. 1-2) (AEADE, 2020b).



Fig. 1-2 Calidad de los combustibles, según normas Euro, para diferentes países de Latinoamérica (AEADE, 2020b)

Dentro de esta deficiente calidad del combustible, específicamente en el diésel, en la República del Ecuador el contenido de azufre supera los estándares internacionales y

regionales en la actualidad (Fig. 1-3). Incluso, tal como lo apunta (AEADE, 2020a), la misma norma técnica autoriza una mayor cantidad de azufre en el diésel (NTE INEN 1489), pues establece un límite máximo de hasta 500 partes por millón (ppm) de azufre.



Fig. 1-3 Calidad del diésel, según el contenido en ppm de azufre, para diferentes países de Latinoamérica (AEADE, 2020a)

La problemática sobre el contenido de azufre en el diésel en el Ecuador pasa de ser un problema generalizado a existir una gran variación de acuerdo al expendio en determinadas ciudades de la nación. Así, por ejemplo, si consideramos una media nacional de 104.8 ppm, existe una concentración de +57.44% y +50.76% superior en las ciudades de Quito y Santo Domingo, mientras que en ciudades como Guayaquil y Cuenca se mantienen en valores menores (-80.91% y -50.38% respectivamente).

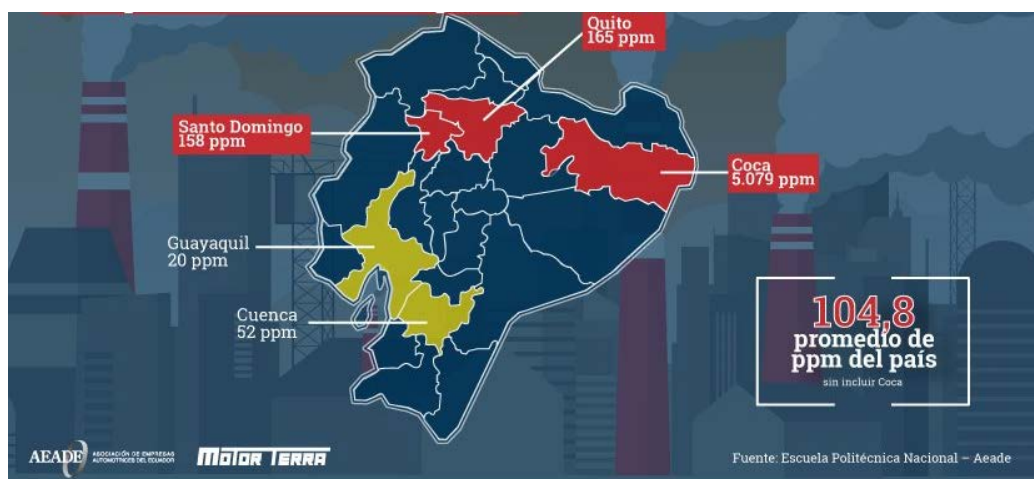


Fig. 1-4 Calidad del diésel, según el contenido en ppm de azufre, para diferentes ciudades del Ecuador (AEADE, 2020a)

La deficiente calidad en los combustibles provoca un tercer componente dentro de este complejo sistema, la demanda creciente del uso del transporte público en un parque automotor con dificultades para su renovación.

En la actualidad, la normativa superior de control de emisiones que se maneja en los vehículos de transporte público en el Ecuador es Euro III, aplicada desde enero del 2017, con un alto índice de unidades con normas inferiores, y muchas de ellas sin ninguna medida de control, por tanto, es importante poder establecer medios de estimación eficientes, de bajos costes económicos para la administración, dentro de una normativa que permanecerá vigente dentro a corto y mediano plazo.

Es así que, el presente análisis parte de la necesidad de las ciudades de establecer de forma específica el desarrollo estimado de dichos parámetros en la movilidad y el transporte público, con la finalidad de poder posteriormente realizar políticas de control y regulación a nivel local y regional. Esta serie de propuestas estarían enmarcadas dentro de una agenda ambiental por parte de entidades nacionales de control de las emisiones contaminantes en el transporte, como lo es el departamento de tráfico y control de la calidad del aire del Gobierno Autónomo Descentralizado del Municipio de Ambato (GADMA), cuyos ejes estratégicos son:

- Reducción de la contaminación ambiental.
- Consolidación de la autoridad para la prevención y el control de la contaminación y fortalecimiento de la institucionalidad ambiental.
- Fomento de la educación ambiental y la participación ciudadana.
- Reducción de las emisiones contaminantes, de fuentes estáticas y móviles.
- Optimización de las capacidades de conformación en políticas ambientales.
- Información y registros de evolución de sistemas originarios de contaminación.

El desarrollo de un estudio investigativo sobre estimación de prestaciones, consumo de combustible y emisiones contaminantes a la atmósfera, para ciudades del Ecuador, se justifica de forma paralela a investigaciones previas como la desarrollada por (Tapia et al., 2010), sobre inventarios preliminares de emisiones de contaminantes del aire en varios cantones de la nación ecuatoriana dentro del Proyecto de Calidad del Aire III con año base 2010.

La influencia individual de cada uno de los factores ambientales estudiados se presenta a través de una serie de coeficientes de sensibilidad, basados tanto en valores absolutos como en porcentajes relativos, respecto a la variación de temperatura atmosférica (°C), presión (bar) y humedad relativa (%). En una primera etapa de desarrollo, se caracterizan el rendimiento y el consumo de combustible bajo condiciones de referencia, proporcionadas por el fabricante, para posteriormente visualizar su comportamiento bajo las condiciones ambientales propias de cada una de las ciudades.

Si bien resulta evidente el efecto combinado de la variación de estos tres factores ambientales (temperatura, presión atmosférica y humedad ambiental) sobre las prestaciones, el consumo de combustible y las emisiones de gases contaminantes, la parametrización del efecto individual de cada uno de estos factores es de gran relevancia, tal como se ha realizado en este trabajo. Esto resulta de gran utilidad principalmente en lugares con una mayor diferencia entre sus valores medios anuales debido a su configuración orográfica, como lo es el caso de Ecuador, o incluso variaciones en los puntos extremos de líneas de transporte de pasajeros o mercancías, donde la diferencia de altitud entre dichos puntos puede ser superior de 2500m.

1.2. Objetivos

La presente investigación tiene como objetivo principal de estudio el análisis de prestaciones, consumo de combustible y emisiones en motores de combustión interna alternativos MCIA diésel de vehículos de transporte público por efecto de la diferencia de altitud, humedad y temperatura en las regiones del Ecuador, con la finalidad de estimar las características productivas de las unidades, su proyección de emisión individual y conjunta, así como comprender de forma teórica, por simulación y práctica la influencia de los parámetros anteriormente señalados en los procesos de combustión.

Para cumplir con este objetivo principal, se definieron los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una investigación específica sobre fundamentos conceptuales, estado de la técnica e investigaciones aplicadas previas sobre la influencia de parámetros ambientales externos en los procesos de combustión en motores de automoción diésel.

- Establecer conceptualmente la influencia de la diferencia de parámetros ambientales como la altitud, la temperatura y la humedad, en las características de prestaciones obtenidas, así como en el consumo de combustible y emisiones en MCI A diésel en el caso específico de las unidades de transporte público en el Ecuador.
- Utilizar códigos de simulación del sistema de propulsión y del vehículo en su conjunto que puedan utilizarse para analizar la influencia de los parámetros ambientales externos mencionados, manteniendo la relación con los fundamentos conceptuales expuestos, para poder estimar las prestaciones, el consumo de combustible y las emisiones contaminantes.
- Establecer el efecto de las condiciones ambientales sobre el mapa de características del motor, en una primera fase, y obtener expresiones analíticas en forma de correlaciones de las prestaciones y las emisiones con respecto a la presión y la temperatura ambiente.
- Establecer, en una segunda fase, el efecto de dichas condiciones sobre el comportamiento de un vehículo en recorridos de conducción, considerando perfiles reales de altitud, temperatura, velocidad, comportamiento del conductor, entre otros factores.

Todos los conceptos y los cálculos se han realizado aplicados al caso de un motor diésel de aspiración natural (ADE360N), representativo de un sistema de propulsión de autobuses en Ecuador, al igual que el propio modelo de autobús considerado (BUSSCAR Bus 340 – Mercedes Benz MB OF-1722).

1.3. Hipótesis de Partida

A través del análisis de prestaciones, consumo de combustible y emisiones contaminantes en MCI A Diésel de vehículos de transporte público considerando los efectos de la diferencia de altitud, temperatura y humedad en diferentes regiones de Ecuador, se podrá comprender la contribución directa de estos factores externos en las características de funcionamiento de los vehículos de transporte en casos específicos con configuración orográfica típica de las regiones de América del Sur.

1.4. Metodología

Los tipos de investigación que se utilizarán para el desarrollo del proyecto de tesis doctoral son los siguientes:

- **Análisis del estado de la técnica.** Este análisis permitirá partir de documentación ya establecida, teniendo como referencia que el campo de investigación bibliográfico en cuanto al desarrollo de los procesos de combustión interna es amplio y existen muchos documentos a nivel nacional e internacional con cifras y datos técnicos que ayudaran en gran medida al entendimiento y puesta en marcha del proyecto.
- **Planteamiento teórico y de simulación.** Con base en la investigación bibliográfica, y determinación de una serie de ecuaciones que dispongan el fenómeno desde un punto de vista teórico, es necesario asociarla con la determinación del fenómeno a través de programas de simulación específicos (AVL CRUISETM, AVL BOOSTTM, COPERT) que nos permitan estimar dicha influencia en la problemática planteada, y además si fuera posible llevar un registro de medición in situ de los parámetros cuando sea factible, tomando en cuenta todos los procesos indicados para que dicha medición sea considerada válida.
- **Recopilación de resultados de estimación mediante estudios paramétricos.** A través de la aplicación del código, cumplimentado con una fase de simulación mediante software especializado y convalidación con respecto a valores de referencia, se podrán obtener mediciones de los parámetros de prestaciones, consumo de combustible y emisiones en MCIA Diésel y tener un diagnóstico del problema, obteniendo resultados que a posteriori pudieran determinar alternativas de solución directamente relacionadas con la problemática planteado, o en su defecto aportar científicamente a la comprensión profunda de la participación de los factores externos como la diferencia de altitud, temperatura y humedad.

1.5. Desarrollo del documento

Para facilitar la comprensión de la presente tesis doctoral, a continuación, se detalla un breve resumen del contenido de cada uno de sus capítulos. En el **primer capítulo** se presentan los antecedentes y justificación, que llevó a la realización de la presente investigación, en conjunto con los objetivos e hipótesis planteada para su desarrollo.

En el **segundo capítulo** se hace un recorrido por los diferentes conceptos y fundamentos, dentro del estado de la técnica, sobre la influencia de los parámetros ambientales tanto en el comportamiento del motor diésel, así como una serie de planteamientos sobre el efecto de la altitud sobre la composición del aire seco, el aire húmedo, el dosado estequiométrico, la emisión de CO₂, rendimientos, parámetros indicados, parámetros efectivos, prestaciones, entre otros.

En el **tercer capítulo** se expone un primer acercamiento sobre la simulación de las prestaciones y emisiones de un motor diésel de aspiración natural, aplicando el paquete informático AVL BOOST™. En este capítulo, inicialmente se presenta el modelo de simulación para el motor ADE360N seleccionado, los datos de entrada de las ciudades seleccionada de acuerdo a la configuración orográfica del Ecuador, tanto en condiciones de aire seco como aire húmedo, para posteriormente reproducir las prestaciones provistas por el fabricante, tanto en condiciones de referencia, como en las condiciones ambiente características de acuerdo a la altitud.

En el **cuarto capítulo** se realiza un estudio completo del efecto de las variables ambientales sobre las prestaciones y emisiones del motor diésel, con análisis individual del efecto de la variación de la temperatura (con variación de 0°C a 40°C en registros intermedios cada 5°C), variación de la presión atmosférica (de tipo regional a 0°C, 20°C y 40°C, así como local con presencia de anticiclón (+2 kPa_{atm}) y borrasca (-2 kPa_{atm})) y variación de la humedad relativa (con base a cuatro escenarios: 0% aire seco, 40%, 60% y 100% de humedad relativa). Al final de este apartado se establecen una serie de correlaciones estadísticas de efecto combinado de la temperatura y la presión atmosférica, así como su posterior evaluación de la bondad de la aproximación estadística de los resultados obtenidos.

En el **quinto capítulo** se presentan las condiciones de simulación para la estimación de prestaciones y emisiones de un autobús diésel, con aplicación de perfiles de conducción reales en el paquete informático AVL CRUISE™. En este capítulo se muestran todas las características más importantes del sistema de propulsión y del vehículo, la configuración de las condiciones de simulación, el establecimiento de condiciones de conducción representativas para los recorridos de ida y vuelta estudiados, así como la posterior vinculación de curvas características del motor obtenidas en AVL BOOST™ para representación efectiva de la variación de las condiciones ambientales en AVL CRUISE™.

En el **sexto capítulo** se exhiben los resultados de las condiciones de funcionamiento de la unidad de transporte público seleccionada, un BUSSCAR Bus 340 – Mercedes Benz MB OF-1722. Se estudia la influencia, de igual manera que en capítulos anteriores, de forma individual, por un lado, el efecto de la temperatura ambiente sobre la BMEP, el consumo de combustible y las distintas emisiones, para posteriormente evaluar la influencia de la variación de la presión atmosférica en los mismos casos. Se agregan una serie de factores de consumo de combustible, y factores de emisión, así como su relación con otros valores de referencia tanto del inventario europeo de emisiones, como de investigaciones previas.

Finalmente, en el **séptimo capítulo** se recopilan todas las conclusiones arrojadas de los capítulos anteriores, en conjunto con las principales aportaciones obtenidas de la presente investigación, y sugerencias de futuros trabajos a realizar tomando como punto de partida la presente tesis doctoral.

Los **anexos** presentados recogen, por un lado, los extractos de las normas INEN ecuatorianas utilizadas: norma NTE INEN 1489 sobre “Productos derivados del petróleo. Diésel. Requisitos”, norma NTE INEN 2656:2012 sobre “Clasificación Vehicular” y, por otro lado, los artículos publicados en journals indexados y abstracts presentados en conferencias internacionales.

CAPÍTULO 2

Fundamentos conceptuales y estado de la técnica

2.	Fundamentos conceptuales y estado de la técnica.....	15
2.1.	Fundamentos de influencia de la altitud sobre la composición del aire y el proceso de combustión	15
2.1.1.	Efecto de la altitud sobre la composición del aire seco	15
2.1.2.	Efecto de la altitud sobre la composición del aire húmedo.....	18
2.1.3.	Efecto de la altitud sobre dosado estequiométrico y emisión de CO ₂	20
2.2.	Fundamentos de operación y funcionamiento de motores diésel de aspiración natural.....	21
2.2.1.	Parámetros geométricos	22
2.2.2.	Parámetros de funcionamiento	24
2.2.3.	Parámetros indicados y efectivos	26
2.2.4.	Curvas características	27
2.3.	Fundamentos de operación y prestaciones de autobuses de motor diésel.....	32
2.3.1.	Categorización de vehículos autobuses.....	32
2.3.2.	Ciclos de operación y recorrido tipo	35
2.3.3.	Factores de influencia en el consumo y emisiones en autobuses.....	37
2.4.	Fundamentos y modelos de emisiones contaminantes.....	39

2.4.1. Formación y parámetros de caracterización de emisiones.....	39
2.4.2. Modelos de formación emisiones contaminantes	41
2.4.3. Normativa de control de emisiones Euro III.....	44
2.5. Revisión del estado de la técnica sobre el efecto de las condiciones ambientales en motores y vehículos diésel	48
2.5.1. Efectos sobre el comportamiento de motores diésel.....	49
2.5.2. Efectos sobre autobuses transporte público de pasajeros con motor diésel.	56

2. Fundamentos conceptuales y estado de la técnica

2.1. Fundamentos de influencia de la altitud sobre la composición del aire y el proceso de combustión

Como punto de partida hacia la evaluación de la influencia de la altitud, con variación de sus respectivas condiciones ambientales, es importante definir el proceso de combustión en MCIAs como la reacción química de oxidación de las sustancias combustibles de fórmula general $C_nH_mO_pS_z$, con participación principalmente del aire (compuesto de oxígeno O_2 , nitrógeno N_2 y otros gases en menor cantidad), tanto en ausencia de la humedad ambiental, como en presencia relativa de la misma (Velasco Hurtado & Velasco Villarroel, 2014). Como resultado de la reacción se obtiene un conjunto de productos, principalmente gases contaminantes (CO_2 , CO , SO_2 , O_{2res} , NO_x , H_2O), además de residuos en forma de partículas Soot (Fig. 2-1).

Combustible		Aire Húmedo		Productos
Carbón	+	Oxígeno	=	CO_2
Hidrógeno		Nitrógeno		CO
Oxígeno		Vapor de Agua		H_2O
Azufre				O_2
				NO_x
				SO_2
				PM

Fig. 2-1 Reactivos y Resultantes – Combustión MCIAs

De esta forma, resulta primordial formular una reacción química de combustión completa, partiendo de la premisa que, tanto la cantidad de oxígeno y de nitrógeno, así como la humedad del aire, son variables dependientes de la altitud y de las condiciones ambientales. Para una mejor comprensión del efecto de estas condiciones, inicialmente se presenta el impacto de dichas condiciones sobre la composición del aire seco y, en segundo lugar, se considera además el efecto del vapor de agua (humedad ambiental).

2.1.1. Efecto de la altitud sobre la composición del aire seco

De acuerdo a (Velasco Hurtado & Velasco Villarroel, 2014), cuando se realiza la combustión a altitudes superiores a la del nivel de mar, las propiedades de los combustibles sólidos y líquidos prácticamente no sufren efectos, pero las propiedades del

aire si sufren una variación significativa. Como primera aproximación se propone considerar la combustión con aire seco, sin incluir la humedad ambiente, a fin de poner de manifiesto el efecto de la altitud sobre la composición del aire.

Al crecer la altitud sobre el nivel del mar (expresada como m.s.n.m., metros sobre el nivel del mar), la presión del aire disminuye debido a la reducción del peso de la columna de aire que soporta, dando lugar a una menor densidad del aire, pero también un cambio de la proporción relativa entre el oxígeno y el nitrógeno. Además, la temperatura se reduce en general, sobre todo si se consideran grandes variaciones de la altitud, si bien es preciso considerar con más detalle esta variación.

Para analizar la relación existente entre la presión atmosférica y la temperatura al variar la altitud, es habitual considerar diferentes perfiles térmicos de la columna de aire a estudiar. Por ejemplo, si se examinara esta relación suponiendo que la temperatura es uniforme al variar la altitud (columna isoterma), la presión atmosférica resultante P y la composición del aire X_i , tanto para el oxígeno como para el nitrógeno, resultan ser funciones exponenciales de la altitud z , dadas por las siguientes expresiones:

$$P_z = P_{ref} e^{-\frac{gz}{R_a T}} \quad (2-1)$$

$$X_{i_z} = X_{i_{ref}} e^{-\frac{gz}{RT}(PM_i - PM_a)} \quad (2-2)$$

Una segunda alternativa consiste en considerar que la temperatura disminuye linealmente al incrementarse la altitud, con un gradiente térmico constante, de manera que $dT = K_T dz$, siendo K_T negativo (valor típico $K_T = -7.41 \times 10^{-3} \frac{K}{m}$), lo que da lugar a un perfil triangular de temperatura de la columna de aire. Aun no siendo tampoco un modelo exacto, sí permite reproducir mejor el comportamiento de la atmósfera real. De esta forma, el cálculo de la presión atmosférica a una altitud determinada, y la fracción molar de oxígeno y nitrógeno vienen dados por dependencias potenciales de la temperatura, que a su vez se reduce linealmente con la altitud, a través de las siguientes fórmulas:

$$T_z = T_{ref} + K_T(z - z_{ref}) \quad (2-3)$$

$$P_z = P_{ref} \left(\frac{T_z}{T_{ref}} \right)^{-\frac{g}{R_a K_T}} \quad (2-4)$$

$$X_{i_z} = X_{i_{ref}} \left(\frac{T_z}{T_{ref}} \right)^{-\frac{g}{R_a K T} (P_{M_i} - P_{M_a})} \quad (2-5)$$

Es preciso indicar que, en las expresiones se establece una diferencia entre la constante universal de los gases R y el valor particular de la constante del aire R_a (ligeramente dependiente de la altitud).

Dado que el peso molar del oxígeno es mayor que el peso molar del aire, mientras que el del nitrógeno es menor, tanto en Ec. (2-2) como en Ec. (2-5) el exponente resulta negativo para el oxígeno y positivo para el nitrógeno. Como consecuencia, las fracciones molares del oxígeno y del nitrógeno cambian con la altitud de forma contraria, por lo que la relación entre la cantidad de nitrógeno y oxígeno en el aire depende de la altitud. Para considerar de forma generalizada el efecto de las condiciones ambiente en el proceso de combustión se utilizará la siguiente relación ψ :

$$\psi = \frac{X_{N_2}}{X_{O_2}} \quad (2-6)$$

Tomando en cuenta las dos posibilidades para la dependencia de la temperatura con la altitud, Ec. (2-2) para un perfil isoterma y Ec. (2-5) para un perfil triangular con un gradiente térmico $dT = K_T dz$, la relación ψ se puede expresar de forma análoga a la desarrollada para la presión atmosférica.

$$\psi_z = \psi_{ref} \cdot e^{-\frac{g z}{R T} (P_{M_{N_2}} - P_{M_{O_2}})} \quad (2-7)$$

$$\psi_z = \psi_{ref} \cdot \left(\frac{T_z}{T_{ref}} \right)^{-\frac{g}{R_a K T} (P_{M_{N_2}} - P_{M_{O_2}})} \quad (2-8)$$

Como se ha indicado, la diferencia entre los pesos molares del nitrógeno y del oxígeno es negativa y como consecuencia, tanto en la Ec. (2-7) como en la Ec. (2-8) se obtiene que ψ aumenta con la altitud.

Para tener en cuenta la dependencia de la relación ψ en la reacción de combustión, se define un parámetro σ_a cuya expresión viene dada por la Ec. (2-9).

$$\sigma_a = \frac{1}{PM_{O_2} + PM_{N_2}\psi} = \frac{1}{32 + 28\psi} \quad (2-9)$$

Además, considerando el aire como gas ideal, para el cálculo de la densidad del aire seco (sin contenido de humedad), la ecuación del estado del gas ideal se expresa de la siguiente manera:

$$\rho_{a.seco,z} = \frac{P_z}{R_{a,z}T_z} \quad (2-10)$$

2.1.2. Efecto de la altitud sobre la composición del aire húmedo

Si bien es cierto que el análisis dentro de un entorno con aire seco es correcto, para una mayor aproximación al fenómeno generalizado de influencia de las condiciones ambiente, es necesario adicionar la participación de la humedad ambiental, con base en expresiones formuladas a partir, tanto de la humedad relativa, como de la humedad absoluta (Gómez-Acebo, 2004).

Se define como humedad absoluta del aire la relación entre la cantidad de vapor de agua presente y la cantidad de aire seco:

$$\omega = \frac{m_{H_2O}}{m_{a.seco}} \quad (2-11)$$

Es habitual considerar la humedad relativa ϕ , definida como la relación entre la presión de vapor del agua contenida en un cierto volumen de aire y la presión de saturación a dicha temperatura, la cual es sólo función de la temperatura:

$$\phi = \frac{P_{vap}}{P_{sat}(t)} \quad (2-12)$$

Aunque hay diversas expresiones propuestas por diferentes autores, tal como se indica en (Gómez-Acebo, 2004), la presión de saturación [kPa] del aire húmedo se puede expresar como una función exponencial con respecto a la temperatura ambiental [°C], basada en la siguiente expresión válida entre 0 y 150°C:

$$P_{sat} = \exp \frac{16.461t - 114.86}{t + 231.67} \quad [P_{sat} \text{ en kPa}, t \text{ en } ^\circ\text{C}] \quad (2-13)$$

Ambas expresiones de la humedad están relacionadas como se puede ver en la Ec. (2-14):

$$\omega = \frac{m_{H_2O}}{m_{a.seco}} = \frac{PM_{H_2O}}{PM_a} * \frac{\phi \cdot P_{sat}}{P - \phi P_{sat}} \quad (2-14)$$

A la vista de la Ec. (2-14), puesto que el valor máximo de la ϕ es la unidad, resulta que el valor máximo de la humedad absoluta ω_{max} viene determinado fuertemente por la temperatura (a través de la P_{sat}) y en menor medida por la presión ambiente. Por ello, al reducirse la temperatura, el valor de ω_{max} se reduce fuertemente.

Para introducir cuantitativamente la influencia de la humedad en el proceso de combustión, se define un parámetro δ_h como la relación entre la masa de aire seco y la de aire húmedo, cuya expresión viene dada por:

$$\delta_h = \frac{m_{a.seco}}{m_{a.hum}} = \frac{m_{a.seco}}{m_{a.seco} + m_{H_2O}} = \frac{1}{1 + \omega} < 1 \quad (2-15)$$

Como consecuencia de la presencia de humedad ambiental, el valor de la densidad del aire se reduce porque el peso molar del agua es inferior al del oxígeno y el nitrógeno. Partiendo de la relación entre el número de moles de vapor de agua y de aire seco, lo que puede llamarse pseudofracción molar del vapor de agua, se obtendría que:

$$X_{H_2O_{a.seco}} = \frac{n_{H_2O}}{n_{a.seco}} = \frac{m_{H_2O}/PM_{H_2O}}{m_{a.seco}/PM_{a.seco}} = \omega \cdot \frac{PM_{a.seco}}{PM_{H_2O}} \quad (2-16)$$

Una forma efectiva de poder representar la influencia de la humedad sobre la densidad del aire es mediante un factor de corrección (K_{hum}) de la densidad, definido como la relación entre el peso molar del aire húmedo y el del aire seco, considerando la humedad absoluta, tal como se detalla en las Ec. (2-17) a Ec. (2-19):

$$PM_{a.hum} = \frac{m_{a.seco} + m_{H_2O}}{n_{a.seco} + n_{H_2O}} = \frac{m_{a.seco}(1 + \omega)}{m_{a.seco} \left(\frac{1}{PM_{a.seco}} + \frac{\omega}{PM_{H_2O}} \right)} = \frac{1 + \omega}{\frac{1}{PM_{a.seco}} + \frac{\omega}{PM_{H_2O}}}$$

$$PM_{a.hum} = PM_{a.seco} * \frac{1 + \omega}{1 + \omega \frac{PM_{a.seco}}{PM_{H_2O}}} \quad (2-17)$$

$$K_{hum} = \frac{1 + \omega}{1 + \omega \frac{PM_{a.seco}}{PM_{H_2O}}} < 1 \quad (2-18)$$

$$\rho_{a.hum,z} = \left(\frac{P_z}{R_{a,z} T_z} \right) * K_{hum,z} = \rho_{a.seco,z} * K_{hum,z} \quad (2-19)$$

La densidad del aire húmedo pasa a depender de la altitud a través de la correspondiente dependencia de todas las variables que aparecen en la Ec. (2-19).

2.1.3. Efecto de la altitud sobre el dosado estequiométrico y la emisión de CO₂

Después de considerar la influencia de las condiciones ambientales en la composición del aire, como consecuencia de la altitud (mediante ψ) y la humedad (mediante X_{H_2O}), y asumiendo una composición de combustible invariable, la expresión general que representaría una combustión completa, para una mezcla pobre con exceso de aire (es decir, una relación F_r equivalente menor que uno), se expresa por:

$$\begin{aligned} C_n H_m O_p S_u + \frac{1}{F_r} \left(n + \frac{m}{4} + u - \frac{p}{2} \right) (O_2 + \psi N_2) \left[1 + \frac{X_{H_2O}}{1 + \psi} H_2O \right] \\ = nCO_2 + \left(\frac{m}{2} + X_{H_2O} \right) H_2O + uSO_2 \\ + \psi \frac{1}{F_r} \left(n + \frac{m}{4} + u - \frac{p}{2} \right) N_2 + \left(\frac{1 - F_r}{F_r} \right) \left(n + \frac{m}{4} + u - \frac{p}{2} \right) O_2 \end{aligned} \quad (2-20)$$

Al producirse una disminución de la fracción molar del oxígeno debida a la altitud, se tiene como consecuencia una modificación de la relación estequiométrica en el proceso de combustión, provocando así desajustes en la dosificación de combustible en cada ciclo. (Lapuerta, Armas, Agudelo, & Agudelo, 2006)

Una expresión general de la relación estequiométrica combustible-aire (masa de combustible sobre masa de aire) de un combustible con fórmula general $C_n H_m O_p S_u$, considerando la Ec. (2-9) para la participación de la masa molar de aire y la Ec. (2-15) para la corrección de la humedad, quedaría representada a través de Ec. (2-21).

$$F_{st} = \frac{12n + m + 16p + 32u}{n + \frac{m}{4} - \frac{p}{2} + u} * \frac{1}{32 + 28\psi} * \frac{1}{1 + \omega} \quad (2-21)$$

En consecuencia, a partir de la Ec. (2-21), se puede establecer una expresión general que permite identificar como el dosado estequiométrico depende del producto de tres factores: uno dependiente de la composición del combustible (β_f), otro de la composición del aire (σ_a) y un tercero dependiente de la humedad (δ_h), tal como se puede ver en Ec. (2-22).

$$F_{st} = \beta_f(\text{combustible}) \cdot \sigma_a(\text{aire}) \cdot \delta_h(\text{humedad}) \quad (2-22)$$

Esta expresión para F_{st} debe tenerse en cuenta al establecer las condiciones de entrada del código de simulación del rendimiento del motor, como se describe en los siguientes apartados de la tesis.

Finalmente, el factor de emisión de CO₂ para un combustible con fórmula general $C_nH_mO_pS_u$, puede expresarse como:

$$\begin{aligned} e_{CO_2} \left(\frac{kg \text{ CO}_2}{kg \text{ fuel}} \right) &= (1 - \varepsilon_{ren}) \frac{m_{CO_2}}{m_f} \\ &= (1 - \varepsilon_{ren}) \frac{44}{\left(12 + \frac{m}{n} + 16 \frac{p}{n} + 32 \frac{u}{n} \right)} \end{aligned} \quad (2-23)$$

Donde ε_{ren} es un coeficiente que representa el grado de renovabilidad del combustible, siendo 0 para los combustibles fósiles y 1 para un combustible completamente renovable. El segundo factor del lado derecho de la Ec. (2-23) representa la dependencia del factor de emisión de la composición del combustible a través de las relaciones m/n, p/n y u/n. Una vez que se conoce la emisión de CO₂ de un combustible de referencia en un motor, se puede extrapolar la emisión de CO₂ de un combustible diferente (asumiendo en una primera aproximación que la eficiencia de combustión sigue siendo similar) escalando con la relación de factores de emisión.

2.2. Fundamentos de operación y funcionamiento de motores diésel de aspiración natural

Posterior a la conceptualización sobre la influencia de altitud sobre la composición del aire y el proceso de combustión, es indispensable conocer los fundamentos de operación y funcionamiento, en un primer acercamiento, sobre un motor diésel de aspiración natural.

En este apartado se definirán únicamente las características y valores típicos para motores sin participación de la sobrealimentación debido a que, como lo establece (Lapuerta, Armas, Agudelo, & Agudelo, 2006), las variaciones estimadas sobre el desarrollo de la combustión al variar la altitud son casi inapreciables en estos casos, siendo de poca utilidad para esta investigación.

2.2.1. Parámetros geométricos

Como se había indicado anteriormente, los parámetros geométricos de un motor son un conjunto de valores que permiten caracterizar las dimensiones físicas de los elementos constructivos más importantes del motor. A continuación, tanto señalados en la Fig. 2-2, como detallados en la Tabla 2-1, se presentan aquellos parámetros más importantes, utilizados posteriormente dentro de paquete informático de simulación AVL BOOST™.

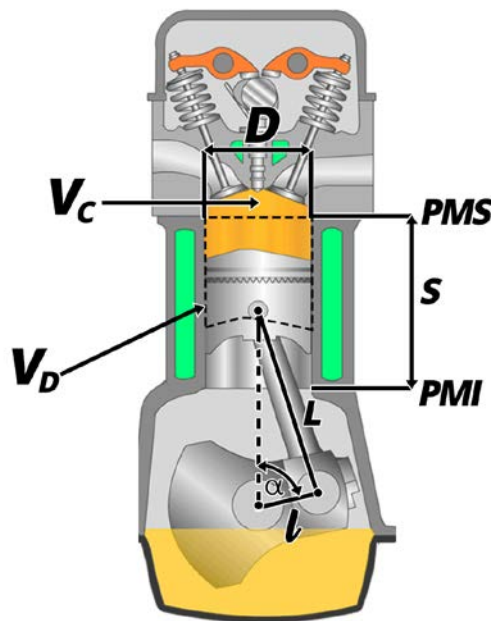


Fig. 2-2 Esquema de un motor de combustión interna diésel

Tabla 2-1 Parámetros geométricos del cilindro y el mecanismo biela - manivela

Parámetro	Símbolo	Definición
Diámetro del cilindro	D	También definido como calibre, es la longitud más larga que puede ser ubicada en las bases circulares y que pasa por el centro de los círculos.
Carrera del pistón	S	Es la distancia que recorre el pistón entre el punto muerto superior (PMS) y el punto muerto inferior (PMI). La carrera equivale al doble la longitud de la manivela del cigüeñal.

Longitud de la manivela	l	Es el elemento que permite la conversión del movimiento de traslación y rotación de la biela en una rotación en torno al eje del cigüeñal.
Longitud de la biela	L	Es una barra articulada en sus extremos que une el bulón del pistón con la muñeca del cigüeñal.
Cilindrada unitaria	V_D	Es el volumen desplazado por el émbolo desde el punto muerto superior (PMS) al punto muerto inferior (PMI)
Volumen de la cámara de combustión	V_c	Es el volumen mínimo que se alcanza durante la compresión de los gases cuando el pistón se encuentra en el punto muerto superior (PMS)
Relación de Compresión	r	Es el cociente entre el volumen máximo ($V_D + V_c$) y el volumen mínimo que se alcanza (V_c)
Sección del pistón	A_p	Es la sección transversal del pistón o émbolo que desliza en el interior del cilindro, se obtiene de la siguiente relación $A_p = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2-24)$
Cilindrada total	V_T	Se obtiene de la multiplicación de la cilindrada unitaria (V_D) por el número de cilindros (z). Está directamente relacionada con el valor de la potencia del motor, ya que define la capacidad de admitir aire el motor.
Número de ciclos	i	Es la sucesión de procesos que tiene lugar en cada cilindro que se repite de forma continua. En un motor de cuatro tiempos es necesaria dos revoluciones para completarlo por lo que $i = \frac{1}{2} \quad (2-25)$

Fuente: (Lecuona Neumann & Rodríguez Aumente, 2014)

A la información del cilindro y mecanismo biela-manivela detallada anteriormente, es importante proporcionar datos geométricos sobre el sistema de válvulas, tanto de admisión como de escape, ya que estas son las encargadas de la renovación de la carga y de la salida de los residuos provenientes del proceso de combustión.

Por lo general, tal como lo apunta (Lecuona Neumann & Rodríguez Aumente, 2014), el accionamiento tiene lugar mediante un sistema de levas, por lo que es necesario realizar un levantamiento progresivo de cada una de válvulas. A continuación, en la Tabla 2-2 se describen cada una de sus partes más importantes, además de explicarse de forma concreta el diagrama de distribución que las controla, el mismo que se encuentra dispuesto en sincronía con los tiempos de admisión, compresión, explosión y escape que ocurre dentro del cilindro del motor diésel.

Tabla 2-2 Parámetros geométricos del sistema de válvulas de admisión y escape

Parámetro	Símbolo	Definición
Número y diámetro de válvulas	D_v, N_v	El diámetro de la válvula corresponde a la máxima sección de paso de flujo. El número de válvulas es la cantidad de válvulas que se abren simultáneamente en cada tiempo.
Levantamiento de válvulas	L_v	Es el desplazamiento que hace la válvula deslizando de su asiento en un movimiento acelerado, desacelerándose posteriormente hasta llegar a su levantamiento máximo $L_{v_{max}}$. Está medido respecto al asiento.
Sección de paso de válvulas	A_v	Es la parte de acceso del flujo cuando la válvula no se está acoplada en su asiento cónico herméticamente. En muchas ocasiones suele referirse al área del plato, en cuyo caso vale: $A_v = \frac{\pi D_v^2}{4} \quad (2-26)$
Diagrama de distribución	AAA ACA AAE RCE	Corresponde a la apertura o cierre de la sección de paso de acuerdo a cierto ángulo de giro del cigüeñal, el mismo que puede ser antes (adelanto o avance) o después (retardo o retraso) con respecto del punto muerto correspondiente. El significado de cada sigla es: AAA: Avance a la apertura de la admisión ACA: Retraso al cierre de la admisión AAE: Avance a la apertura del escape RCE: Retraso al cierre del escape

Fuente: (Lecuona Neumann & Rodríguez Aumente, 2014)

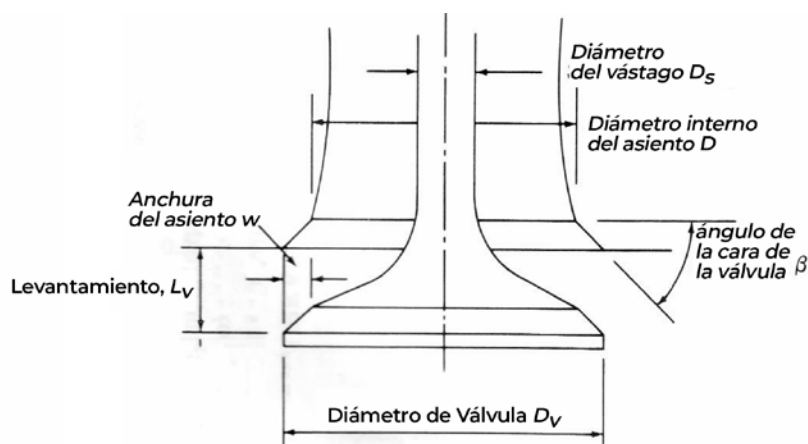


Fig. 2-3 Parámetros geométricos característicos de una válvula. (García, 2014)

2.2.2. Parámetros de funcionamiento

A diferencia de los parámetros geométricos del motor, los parámetros de funcionamiento definen el estado operativo del motor a determinadas condiciones y variables. Entre los valores más representativos se encuentran: régimen, grado de carga, gasto de aire, gasto de combustible, rendimiento volumétrico, poder calorífico del combustible y el dosado. En la Tabla 2-3 se presentan las definiciones de cada uno de estos parámetros, en conjunto con sus ecuaciones representativas.

Tabla 2-3 Parámetros de funcionamiento de un motor de combustión

Parámetro	Símbolo	Definición
Régimen de funcionamiento	n	Es el número de revoluciones por unidad de tiempo y determina la frecuencia de repetición del ciclo de trabajo
Grado de carga		Cuantifica lo que proporciona el motor en comparación con el valor máximo que puede aportar. En motores diésel se regulan inyectando más o menos combustible.
Gasto de aire	ma	El gasto de aire (ma) es el caudal másico admitido por unidad de tiempo, medido por lo general en g/s.
Rendimiento volumétrico	η_v	El rendimiento volumétrico (η_v) es la relación entre la masa de aire que hay en el cilindro en PMI, y la que podría haber, dado el volumen de la cámara y la presión atmosférica.
Gasto de combustible	$\dot{m}f$	Es la masa de combustible inyectado por unidad de tiempo, medida comúnmente en mg/s.
Poder calorífico del combustible	PC	Es la cantidad de calor liberado con combustión completa y perfecta por unidad de masa de combustible. En MCI se utiliza el valor de poder calorífico inferior PCI.
		El dosado corresponde a la relación entre el gasto de combustible con respecto al gasto de aire empleado para su combustión (dosado absoluto).
		$F = \frac{\dot{m}f}{ma} \quad (2-27)$
Dosado (absoluto, relativo, estequiométrico)	F	<p>Cuando de la reacción no queda nada de reactivos se obtiene el dosado estequiométrico (F_a).</p> <p>Una medida comúnmente utilizada es el dosado relativo (F_r), como la relación entre el dosado absoluto y el estequiométrico. En el caso de los motores diésel el valor del dosado relativo es pobre ($F_r < 1$).</p>
		$F_r = \frac{F}{F_{st}} \quad (2-28)$

Fuente: (Lecuona Neumann & Rodríguez Aumente, 2014)

Varios de estos parámetros de funcionamiento sufren una afección con respecto a la variación de las condiciones ambientales, sobre todo aquellos referidos al aire, debido al cambio de su composición (en aire seco y aire húmedo), como se apuntó en el apartado 2.1.1 y 2.1.2. Adicionalmente, el dosado estequiométrico también se altera con el cambio de estos factores ambientales, como se pudo ver en el apartado 2.1.3.

2.2.3. Parámetros indicados y efectivos

Los parámetros indicados y efectivos son parámetros básicos propios que definen las prestaciones de un motor en un determinado punto de funcionamiento. De esta forma, los parámetros indicados hacen referencia al ciclo cerrado real del motor, es decir, lo que ocurre dentro de la cámara de combustión. No tienen en cuenta el trabajo de bombeo (aire, mezcla a-c), los rozamientos mecánicos, ni el accionamiento de auxiliares (alternador, bomba aceite) (Tabla 2-4).

Tabla 2-4 Parámetros indicados de un motor de combustión

Parámetro	Símbolo	Definición
Trabajo indicado	W_i	Es la integral del lazo de alta presión entre los puntos muertos superiores de admisión (PMI_{ad}) y de escape (PMI_{esc})
Potencia indicada	N_i	Parámetro que corresponde al trabajo indicado por unidad de tiempo. Se calcula en base al régimen de giro, el número de ciclos y el trabajo indicado. $N_i = inW_i \quad (2-29)$
Rendimiento indicado	η_i	Señalado como la relación entre la potencia indicada desarrollada por el motor y la potencia térmica del combustible.
Presión media indicada	p_{mi}	Es la presión constante que produciría un trabajo igual al trabajo indicado en la carrera de expansión. $p_{mi} = \frac{W_i}{V_D} \quad (2-30)$

Fuente: (Lecuona Neumann & Rodríguez Aumente, 2014)

Por otro lado, los parámetros efectivos están referidos al eje del motor (cigüeñal), en los que se incluye: el ciclo cerrado (parámetros indicados), el lazo de bombeo (escape + admisión), los rozamientos y el accionamiento de auxiliares (Compresor, alternador, entre otros). A continuación, en la Tabla 2-5, se exponen los valores más habituales relacionados con los parámetros indicados y efectivos respectivamente.

Tabla 2-5 Parámetros efectivos de un motor de combustión

Parámetro	Símbolo	Definición
Par efectivo	M_e	Es el par mecánico medio M_e que el motor ejerce por medio de su eje hacia el exterior.
Potencia efectiva	N_e	Es la potencia que se obtiene directamente a partir del par efectivo que entrega el motor al régimen de giro n .
Presión media efectiva	p_{me}	Es la presión constante que produciría un trabajo igual al trabajo efectivo durante la carrera de expansión. Se calcula a través de la siguiente expresión: $p_{me} = \frac{N_e}{i n V_T} \quad (2-31)$
Rendimiento efectivo	η_e	Es la relación entre la potencia efectiva desarrollada por el motor y la potencia térmica del combustible. Se calcula a través de la siguiente expresión: $\eta_e = \frac{N_e}{\dot{m}_f PCI} \quad (2-32)$
Presión media de pérdidas mecánicas	p_{mpm}	Es la suma de la presión media de bombeo, presión media de pérdidas por fricción y presión media por accionamiento de auxiliares, estos últimos referidos habitualmente a valores del motor completo.

Fuente: (Lecuona Neumann & Rodríguez Aumente, 2014)

Cabe apuntar por último que debido a que, por un lado, el funcionamiento correcto del motor depende de una serie de auxiliares para su sincronización, sumado a que por el mismo mecanismo de funcionamiento de las piezas ocasiona un rozamiento entre ellas, además de que el proceso de renovación de la mezcla produce un trabajo de bombeo, entonces nos encontramos con el término de pérdidas mecánicas, principalmente con la presión media de pérdidas mecánicas (p_{mpm}), que suma las presiones medias de todos los factores anteriormente mencionados, tal como se ve en la siguiente expresión:

$$p_{mpm} = p_{mb} + p_{mR} + p_{ma} \quad (2-33)$$

En conclusión, los parámetros efectivos se obtienen a partir de los parámetros indicados menos todas las pérdidas dentro del proceso de combustión (bombeo, rozamiento y funcionamiento de auxiliares).

2.2.4. Curvas características

Las curvas características de un motor de combustión interna, tal como lo explica (Zambrano Mantilla & Núñez Prada, 2013), son las encargadas de definir su comportamiento en determinadas condiciones de funcionamiento. Estos comportamientos son detallados en base a tres curvas: curva de potencia, curva del par y la curva de consumo específico del motor.

En primer lugar, la curva de potencia crece en progresión casi constante hasta un valor determinado, que indica el régimen de giro a potencia máxima, para posterior a este punto disminuir su valor rápidamente hasta el límite máximo de utilización. El descenso de potencia, más allá de dicho valor, es debido a la disminución del rendimiento volumétrico del motor, por cuanto existe una limitación sobre la cantidad de aire admitido y su renovación después de cada ciclo (Olivo Barragán, 2018), y del rendimiento mecánico por el número de revoluciones (E. Gil, 2010).

El punto de potencia máxima corresponde, por tanto, a un régimen de revoluciones del cigüeñal inferior al máximo permitido. En general, cuanto menor curvatura tiene el trozo de línea comprendido entre el límite mínimo de utilización y el régimen de potencia máxima, tanto más elástico es el funcionamiento del motor. Otros factores a considerar en la reducción de la curva de potencia serían las resistencias que ofrecen las partes mecánicas en movimiento, el bombeo y todas aquellas que son utilizadas para el accionamiento de los órganos auxiliares, los mismos que aumentan notablemente con la velocidad elevada (E. Gil, 2010). En la Fig. 2-4 se presenta un ejemplo de curva de potencia, para un régimen de giro de 0 a 2600 rpm, en conjunto con las respectivas curvas de torque y de consumo específicos, explicadas cada una de ellas posteriormente.

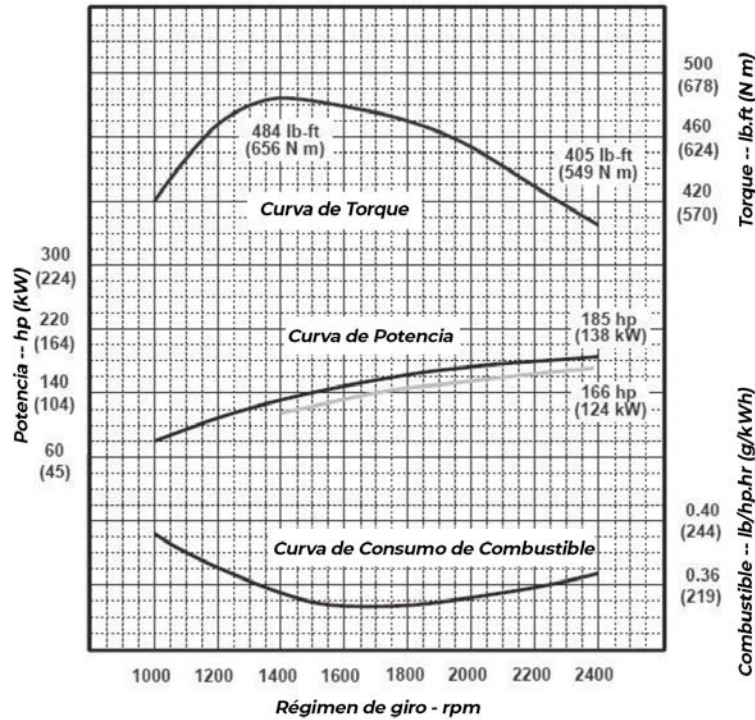


Fig. 2-4 Ejemplo de curvas de potencia, torque y consumo de combustible (York & Products, 2016)

En el caso del par, dentro del vehículo hay que diferenciar dos tipos fundamentales: el par motor y el par entregado en rueda. El primero, es aquel desarrollado por el motor en cada instante y medido en el final del cigüeñal, volante de inercia o primario del embrague, mientras que el par en rueda es aquel que proporciona la fuerza de tracción que será la que realmente mueva el vehículo (IDAE, 2005).

Inicialmente diferenciados el par motor del par en rueda, acorde a (E. Gil, 2010), según el principio fundamental de la mecánica: acción = reacción, un motor no puede generar un par (acción) sino existe un par resistente (reacción). De esta forma, el par motor está ligado al par resistente que es consecuencia del esfuerzo de trabajo solicitado al motor. El par máximo de un motor depende de la cilindrada, del índice de llenado de los cilindros, de la calidad de la combustión y de la cantidad de carburante inyectada por la bomba de inyección, por lo que en gran parte son dependientes de las condiciones ambientales.

Ahora bien, como se pudo observar en la Fig. 2-4, en el caso de la curva de par motor, o también denominada curva de torque, ésta se encuentra dividida en dos partes: por un lado, la zona de funcionamiento no flexible y la de funcionamiento flexible, ambas limitadas por un valor del régimen de giro que corresponde a la máxima capacidad de

trabajo o máximo par (Zambrano Mantilla & Núñez Prada, 2013). Cabe señalar que, las curvas de par proporcionadas por el fabricante, de forma habitual, son curvas de par a plena carga, donde muestran el par máximo proporcionado por el motor a cada régimen de giro cuando el acelerador está pisado a fondo (IDAE, 2005).

En cuanto a la curva de consumo específico de combustible, esta indica la cantidad de combustible consumido en un vehículo en función del motor y el régimen de giro correspondiente (Morales & Guzmán, 2012), generalmente medidos en g/kWh. Como se puede observar en la Fig. 2-4, la curva de consumo de combustible alcanza un valor de mínimo consumo a un determinado régimen de giro, posterior al cual incrementa nuevamente hasta el valor de utilización máxima del motor.

Finalmente, aunque no provistas comúnmente por el fabricante, se tienen las curvas de eficiencia del motor (volumétrica, indicada, efectiva y mecánica), cuyas definiciones se explicaron anteriormente. En cuanto al rendimiento volumétrico, sus valores en motores atmosféricos diésel se acercan al 100% en la mayoría de los casos, por cuanto la entrada de aire no está limitada, aunque esto sucede únicamente en determinados regímenes de giro. Es así que, para regímenes menores, acorde a (Sáenz Acebes, 2017), disminuye el rendimiento volumétrico debido a que la velocidad del gas es baja, mientras que para los regímenes de giro superiores, el rendimiento es menor porque el tiempo disponible para la admisión disminuye a la vez que aumentan las pérdidas de carga debido al rozamiento de los gases.

Otros factores que afectan al rendimiento volumétrico, cuyo valor máximo está entre el 70% y el 90%, son:

- Régimen de giro.
- Las condiciones ambientales exteriores que determinan la densidad del aire.
- El diagrama de distribución.
- La sección de las válvulas y los conductos de admisión, mejorando las dimensiones de los ductos de admisión, de escape de los gases y optimizando la sincronización del diagrama de apertura y cierre de las válvulas (Fig. 2-5)
- La eficacia de barrido de los gases quemados.

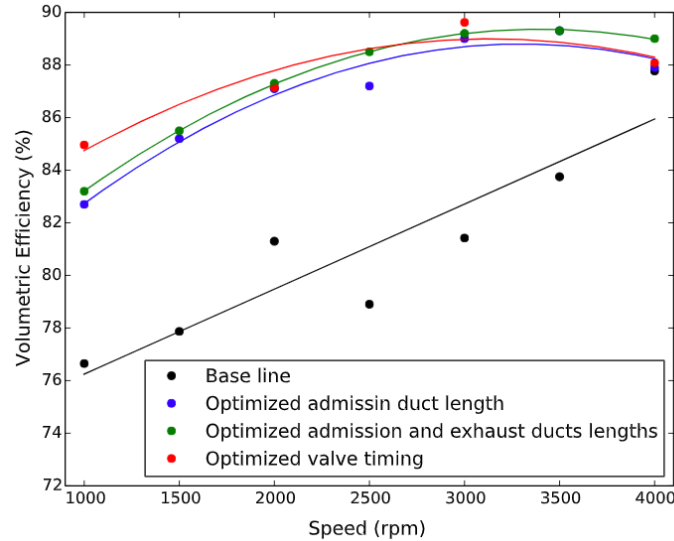


Fig. 2-5 Optimización del rendimiento volumétrico de acuerdo a diferentes mejoras en variables de diseño del motor diésel (Och et al., 2016)

A continuación, en la Fig. 2-6, se presentan las curvas de rendimientos indicado, efectivo además de una tercera cuya representación se basa en las pérdidas mecánicas producidas dentro de todo el ciclo de funcionamiento del motor: el rendimiento mecánico. Tal como lo denota (Sáenz Acebes, 2017), el rendimiento mecánico se calcula como el cociente entre el trabajo útil obtenido en el cigüeñal y el trabajo del ciclo indicado. En este caso, mencionadas pérdidas mecánicas a considerar son:

- La energía empleada en transmitir el movimiento del pistón hasta el eje de salida, sobre todo en rozamientos en el cilindro, y en la fricción en los cojinetes de biela y cigüeñal.
- El consumo de energía provocado por dispositivos auxiliares, el trabajo de bombeo y la energía necesaria para introducir aire y extraer los gases producidos en el cilindro.

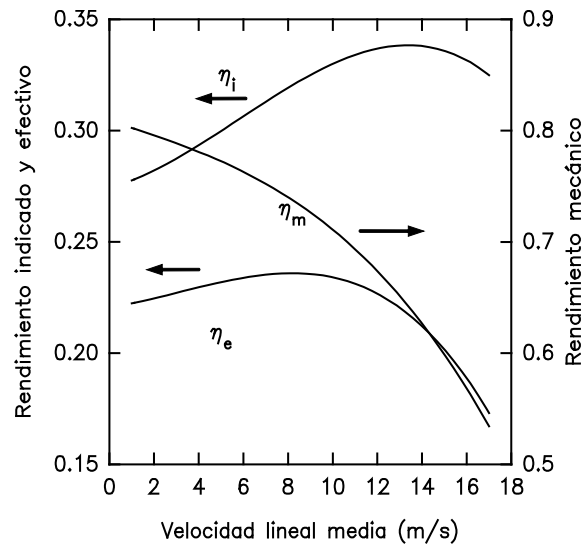


Fig. 2-6 Optimización del rendimiento volumétrico de acuerdo a diferentes mejoras en variables de diseño del motor diésel (Och et al., 2016)

2.3. Fundamentos de operación y prestaciones de autobuses de motor diésel

Ya que una parte importante de este trabajo de investigación se centra en el estudio de las prestaciones, consumo de combustible y emisiones de los autobuses con motores de tecnología diésel de aspiración natural, es importante establecer una serie de fundamentos que caractericen correctamente este fenómeno.

De esta forma, en el presente apartado se iniciará desde la categorización de los vehículos autobuses, pasando por la definición de ciclos de operación y recorrido tipo, finalizando por los factores de influencia en el consumo y emisiones de los autobuses con motor diésel, todas en base a normativas de normalización locales e internacionales según el campo de aplicación.

2.3.1. Categorización de vehículos autobuses

De acuerdo a la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2656:2012 (INEN, 2012), sobre clasificación vehiculas en la República del Ecuador, los vehículos de transporte de pasajeros están inmersos dentro de la categoría M (literales 4.1.2, subsecciones 4.1.2.1 – 4.1.2.3 de la norma). Dentro del marco de la Unión Europea, esta categorización está inmersa en base a la Directiva de la Comunidad Económica Europea 70/156/CEE, la misma que en grados de homologación establece las siguientes subcategorías de vehículos:

- **Categoría M:** Vehículos destinados al transporte de personas y que tengan por lo menos cuatro ruedas, o tres ruedas y un peso máximo superior a 1 tonelada.
- **Categoría M1:** Vehículos destinados al transporte de personas que tengan, además del asiento del conductor, ocho plazas sentadas como máximo.
- **Categoría M2:** Vehículos destinados al transporte y personas que tengan, además del asiento del conductor, más de ocho plazas sentadas y que tengan un peso máximo que no supere las 5 toneladas.
- **Categoría M3:** Vehículos destinados al transporte de personas que tengan, además del asiento del conductor, más de ocho plazas sentadas y que tengan un peso máximo que supere las 5 toneladas.

De acuerdo a esta categorización, según (Bouzada Outeda et al., 2009), los vehículos autobuses y autocares estarían dentro de las categorías “M2” y “M3”. Dentro de esta clasificación de los autobuses, existe una subclasificación de acuerdo a la disposición de los pasajeros, que en el caso de la normativa ecuatoriana no establece un máximo de ocupantes en ninguno de los casos. Esta subclasificación (literales a – c de la norma NTE INEN 2656:2012) se presenta a continuación:

- **Clase I:** Vehículos contruidos con áreas para pasajeros de pie permitiendo el desplazamiento frecuente de estos.
- **Clase II:** Vehículos contruidos principalmente para el transporte de pasajeros sentados y, también diseñados para permitir el transporte de pasajeros de pie en el pasadizo y/o en un área que no excede el espacio provisto para dos asientos dobles.
- **Clase III:** Vehículos contruidos exclusivamente para el transporte de pasajeros sentados.

Establecida la categoría y la subclasificación correspondiente a los vehículos de transporte público de pasajeros, considerando que varios datos constructivos son ingresados en el software de simulación utilizado para la estimación de las prestaciones, consumo de combustible y emisiones en autobuses con motor diésel de aspiración natural, es necesario adoptar una serie de definiciones establecidas en las normativas INEN RTE INEN 034, NTE INEN ISO 3833 vigente, NTE INEN 1 155 vigente, tal como se detalla en la Tabla 2-6.

Tabla 2-6 Definiciones aplicadas al estudio de carrocerías y vehículos de transporte

Parámetro	Símbolo	Definición
Asiento		Estructura ergonómica fijada al vehículo, de configuración adecuada para que la persona se siente, pudiendo ser este individual o múltiple.
Capacidad de arrastre		Peso máximo de diseño a ser remolcado por un automotor.
Capacidad de carga		Carga útil máxima permitida para la cual fue diseñado el vehículo.
Peso Bruto Vehicular	PBV	Peso en vacío (Tara) del vehículo más la capacidad de carga de diseño.
Peso Bruto Vehicular Combinado	PBVC	Peso Bruto Vehicular más la capacidad de arrastre
Peso en vacío (Tara)		Peso del vehículo en orden de marcha, sin incluir la carga o pasajeros (incluye el peso del combustible con los tanques llenos, herramientas y rueda(s) de repuesto).
Carga de aceleración brusca	A_b	Corresponde a la fuerza producida por la aceleración brusca del vehículo.
Carga de frenado		Corresponde a la fuerza producida por el frenado del vehículo.
Carga muerta	M	Corresponde al peso total de la carrocería en condiciones operativas, lo que incluye todos los componentes estructurales y no estructurales permanentes; es decir, la carrocería terminada con todos los accesorios.
Carga viva	V	Corresponde a la carga por ocupación y se la considera como distribuida uniformemente en los respectivos elementos estructurales de la carrocería.

Fuente: (INEN, 2012) y (NTE INEN 1323, 2009).

En cuestión de las dimensiones, masas máximas y capacidad admisible por área, no existe una normativa ecuatoriana de normalización, por lo que es aplicable dentro de esta categorización el reglamento general de vehículos de la Unión Europea, donde se establecen las siguientes dimensiones máximas a vehículos autobuses y autocares (Bouzada Outeda et al., 2009):

- **Longitud:**
 - *Autobuses rígidos:* 15.00 m.
 - *Autobuses articulados:* 18.00 m.
- **Anchura:** 2.55 m.

- **Altura:** 4.00 m.
- **Masas máximas:**
 - *Vehículo de motor de 2 ejes:* 18 toneladas
 - *Vehículos de transporte colectivo de viajeros de Clase I (autobuses urbanos):* 20 toneladas.
 - *Autobuses articulados de 3 ejes:* 28 toneladas.
- **Capacidad admisible:**
 - Clase I: 8 personas/m² (0.125 m²/p).
 - Clase II: 6.7 personas/m² (0.15 m²/p).

2.3.2. Ciclos de operación y recorrido tipo

Posterior a la comprensión de fundamentos sobre la categorización de las unidades de transporte público, es indispensable pormenorizar las diferentes fases de movimiento particularizando este estudio en base a un recorrido por ciclo operativo comercial.

Se define como ciclo operativo comercial, según (Bouzada Outeda et al., 2009), al recorrido que se puede asociar a un determinado servicio o expedición, cuando el vehículo se utiliza para prestar una actividad productiva de transporte, definiéndose así dos tipos de fases principales: una primera fase con viajeros a bordo y otra fase sin viajeros.

La primera fase, descrita como el recorrido tipo de funcionamiento con perfil de velocidad real descrito a un número de paradas establecidas, a su vez se subdivide en cinco fases de operación, empezando con la operación de subida de pasajeros al inicio de la ruta, pasando por el movimiento comercial propiamente dicho, las operaciones intermedias de paradas para bajada y subida de pasajeros, las paradas técnicas por cuestiones de control de velocidad y tráfico, finalizando por la operación de bajada de pasajeros al final de la ruta.

Es de especial interés para la presente investigación los tipos de movimientos comerciales, en función al tipo de explotación (y/o infraestructura), tomando en cuenta los diferentes tipos de circuitos (urbano, metropolitano e interurbano), condicionando además la diferenciación de los consumos energéticos en cada punto (Bouzada Outeda et al., 2009). A continuación, en la Tabla 2-7, se enuncian los diferentes tipos de movimientos interurbanos:

Tabla 2-7 Tipos de movimientos comerciales interurbanos

Movimiento comercial	Descripción
Ámbito urbano	Fase del movimiento comercial en la cual el autobús circula a velocidades bajas. En el caso del Ecuador, corresponde a velocidades dentro del casco urbano de las ciudades, o zonas de alta concentración de tráfico. Existen zonas de ámbito urbano donde el autobús circula a velocidades medias.
Ámbito metropolitano	Fase del movimiento comercial en la cual el autobús circula a velocidades medias. En el caso del Ecuador, se agregan determinadas zonas de velocidades altas, sobre todo en vías principales de descongestión por periferias no circundantes.
Ámbito interurbano a velocidad baja	Fase del movimiento comercial de circulación interurbano a velocidades medio altas, debido a limitaciones de velocidad o alta densidad de tráfico. En Ecuador corresponde a intercambiadores de vías periféricas con la autopista Panamericana.
Ámbito interurbano a velocidad media	Fase del movimiento comercial en la cual, en infraestructuras interurbanas, el vehículo circula a velocidades más altas, pero no en las máximas que puede alcanzar el vehículo. Este recorrido en Ecuador corresponde a vías periféricas de tres y cuatro carriles que conectan los extremos de las ciudades.
Ámbito interurbano a velocidad alta	Fase del movimiento comercial, dentro de un circuito interurbano, en el que el vehículo alcanza las máximas velocidades permitidas. En el caso de Ecuador la limitación para autobuses es de 120 km/h y corresponde a tramos de conexión entre urbes mediante circulación por la vía Panamericana.

Fuente: (Bouzada Outeda et al., 2009)

Si bien es cierto que, para fines de esta investigación, no se toman en cuenta las fases sin viajeros, es importante definir cada una de sus fases complementarias a medio informativo y de mejor comprensión del fenómeno a estudiar. Con base es este planteamiento, se establecen dos fases complementarias de movimiento del vehículo: fase sin viajeros y fases no comerciales del vehículo.

La fase de viaje sin viajeros trata movimientos de diferente naturaleza con la finalidad de concretar, por un lado, el desplazamiento del autobús desde la zona de aparcamiento una vez finalizada la ruta hasta el inicio de la misma en su turno correspondiente, empezando así un nuevo ciclo de funcionamiento. Este recorrido sin viajeros se duplica si

consideramos en esta ocasión que, al finalizar la ruta en su última parada, el vehículo tiene que trasladarse a zona de mantenimiento en espera de su siguiente turno.

Las fases no comerciales, son aquellas que no generan ningún ingreso comercial por traslado de pasajeros. Estos viajes son considerados de dos tipos: por un lado, recorridos de viaje de escasa demanda, preferencialmente en primeros y últimos turnos diarios, así como los movimientos de mantenimiento y traslado de las unidades a su punto de partida, una vez terminada la jornada laboral diaria.

2.3.3. Factores de influencia en el consumo y emisiones en autobuses

Tal como se expuso de forma independiente para el motor diésel de aspiración natural, existe un conjunto de factores de influencia en el consumo y emisiones, analizados desde la perspectiva propia del vehículo como conjunto. De esta forma, (Bouzada Outeda et al., 2009) plantea la agrupación de estos factores de acuerdo a dos condiciones importantes: factores de afección sobre el conjunto chasis – motor, y factores de afección caracterizadores de las rutas, trazados y tráfico.

Centrándose en el primer grupo de afección, los factores de influencia pueden ser de los siguientes tipos:

- **Rendimiento del motor de combustión interna:** al ser la fuente de origen energético del vehículo, su eficiencia es de vital importancia dentro del consumo y emisiones del vehículo, tal como se estudió en el apartado 2.2.4.
- **Rendimiento de los equipos mecánicos de transmisión del par motor, desde el cigüeñal del motor hasta el neumático:** Todos estos componentes generan pérdidas mecánicas debido a los rozamientos, necesarios para la transmisión del par motor. Estos rozamientos generan calor que es disipado al ambiente. Esta pérdida de potencia, está entre un 10 y un 15% del total de la potencia que entrega el motor, y depende fundamentalmente del diseño de los equipos (IDAE, 2005).
- **Resistencias de rodadura:** Según (IDAE, 2005), la resistencia de rodadura viene dada por el coeficiente de rozamiento entre el neumático, la superficie de rodadura y el peso del vehículo. Puede llegar a suponer un 40% del total de la fuerza resistente a vencer.

- **Velocidad del vehículo:** Dependiente del perfil de velocidad dentro del recorrido, con comportamiento exclusivo del conductor, las condiciones de control de velocidad de acuerdo a la zona, y condiciones de la carretera.

Visualizando el efecto de acuerdo a las características de las rutas, y los factores climatológicos presentes en el recorrido, entonces los factores de influencia pueden ser de los siguientes tipos:

- **Pendientes en alzado (positivas o negativas):** Corresponde a diferencia de altitud creciente, o decreciente, donde el vehículo para vencer esta variación debe obtener potencia a partir del motor de combustión interna. Depende directamente de la masa, y de la inclinación de la pendiente.
- **Tipo y estado de infraestructura:** corresponde a la naturaleza de la degradación de los materiales de la carretera, así como el material del que está compuesto (tierra, piedra, asfalto, cemento, entre otros). Este factor no se toma en cuenta en esta investigación.
- **Congestión del tráfico:** se basa en el grado de ocupación de una vía por varias unidades de transporte al mismo tiempo, lo que ocasiona una reducción considerable del perfil de velocidad.
- **Temperatura y presión atmosférica:** Analizado desde dos planos de acción, uno inicial de influencia sobre el comportamiento del motor (revisado en el apartado 2.2.4, o desde una perspectiva ajena a este, donde la presión atmosférica no tiene influencia en el consumo, más la temperatura tiene un grado de influencia indirecta debido a su relación estrecha con el accionamiento de los equipos auxiliares de climatización (aire acondicionado y calefacción) (Bouzada Outeda et al., 2009).
- **Velocidad, dirección y sentido del viento:** Este aspecto de alta variabilidad en todos sus valores es de influencia muy importante sobre las prestaciones y consumo de combustible, en términos de los efectos de la resistencia del aire. En la presente investigación no se lo considera, en orden hacia la visualización únicamente de los tres parámetros establecidos: temperatura, presión atmosférica y humedad relativa.
- **Lluvia y/o nieve en el recorrido del vehículo:** Como factores de influencia indirecta, ocasionando un cambio de comportamiento en el conductor para

extremar las medidas de seguridad ante la disminución del agarre ofrecido por los neumáticos. En el Ecuador, por su ubicación en la mitad del planeta, la probabilidad de presencia de nieve es prácticamente nula, ocurriendo únicamente en ocasiones raramente registradas, y en zonas cercanas a la cordillera de los Andes.

2.4. Fundamentos y modelos de emisiones contaminantes

Aunque en la actualidad existe una serie de normativas locales que establecen una categorización y establecen los parámetros de prestaciones, consumo de combustible y emisiones en los autobuses, en Latinoamérica por lo general se aplica la normativa Euro, con cierta diferenciación de acuerdo a cada país, como se expuso en el apartado 1.1. Es importante recordar que, en cuestión de emisiones, a día de hoy, para la República del Ecuador la máxima normativa aplicada es la Euro III.

Si bien es cierto que, los vehículos con motor de combustión diésel consumen una menor cantidad de combustible que los de gasolina, es bien conocido que estos contaminan hasta cuatro veces más contaminación atmosférica que el resto, principalmente por una mayor suspensión de elementos particulados y una mayor emisión de dióxido de nitrógeno (NO₂) (Puentestar Bedón & Santiago, 2019).

Aun cuando del proceso de combustión se obtienen una serie de productos contaminantes, clasificados según varios criterios (estado, toxicidad, reactividad, etc.), para fines de la presente investigación se consideran únicamente los contaminantes primarios gaseosos (óxidos de nitrógeno NO_x, monóxido de carbono CO) y los contaminantes primarios no gaseosos (Soot).

2.4.1. Formación y parámetros de caracterización de emisiones

De forma introductoria, desde una perspectiva general, la formación de los óxidos de nitrógeno NO_x se produce en gran medida a que, tal como lo plantea (Puentestar Bedón & Santiago, 2019), la combustión del oxígeno y el combustible no es perfecta y parte del oxígeno queda sin quemar; lo que ocasiona que, debido a las altas presiones y temperaturas alcanzadas dentro de la cámara de combustión, se produzca una

combinación del nitrógeno con el oxígeno no quemado, generándose así tanto los óxidos como los dióxidos de nitrógeno.

De igual importancia, referente a la formación de monóxido de carbono CO, (Lapuerta & Ballesteros, 2014) proponen que en los motores diésel, donde el proceso de combustión es heterogéneo, se produce este contaminante con base a tres fuentes principales. Por un lado, a un proceso de disociación de las moléculas de CO₂ a temperatura elevadas en el proceso de combustión, por otro lado, debido a zonas excesivamente pobres que no son capaces de soportar una rápida combustión, donde se forman productos procedentes de pirólisis y oxidación parcial del combustible. Adicionalmente, a zonas excesivamente ricas que no son capaces de mezclarse con la suficiente cantidad de aire para producir la oxidación completa del combustible.

Para la formación de Soot, así como otro material particulado PM, (Rojas, 2004) deduce que estas partículas son formadas debido a la formación de zonas de baja temperatura o de baja disponibilidad de oxígeno en el frente de llama durante la combustión. Esta combustión, depende principalmente de la inyección, de las características de mezcla combustible y aire, y la presencia de combustible y aceite en las paredes de la cámara de combustión y asientos de las válvulas de admisión.

Para la caracterización de estas emisiones, se establece una serie de parámetros que favorecen unidades de medida, por un lado, para las emisiones desde perspectiva propia del motor de combustión, y en el conjunto completo del autobús. Estos parámetros son los índices de emisión y sus unidades de emisión típicas.

Definiéndose al índice de emisión para la especie contaminante *i* como la relación entre a masa de dicha especie y la masa de combustible quemado por el proceso de combustión, según la Ec. (2-34), con unidad de medida adimensional.

$$EI_i = \frac{m_i}{m_f} \quad (2-34)$$

Tal como lo postulan (Lapuerta & Ballesteros, 2014), este índice es muy útil porque no da paso a la ambigüedad en su interpretación, ya que expresa la cantidad de contaminante formado por masa de combustible consumido, independiente del grado de dilución de los productos o de la eficiencia de la combustión. En el caso de las unidades de emisión

típicas, direccionado para la emisión desde el motor propiamente dicho, es común expresar estas en función de la potencia efectiva desarrollada por el motor, cuyas unidades normalmente utilizadas son g/kWh, según la Ec. (2-35).

$$EE_i = \frac{\dot{m}_i}{N_e} \quad (2-35)$$

Aunque no ha sido utilizado para la presentación de los resultados de esta investigación, (Lapuerta & Ballesteros, 2014) menciona que otra medida de las emisiones frecuentemente empleada es la masa de contaminante emitida por unidad de energía liberada por el combustible, medida en g/MJ, según la Ec. (2-36).

$$\frac{\dot{m}_i}{Q_{lib}} = \frac{EI_i}{PCI} \quad (2-36)$$

Finalmente, las medidas de factores de emisión ya en condiciones de estimación para recorrido del vehículo en su conjunto, por lo general se expresan en unidades de cantidad de contaminante emitido por unidad de distancia recorrida, por lo general presentados en g/km, recalcando que en el caso del consumo de combustible se agrega una medida de uso común que se expresa en unidades de volumen de contaminante emitido por cada cien kilómetros de distancia media recorrida, presentado en l/100km.

2.4.2. Modelos de formación emisiones contaminantes

Para el estudio de emisiones contaminantes, a partir del proceso de combustión en MCI, dentro del paquete informático AVL BOOST™ se siguen una serie de modelos desarrollados con bases teóricas a investigaciones previas de diferentes autores.

De esta forma, para la estimación de NOx se emplea el modelo de (Pattas & Häfner, 1973), tomando en cuenta seis reacciones químicas propias del extensamente conocido mecanismo de Zeldovich, que establece que la formación del NO térmico crece exponencialmente con la temperatura, y es considerable la cantidad del mismo que se puede generar en presencia de una llama con temperaturas a partir de 1773K (Llamazares et al., 2015). Ahora, cuando las temperaturas con inferiores a 1273K, las emisiones de NO se reducen significativamente, dependiendo en este caso del contenido de nitrógeno del combustible. A continuación, en la Tabla 2-8, se presentan las seis ecuaciones

participantes, con sus respectivas constantes participantes, y la obtención de reactivos por cada una de ellas.

Tabla 2-8 Reacciones de formación de compuestos de nitrógeno según el mecanismo de Zeldovich

No.	Estequiometría	Tasa de formación $k_i = k_{0,i} \cdot T^a \cdot e^{\left(\frac{-T A_i}{T}\right)}$	k_0	a (-)	T_A (K)
R1	$N_2 + O = NO + N$	$r_1 = k_1 \cdot c_{N_2} \cdot c_O$	4.93E13	0.0472	38048.01
R2	$O_2 + N = NO + O$	$r_2 = k_2 \cdot c_{O_2} \cdot c_N$	1.48E08	1.5	2859.01
R3	$N + OH = NO + H$	$r_3 = k_3 \cdot c_{OH} \cdot c_N$	4.22E13	0.0	0.0
R4	$N_2O + O = NO + NO$	$r_4 = k_4 \cdot c_{N_2O} \cdot c_O$	4.58E13	0.0	12130.6
R5	$O_2 + N_2 = N_2O + O$	$r_5 = k_5 \cdot c_{O_2} \cdot c_{N_2}$	2.25E10	0.825	50569.7
R6	$OH + N_2 = N_2O + H$	$r_6 = k_2 \cdot c_{OH} \cdot c_{N_2}$	9.14E07	1.148	36190.66

Fuente: (AVL List GmbH, 2013)

En cambio, para la estimación de CO en el proceso de combustión, dentro del software AVL BOOST™ está implementado un modelo basado en el desarrollado por (Onorati et al., 2001), considerando dos reacciones, como se puede ver en la Tabla 2-9.

Tabla 2-9 Reacciones de formación de monóxido de carbono según el modelo de Onorati et al.

No.	Estequiometría	Tasa de formación
R7	$CO + OH = CO_2 + H$	$r_1 = 6.76 \cdot 10^{10} \cdot e^{\left(\frac{T}{1102.0}\right)} \cdot c_{CO} \cdot c_{OH}$
R8	$CO + O_2 = CO_2 + O$	$r_2 = 2.51 \cdot 10^{12} \cdot e^{\left(\frac{-24055.0}{T}\right)} \cdot c_{CO} \cdot c_{O_2}$

Fuente: (AVL List GmbH, 2013)

La formación de este contaminante parte de, según planteamiento por (Lapuerta & Ballesteros, 2014) de dos etapas fundamentales dentro de la combustión de un hidrocarburo: una primera que supone la ruptura de las moléculas de combustible para formar CO, y una segunda que es la oxidación del CO a CO2. Es bien conocido que la oxidación del CO es un proceso de consecución lento, a menos que haya una especie presente una especie que contenga el radical OH, considerando que las reacciones que involucran O2 y el radical O son mucho más lentas.

Dentro del planteamiento de (Lapuerta & Ballesteros, 2014) se asume que el agua es la especie que aporta el hidrógeno, formándose así el radical hidroxilo (OH) requerido en la reacción R7. Como resultado de esta reacción R7 (proceso de oxidación de CO), se

producen CO₂ y átomos de hidrógeno, los mismos que reaccionan con el oxígeno para formar OH y O, produciéndose así una reacción en cadena.

Para concluir, dentro del software AVL BOOST™ para la estimación de emisión de Soot existen dos modelos diferentes implementados: un primero utilizado en cálculos de tipo 2-zonas (Schubiger et al., 2002), y uno empleado en casos de cálculo multizona (Hiroyasu et al., 1983). Debido a que, como en posteriores capítulos se expone un modelo de simulación del motor con base en dos zonas (quemados e inquemados), entonces se aplica el modelo de emisión según (Schubiger et al., 2002) para la estimación de Soot.

Este modelo considera dos reacciones para el mecanismo de formación de Soot, ambas gobernadas por mecanismos de reacción cinética. Una primera reacción de formación de soot $dm_{s,f}/dt$ es atribuida a la tasa de combustión en la fase de difusión (producida posterior al punto de máxima presión y fase de combustión violenta, caracterizada por un proceso de quemado de combustible más gradual y donde se libera el grueso de la energía aportada por el combustible, donde se produce la temperatura más alta alcanzada en el cilindro) (Melgarejo, 2015).

La reacción de oxidación, en este punto, depende de la masa neta actual de soot en el cilindro y la disponibilidad de oxígeno en la zona de quemados. Además, (AVL List GmbH, 2013) agrega un término τ_{char} relacionado a la tasa de liberación de calor global. A continuación, en la Tabla 2-10, se exponen las dos reacciones de formación de soot según el modelo empleado de dos zonas.

Tabla 2-10 Reacciones de formación de soot según el modelo de Schubiger et al.

No.	Tasa de formación
R9	$\frac{dm_{s,f}}{dt} = A_{s,f} \cdot \frac{dm_{fb,diff}}{dt} \cdot \left(\frac{P}{P_{ref}}\right) \cdot e^{\frac{E_{s,f}}{R_m \cdot T}}$
R10	$\frac{dm_{s,o}}{dt} = A_{s,o} \cdot \frac{1}{\tau_{char}} \cdot (m_{soot})^{n2} \cdot \left(\frac{P_{O_2}}{P_{O_2,ref}}\right) \cdot e^{\frac{E_{s,o}}{R_m \cdot T}}$

Fuente: (AVL List GmbH, 2013)

Como se puede ver, tanto en la ecuación R9 y R10, existe una alta dependencia con respecto a la presión actual y de referencia en el cilindro, así como a la presión parcial de oxígeno actual y de referencia respectivamente.

Para la emisión de CO₂, no se aplica un modelo específico, sino que como se menciona en el apartado 2.1.3, se basa con respecto a factores de emisión específicos del combustible, recalcando que, según Ec. (2-23), una vez que se conoce la emisión de CO₂ de un combustible de referencia en un motor, se puede realizar la extrapolación de la emisión de un combustible diferente, asumiendo en una primera aproximación la eficiencia de la combustión sigue siendo similar.

2.4.3. Normativa de control de emisiones Euro III

A causa de la formación de los contaminantes primarios anteriormente mencionados, se han venido desarrollando una serie de decretos y disposiciones legales con el propósito de reducir estas emisiones que se expulsan al medio ambiente por los vehículos de carretera. En la Unión Europea, tal como lo enuncia (Sánchez et al., 2019), la Agencia Europea del Medio Ambiente ha creado unas directivas denominadas normas EURO, cuyas denominaciones para vehículos comerciales, vehículos pesados como autobuses, camiones y tracto camiones, se designan con números romanos, como EURO I, EURO II y EURO III, etc. Es importante aclarar que, el control de emisiones se ve relacionado con el control sobre la calidad de los combustibles, por lo que a la postre existen normas EURO que controlan los aspectos característicos de referencia de los mismos.

Como se había señalado anteriormente en el apartado 1.1, en la actualidad en varios países de Latinoamérica, y de forma específica en la República del Ecuador, tanto para la calidad de combustible, como para el control de emisiones, se aplica generalmente la normativa Euro III, y en casos especiales sobre la composición del combustible por regiones se utiliza como base la normativa de normalización INEN ecuatoriana.

Centrando los fundamentos sobre el control de emisiones, los valores límite de formación para un vehículo de transporte de pasajeros, con categorización M2 y M3, y utilización únicamente de diésel como combustible, se han establecido con base a tres ciclos de prueba definidos por la directiva 88/77/EC (Parlamento Europeo, 1999): el ciclo estacionario europeo ESC, el ciclo transitorio europeo ETC y el ciclo de prueba de respuesta de carga del motor ELR.

El ciclo estacionario europeo ESC, es un ciclo de prueba que consta de varios modos de régimen de giro y potencia que cubren el rango de funcionamiento típico de los motores

diésel. Está conformado por 13 modos en estado estable y 3 modos en formato aleatorio. Los valores de emisión se obtienen a través de la media ponderada de las emisiones en cada uno de los 13 modos. De la prueba aleatoria, solo se miden las emisiones de NOx, los mismos que no deben exceder el valor interpolado de los 4 modos más cercanos más el 10% (Fig. 2-7). Esta comprobación de control de NOx garantiza la eficacia del control de emisiones del motor dentro del rango de funcionamiento típico del motor.

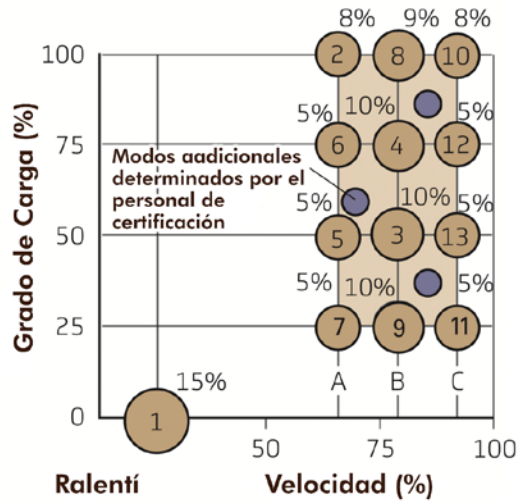


Fig. 2-7 Modos de análisis por régimen de giro y potencia para el cálculo de emisiones de NOx según el ciclo estacionario europeo ESC (Delphi, 2018)

Ahora bien, para el ciclo de prueba ETC, (Parlamento Europeo, 1999) planeta que a lo largo de un ciclo de transición prescrito de condiciones de funcionamiento del motor caliente, basado en las circunstancias específicas de conducción en carretera de motores de gran potencia instalados en camiones y autobuses, se examinarán los contaminantes tras diluir el gas de escapeo total con aire ambiente acondicionado. Como se puede ver en la Fig. 2-8, este ciclo está dividido en 3 partes iguales: recorrido urbano, recorrido rural, y autopista.

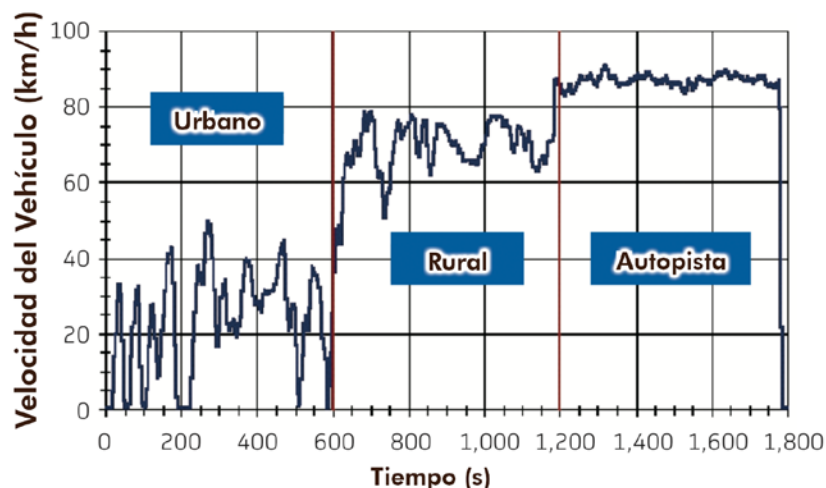


Fig. 2-8 Etapas de medición segundo a segundo dentro el ciclo transitorio europeo ETC (Delphi, 2018)

De manera complementaria, el ciclo de prueba de respuesta de carga del motor ELR permite la medición únicamente de humos, definido mediante muestreo a régimen de funcionamiento fijo y muestreo de tipo aleatorio. Este último, está representado mediante un régimen de giro aleatorio y una carga inicial igualmente aleatoria (Fig. 2-9). Los resultados de la medición de humos durante el muestreo, según (Parlamento Europeo, 1999), no deben exceder el 20% del mayor valor de regímenes de funcionamiento cercanos o más del 5% del valor límite de humos. El valor más pronunciado de humos es seleccionado.

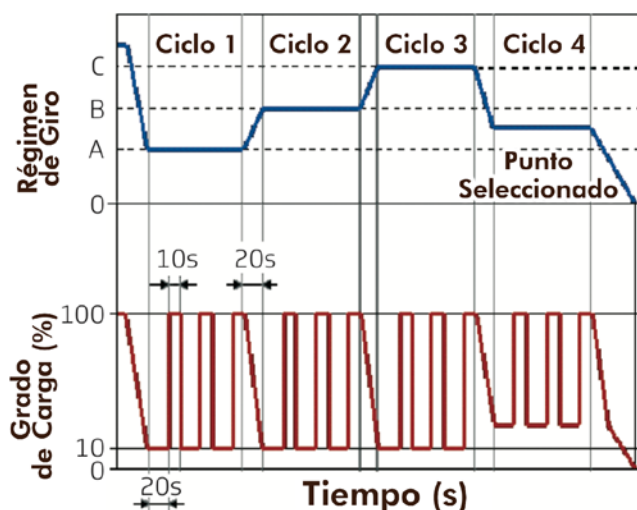


Fig. 2-9 Modos de muestreo con relación al régimen de giro y grado de carga para la estimación de humos según el ciclo de prueba de respuesta a la carga del motor ELR (Delphi, 2018)

A partir de los tres ciclos europeos expuestos, la normativa Euro III – Dir 88/77/EC, modificada según la Dir 1999/96/EC (Parlamento Europeo, 1999) y la Dir 2001/27/EC (Parlamento Europeo, 2001), se marcan las siguientes directrices de control de emisiones, y valores límites de emisión (para TA: 10/2000 y FR: 10/2001) (Tabla 2-11):

- Los motores diésel son testeados mediante los ciclos ESC y ELR. La medición de NOx puede ser testada mediante ciclo ETC (6.5 g/kWh) si lo requiriera la autoridad.
- Los motores diésel adecuados con dispositivos post-tratamiento (filtro de partículas, De-NOx) son testeados mediante los 3 ciclos: ESC, ELR y ETC.
- Las mediciones de NOx realizadas en los puntos de control aleatorios en el test ESC no deben superar por más del 10% de los valores interpolados obtenidos de los modos adyacentes.

Tabla 2-11 Valores límites de emisión – Normativa Euro III

Emisiones	Unidades	Euro III	
		ESC / ELR	ETC
CO	g/kWh	2.1	5.45
HC		0.66	-
NMHC		-	0.78
CH4*		-	1.6
NOx		5.0	5.0
PM	m^{-1}	0.1/0.13	0.16/0.21
Smoke		0.8	-

Fuente: (Delphi, 2018), (Parlamento Europeo, 2001).

En cuestión de la calidad del diésel en el Ecuador, a nivel general se maneja sobre características expuestas dentro de la norma Euro III para el combustible, aunque es de uso extendido además la normativa local expuesta por el Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN, 2015) sobre productos derivados de petróleo, requisitos de composición del diésel Premium (de bajo contenido de azufre).

A continuación, en la Tabla 2-12 , se presentan las características (en valores mínimo y máximo), tanto según la normativa Euro III y la norma INEN 1489.

Tabla 2-12 Propiedades características del diésel – Normativa Euro III – INEN 1489

Parámetro	Unidades	Euro III		INEN 1489 (8va revisión)	
		Min	Máx	Min	Máx
Número Cetano	-	49	53	45	-
Densidad a 15°C	kg/m ³	835	845	-	-
Temp. Destilación 50%	°C	245	-	-	-
Temp. Destilación 90%	°C	320	340	-	360
Punto de ebullición FBP	°C	-	370	-	-
Viscosidad a 40°C	mm ² /s	2.5	3.5	2.0	5.0
Contenido de Azufre	mg/kg	-	300	-	0.05%*
Punto de inflamabilidad	°C	55	-	51	-
Corrosión a la lámina de cobre		Clase 1		-	1 ^a
Contenido de ceniza	% m/m	-	0.01	-	0.01
Contenido de agua	% m/m	-	0.05	-	0.05

*Corresponde a fracción de masa expresada en porcentaje.

Fuente: (Delphi, 2018), (Parlamento Europeo, 2001).

Con respecto al combustible, tal como lo indica (Lapuerta & Hernández, 2014), puede también ser interesante conocer el dosado estequiométrico correspondiente a las condiciones locales de combustión, para lo cual hay que considerar que, cuando se recirculan gases de escape, la fracción molar de oxígeno en el oxidante es inferior a la del aire

Cabe recordar que, tal como se expuso en el apartado 1.1, actualmente no existe un control sobre la calidad del combustible diésel en el Ecuador, razón por la cual la introducción hacia nuevas tecnologías mantiene un retraso considerable con respecto a otros países de Latinoamérica, menor aún si consideramos este vacío con respecto a tecnologías empleadas en países de la Unión Europea.

2.5. Revisión del estado de la técnica sobre el efecto de las condiciones ambientales en motores y vehículos diésel

Dentro del desarrollo tecnológico en la automoción, la evaluación de la eficiencia energética en motores de combustión interna alternativos (MCIA) siempre ha establecido nuevas pautas de seguimiento hacia una meta en común, establecer nuevas metodologías para la disminución en el consumo de combustibles fósiles, al ser estos elementos finitos

no renovables, así como la reducción en la emisión de gases contaminantes, de efecto invernadero y partículas procedentes de dicho proceso térmico.

Si bien la viabilidad de la electrificación en autobuses y camiones de tamaño mediano y pesado, tanto de pasajeros como de carga, estará lista en un futuro próximo, en la actualidad el motor diésel aún mantiene su hegemonía sobre el resto de configuraciones, principalmente debido a los bajos costes de producción de combustible, así como las continuas mejoras en términos de rendimiento, consumo de combustible y emisiones contaminantes.

En la actualidad, la comunidad científica, los constructores y diseñadores siguen tres premisas principales de acción para conseguir estos objetivos (Hu et al., 2021):

- Establecer medios que mejoren la eficiencia energética y las prestaciones de los sistemas de propulsión existentes.
- Instaurar una transición hacia la utilización de combustibles con menor contenido de carbón (gas natural, hidrógeno, energía eléctrica y energía renovable).
- Desarrollar tecnologías de captura y transformación de los gases resultantes del proceso de combustión en productos con un menor efecto nocivo para la naturaleza (catalizadores, sistemas de transformación de NOx, filtros antipartículas)

A continuación, se realiza una revisión del estado de la técnica, en primer lugar, desde la perspectiva de funcionamiento individual del motor de combustión interna, para posteriormente la evaluación desde el campo investigativo realizado tomando en cuenta el conjunto completo del autobús en ruta (o en su contraparte mediante análisis en dinamómetro).

2.5.1. Efectos sobre el comportamiento de motores diésel.

Siguiendo la primera línea de acción, para el establecimiento de medios de mejora en la eficiencia y las prestaciones de las máquinas térmicas, es importante analizar la influencia de todos los elementos que participan en el proceso de combustión: la configuración técnica y tecnológica del motor (aspiración natural o sobrealimentación), las características cualitativas del combustible; y, principalmente, las condiciones

ambientales (presión atmosférica, temperatura y humedad ambiental) en las que ocurre todo el fenómeno.

Es así que, tal como lo señala (Lapuerta, Armas, Agudelo, & Sánchez, 2006), la variación de la presión y la temperatura atmosférica tiene un efecto en la densidad del aire y su composición y, en consecuencia, en las prestaciones de los motores de combustión alternativos MCIA diésel, siendo más importante en tecnologías de aspiración natural. Dentro de su investigación relativa al efecto de las condiciones ambientales sobre el funcionamiento, (Lapuerta, Armas, Agudelo, & Sánchez, 2006) establecen inicialmente la necesidad de utilizar la ecuación hidrostática atmosférica, en base a considerar un determinado perfil de temperaturas (isotermo o triangular), como medio de estimación de la composición del aire, prediciendo así la fracción molar de oxígeno, y de nitrógeno, en el aire, y de esta forma estimar la densidad del aire en cada uno de los puntos.

Basándose en esta diferencia en la composición del aire, la explicación sobre la disminución de las prestaciones en MCIA, con respecto a la variación de la altitud, se centra, por un lado, en la alteración de la proporción entre la cantidad de aire y combustible que entran en la cámara (relación combustible - aire), por otro lado, tanto en la variación del rendimiento volumétrico, como la capacidad del motor alternativo para renovar la masa de aire en el cilindro, como en el rendimiento indicado, ya que, como apunta (Lapuerta, Armas, Agudelo, & Sánchez, 2006), en estas condiciones la presión en el cilindro es menor a lo largo de todo el ciclo del motor (Fig. 2-10).

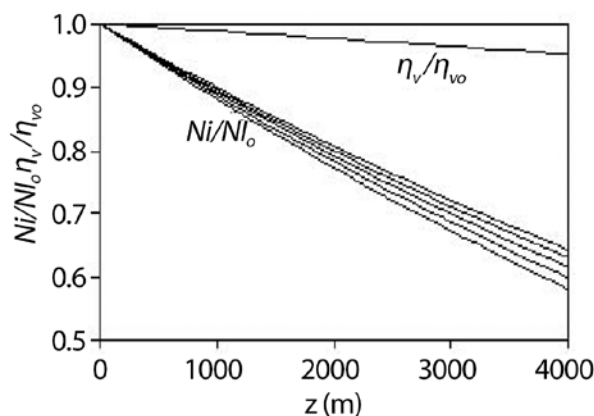


Fig. 2-10 Efecto de la altitud sobre el rendimiento volumétrico (η_v/η_{vo}) y la potencia efectiva máxima (N_i/N_{i_0}) de un motor de aspiración natural suponiendo una columna triangular (Lapuerta, Armas, Agudelo, & Agudelo, 2006)

Esta disminución en el rendimiento indicado es idéntica a la disminución del rendimiento efectivo, implicando que el peso de las pérdidas mecánicas crezca frente a una potencia indicada que disminuye y que, por tanto, la pérdida relativa de potencia efectiva sea incluso mayor que la indicada, y creciente al disminuir el rendimiento mecánico del motor. Otros factores como la incorporación del combustible también influyen (Lapuerta, Armas, Agudelo, & Sánchez, 2006), lo que ocasiona una pérdida de potencia indicada y un aumento en el consumo específico de combustible (Agudelo et al., 2009).

En términos de presión, si la presión máxima a la que se llega dentro del motor es r_c veces (relación de compresión) la presión atmosférica en un motor con aspiración natural, entonces a una mayor altitud la presión antes de la auto-ignición es menor dentro de la cámara, obteniendo como consecuencia el desarrollo de una menor potencia por el MEC ya que, según (Wang et al., 2013), el empuje que recibe el motor después de la explosión del combustible es menor a comparación de un motor que funciona a nivel del mar, como se puede ver en la Fig. 2-11.

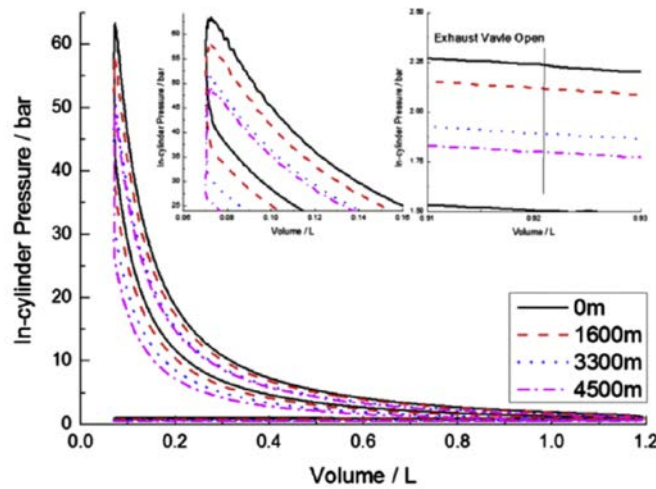


Fig. 2-11 Presión dentro del cilindro versus el volumen de la cámara de combustión a diferentes altitudes (Wang et al., 2013)

En términos de potencia, se conoce que un motor desarrolla una menor potencia cuando trabaja a mayores altitudes, en gran parte debido a esa amplia variabilidad de las condiciones atmosféricas, principalmente a dos factores principales: una mayor o menor presión atmosférica, y un cambio en la densidad del aire, como se expuso en el apartado 2.1.1 para aire seco, y apartado 2.1.2 para aire húmedo. De forma específica, la variación de la altitud disminuye notablemente la potencia indicada, y por tanto la efectiva, provocando además una prolongación del período de retraso al encendido, un incremento

de la tasa de liberación de calor y una reducción de la duración de la combustión en todo el rango de régimen de giro (Lapuerta, Armas, Agudelo, & Sánchez, 2006), siendo este efecto minimizado en el caso de motores sobrealimentados (Lizhong et al., 1995). La disminución de oxígeno en el aire se traduce en un mayor consumo específico BSFC, lo que en términos del vehículo representa un incremento en el consumo de combustible referido a la distancia recorrida (L/100km).

En resumen, según lo estudiado anteriormente, los parámetros de potencia, eficiencia y consumo de combustible, cuando el motor funciona en condiciones de mayor altitud, están relacionados entre sí, por lo que la variación de uno de ellos afectaría a los otros dos de la misma manera. Esto se debe a que, además a lo expuesto anteriormente, primero a una mayor altitud la densidad del aire es menor, la fracción molar de oxígeno es igualmente menor, además que, si la presión del aire en el exterior es menor, entonces el empuje necesario para la introducción del aire en el cilindro y el desplazamiento de los gases de escape también va a ser menor.

En el caso de las emisiones, (Lapuerta, Armas, Agudelo, & Agudelo, 2006) denota la participación de la altitud sobre ciertos parámetros característicos en el proceso de combustión diésel, como lo son la temperatura adiabática de la llama, el tiempo de retraso, y el lift-off, tanto en motores de aspiración natural, como sobrealimentados, cuyo efecto sobre las emisiones de NO_x, por ejemplo, representaron una disminución entorno al 11% para altitudes de 1850 m.s.n.m., y de un 2% para altitudes de entre 1600 y 2160 m.s.n.m. en sobrealimentación. Considerando que, según (Tibaquirá & Burbano, 2003), el NO_x se forma en los procesos de combustión de los combustibles fósiles, su conformación mantiene dependencia con respecto a: la máxima temperatura de combustión del proceso y su evolución temporal, la presión en la cámara de combustión y la concentración del oxígeno. Tal como lo expresa (J. G. Gil & Cruz, 2018), el efecto de la altitud sobre las emisiones de NO_x depende de diferentes variables; donde principalmente por el incremento de la altitud, la temperatura máxima en los cilindros disminuye, porque la presión máxima en el cilindro también decrece, causado por la diferencia de aire atmosférico.

Respecto a la formación de monóxido de carbono CO, e hidrocarburos sin quemar HC, la dependencia de los factores ambientales se verifica sobre la temperatura y presión que

se ha generado en la cámara de combustión. De esta forma, (J. G. Gil & Cruz, 2018) expone que, con el incremento de la altitud, la presión interna del cilindro disminuye, lo que ocasiona un incremento en “jet-to-wall impingements”, como fenómeno principal de generación de las emisiones anteriormente mencionadas. Finalmente, la formación de Soot es resultado de un proceso de combustión incompleto, acentuado de forma general con respecto a una mayor altitud, teniendo como efecto principal un mayor retraso del autoencendido, lo que ocasionaría una fase más corta de combustión tardía.

Otros investigadores han analizado con mayor detalle el efecto sobre las emisiones, considerando dos condiciones operativas cuando el motor trabaja a altitudes elevadas, y la por ende la cantidad de aire se reduce: por un lado, si la cantidad de combustible inyectado se reduce con la finalidad de mantener la relación combustible – aire, o si la cantidad de combustible se mantiene constante, o hasta aumenta (para compensar las pérdidas de eficiencia internas).

Para evaluar estos efectos debidos a la variación de las características ambientales en el proceso de combustión en motores MCIA diésel se pueden seguir metodologías con base a modelos matemáticos computacionales, o modelos experimentales. Los modelos computacionales para la estimación completa de las características de prestaciones, consumo de combustible y emisiones de gases contaminantes en MCIA, como lo es el paquete informático AVL BOOST™, proveen una interfaz intuitiva muy completa, económica y con resultados bastante exactos. Otras investigaciones científicas de igual forma utilizan modelos computacionales para predecir el comportamiento de los motores diésel, como los especificados por (L. Yu et al., 2014), (Z. X. Zhu et al., 2014) y (Z. Zhu et al., 2015), centrándose en mejorar el rendimiento del motor teniendo en cuenta los cambios en las condiciones ambientales.

Estas metodologías de simulación son una opción a elegir, especialmente en países con menos acceso a tecnología de medición avanzada (para adquirir datos ya sea en laboratorio de motores o en condiciones de conducción). Las metodologías experimentales, aun teniendo la ventaja de evaluar directamente los resultados sobre el motor físico, tienen la desventaja de ser muy costosas, tomar demasiado tiempo en preparación y calibración, así como la dificultad de obtener relaciones explícitas causa-efecto a partir de los resultados.

Es así que, aplicando modelos matemáticos computacionales, (Yang et al., 2018) analizaron un sistema diésel para motores de aspiración natural, con rango de variación de análisis entre 0 m.s.n.m. y 4500 m.s.n.m., en diferentes regímenes de funcionamiento, verificando una reducción del 5-10% en la potencia generada, comprobando además el mejoramiento proporcional del sistema (aproximadamente un 24%) con el empleo de sistema turbo sobrealimentados. En cambio, (Akasyah et al., 2015) estimaron el comportamiento de un motor diésel bajo varias condiciones de temperatura y presión ambiental, con utilización tanto de diésel, como de etanol y metanol en el proceso de combustión, visualizando una reducción de la presión en el cilindro cuando la temperatura en el múltiple de admisión se incrementa. Los autores concluyeron que, en el caso del etanol, se produce la mayor presión de combustión (174.8 bar) a una temperatura ambiental de 30°C, mientras que, con la utilización del diésel como combustible, se produciría un pico de presión menor (103.9 bar) a una temperatura ambiental de 50°C.

Experimentalmente, la investigación sobre el efecto de las condiciones ambientales en el proceso de combustión diésel ha sido ampliamente estudiada. Es así que (Chaffin & Ullman, 1994) comprobaron los efectos del incremento de la altitud en motores diésel Heavy-Duty, tanto para presiones atmosféricas registradas en Detroit (989 hPa), como para dos altitudes simuladas, en Denver (826 hPa) y Ciudad de México (779 hPa), bajo condiciones de combustible constante controlado mediante DDEC II. Los resultados expusieron que, a plena carga, el torque se reduce ligeramente con el incremento de la altitud; mientras que, en el campo de las emisiones de HC, CO, y material particulado, se experimenta un crecimiento en estas emisiones donde, por ejemplo, la emisión de CO se incrementó en un 60%, y la de PM en un 47% cuando se pasó de 989 hPa a 779 hPa de presión atmosférica.

Mientras tanto, centrándose principalmente en motores diésel de aspiración natural, (Human et al., 1990) visualizaron en un motor 1980 Caterpillar 3208 una disminución del 10% en NOx incrementando de 1800 m.s.n.m. a 3050 m.s.n.m. la altitud. Paralelamente, (Human et al., 1990) denotaron un incremento de HC, CO y emisiones de smoke en estas condiciones experimentales, mientras que (Ghazikhani et al., 2013) encontraron un aumento del 40% en la emisión de soot al pasar de 350 m.s.n.m. a 975 m.s.n.m. debido, principalmente, a la disminución de la densidad del aire en la admisión, y por tanto una combustión incompleta en motores diésel de inyección directa. Adicionalmente, (Galindo

et al., 2014) y (Bermúdez et al., 2017) han descrito un banco de pruebas experimental con la capacidad para reproducir la presión ambiental y la temperatura en condiciones de elevadas altitudes (hasta 7000 m.s.n.m.). Las pruebas de motor pueden realizarse tanto en condiciones estacionarias, y también bajo simulación del comportamiento dinámico en ciclos de conducción vehicular.

Actualmente, la introducción de sistemas turboalimentados ha representado una mejora sustancial, tanto en el aumento de prestaciones y la reducción del consumo de combustible y emisiones, pero no está exento de experimentar los efectos de la variación de las condiciones ambientales. Es así que, por ejemplo, (Bermúdez et al., 2017) analizaron el comportamiento de un motor diésel turboalimentado comparándolo en rangos de altitud entre 150 m.s.n.m. y 3000 m.s.n.m. donde, el comportamiento dinámico de una turbina de geometría variable durante el ciclo de conducción EDC genera picos de presión elevados en el múltiple de escape que, sumados a las bajas presiones de carga en la admisión, reducen la eficiencia indicada con el consecuente aumento en BSFC y las emisiones. Las características del comportamiento de estos sistemas, con respecto a la altitud, se ven limitadas debido a tres factores principales: los límites de presión en el cilindro, la velocidad media de la turbina y la temperatura alcanzada en el escape (Yang et al., 2018), además de los límites de diseño funcional del motor diésel (Szedlmayer & Kweon, 2016).

Otro factor importante a considerar es el grado de carga y el régimen de giro, tal como lo analizaron (Szedlmayer & Kweon, 2016) y (He et al., 2011), quienes expusieron que a medida que se incrementa la altitud, la emisión de HC, CO, NOx y smoke se incrementan en un motor diésel, especialmente a regímenes de giro de 2000 rpm cuando, por ejemplo, en condiciones especiales de funcionamiento del motor (carga completa y bajas revoluciones), la reducción de emisiones de HC y NOx puede ser observada en grandes altitudes, o condiciones de mayor eficiencia observadas a mayor temperatura de inyección de combustible y disminución del tiempo de retraso al encendido.

Por otro lado, la investigación sobre el comportamiento del tipo de combustible, bajo estas condiciones ambientales, provee una perspectiva complementaria al análisis de prestaciones, consumo de combustible y emisiones igualmente interesante. De esta forma, (Mamat et al., 2010) observaron que en motores diésel utilizando biodiesel y diésel con

ultra baja concentración de azufre (ULSD) la caída de presión en el múltiple de admisión tiene un impacto negativo no solo en eficiencia y la potencia entregada, sino también en las emisiones, donde se verificaron pequeñas diferencias por las propiedades de cada combustible. En el caso de uso de metanol, etanol y diésel convencional a 30°C, (Akasyah et al., 2015) observaron que dado que el metanol tiene una presión de vapor mucho más elevada, comparada con los otros dos combustibles, las diferentes propiedades del combustible acarrearán diferentes comportamientos en el proceso de combustión de acuerdo a las condiciones ambientales a las que se realiza.

Finalmente, una variable atmosférica a estudiar, aunque su participación en el fenómeno de combustión es inferior, es la humedad ambiental. El estado de la técnica en este caso sigue tendencias diferentes ya que, por ejemplo, investigadores como (Lapuerta, Armas, Agudelo, & Sánchez, 2006) prefieren no abordar este efecto por cuanto la corrección por humedad se suele incorporar en el término de presión, restando de ésta la presión del vapor de agua atmosférico para calcular la cantidad de aire presente. Existen investigaciones que denotan de forma más extendida la participación de la humedad en el proceso de combustión, cuyos resultados verificaron una reducción de NO_x, así como una menor cantidad PM en varias etapas de incremento de la humedad experimentalmente, y un aumento de CO en las mismas condiciones (McCormick et al., 2012). Cabe recalcar que dichos resultados demostraron un efecto de la humedad menor que los de la temperatura y la presión ambiente, mucho más notorios.

2.5.2. Efectos sobre autobuses de transporte público de pasajeros con motor diésel.

En primer lugar es importante mencionar que, el modelo de estimación de las prestaciones, consumo y emisiones del transporte público, en la presente investigación, parte de la aplicación de un enfoque tecnológico con tipología Bottom-Up para la obtención de un mayor detalle dentro del inventario de emisiones; considerando que, en este caso, a diferencia de la aplicación de un enfoque Top-Down, se emplean datos locales con un mayor nivel de detalle o alta resolución, utilizando principalmente información relevante al flujo o volúmenes vehiculares, tipo y longitud de vías, los perfiles de horarios de tráfico, así como los perfiles de altitud, velocidad y factores ambientales presentes (Carmona Aparicio et al., 2016).

El enfoque Bottom-Up, al ser considerado el primer eslabón hacia la investigación del control de las fuentes energéticas, su consumo, y la calidad de los productos resultantes del proceso de combustión, en este caso de un combustible fósil de tipo diésel, permite el direccionamiento de los estudios científicos actuales desde cuatro directrices de cálculo principales: basados en la actividad del transporte, basado en el consumo de energía, basados en el contenido de carbono del combustible – hidrocarburos y, cálculos específicos según el agente contaminador.

Centrándonos únicamente en cálculos basados en la actividad del transporte, uno de los principales requerimientos para hacer un correcto diagnóstico y seguimiento del consumo y emisiones contaminantes, por tipo de unidad de transporte, sería llevar a cabo un inventario de emisiones atmosféricas de fuentes móviles. Con base en esta premisa, en Latinoamérica se han realizado algunos estudios tomando en cuenta varios factores de movilidad estadísticos Tier 2, como por ejemplo, (Ríos Bedoya et al., 2016) con uso de los datos de movilidad cotidiana arrojados por la EOD2012 (SECTRA, 2014) para autobuses de transporte público no articulados, estimó que para la ciudad de Medellín, Colombia, para una velocidad promedio de 14 km/h, con una tasa de ocupación de 18 pasajeros por vehículo, se obtuvo un factor de emisión general de $35.01 \text{ g } CO_2 / \text{pasajero} * \text{km}$, distinguiendo por un lado la motivación del viaje, el número de desplazamientos, y distribuciones sobre el perfil del pasajero.

En otro contexto, igualmente con respecto a la actividad del transporte, otros autores han hecho aplicación de distintos modelos informáticos y de simulación Tier 3, con introducción de mayor o menor cantidad de datos de entrada. Entre ellos, (Sebastian & Vargas, 2018), a través del uso del modelo IVE (ISSRC, 2008), hacen estimaciones de emisión por día de empleo de las unidades para la ciudad de Bogotá, para un recorrido tipo únicamente de ida de 12.5km (1.05% de pendiente promedio), cuyos valores para unidades Euro III son de 99.36 g/h para CO, 129.06 g/h para NOx y 100.53 g/h para Soot, considerando un número determinado de paradas, horas pico de tráfico, variables ambientales, y datos de contenido de azufre para el combustible. De igual forma, con base al mismo modelo IVE, (Armijos Pineda & Cueva Cueva, 2017) realizaron una estimación para la ciudad de Loja, en la República del Ecuador, en esta ocasión únicamente para horas de mayor tráfico, separando por un lado rutas arteriales, y por otro lado rutas troncales. Sus resultados enuncian factores de emisión de 15.80 g/km (NOx), 7.45 g/km

(CO) y 3.92 g/km (PM) para rutas arteriales en hora pico, 15.22 g/km (NOx), 7.19 g/km (CO) y 3.77 g/km (PM) para las mismas rutas en hora valle, evidenciando una clara influencia adicional del perfil de velocidad, mucho más claro cuando en rutas troncales se tienen factores de emisión de 10.80 g/km (NOx), 7.44 g/km (CO), y 1.73 g/km (PM) en horas pico, y 10.73 g/km (NOx), 7.38 g/km (CO) y 1.72 g/km (PM) en horas valle para este último recorrido.

Otro trabajo a recalcar, basado en la metodología empleada a través del software COPERT 4, es el realizado previamente por (Ceballos Marcillo & Tinaut Fluixá, 2016), quienes realizaron un primer estudio sobre el consumo y emisiones en un recorrido tipo, considerando dos configuraciones de altitud: una primera con la totalidad del tramo sin pendientes, y una segunda considerando de forma porcentual una parte del recorrido con pendiente positiva y otra con pendiente negativa. Sus resultados reflejan una estimación para la ciudad de Ambato ($0.8132 \text{ bar}_{\text{atm}}$) de 45.42 L/100km de combustible diésel, y factores de emisión de 3.28 g/km (CO), 11.91 g/km (NOx) y 0.24 g/km (PM).

Es importante enunciar que, a fecha de la actual revisión, no hay constancia de investigaciones realizadas para diferentes condiciones orográficas del Ecuador, con base a modelos informáticos de mayor complejidad para la estimación de emisiones (AVL CRUISE™) que involucren, por un lado, la utilización de los datos de construcción del motor propiamente dicho, así como modelos de verificación de emisión según perfiles reales de conducción, comportamiento del conductor, y perfiles reales de altitud con registro temporal segundo a segundo.

Con base a lo expuesto anteriormente, las referencias sobre modelos de estimación de emisiones por modelos de mayor complejidad se basan de acuerdo a investigaciones realizadas en países europeos y asiáticos, con una cultura de seguimiento y evaluación del impacto de estos factores mucho más extendida. En los últimos años, según lo denota (Chen et al., 2010), en estas regiones del planeta el paradigma inicial sobre la estimación se ha extendido hacia la realización de estudios previos para la evaluación mediante simulación del desarrollo del vehículo en las primeras etapas de diseño.

Herramientas como AVL CRUISE™, V-Elph 2.01, ADvanced VehIcle SimulatOR (ADVISOR), GEM, VECTO y el Powertrain System Analysis Toolkit (PSAT) son algunas de las principales herramientas utilizadas actualmente en el campo de la

investigación, especializadas en el estudio de emisiones para autobuses, camiones y vehículo de carga media – pesada. Por citar algunos ejemplos, (K. Yu et al., 2013) hacen una comparativa del mejoramiento de las prestaciones y el consumo de combustible, según condiciones del vehículo, perfil de aceleración y curva de inclinación, en el software AVL CRUISE™, cuyos resultados exponen que en relación a un vehículo diésel una unidad PBH (parallel hybrid bus) incrementa en un +41.2% sus prestaciones, y reduce su consumo en un -25.8%. En otro ejemplo interesante, (Franco et al., 2015), con utilización de los modelos VECTO y GEM, se extienden hacia la aplicación de varios ciclos de prueba recientes aplicados a vehículos Heavy Duty en Estados Unidos y Europa (WHCV, ACEA long haul, ACEA regional, ACEA urban, ciclo medio 55 mph, ciclo medio 65 mph, y ciclo transitorio ARB) donde, dependiendo del tipo de vehículo, el consumo de combustible se encuentra en el rango de valores entre 150 g/km y 330 g/km (VECTO) y entre 180 g/km y 400 g/km (GEM).

Referente a estudio comparativos de variación de las condiciones atmosféricas, tampoco existen referencias de estudios exhaustivos realizados previamente para las características orográficas del Ecuador. Entre los pocos estudios realizados tomando estas condiciones, (Chen et al., 2010) estimó que, para un vehículo de transporte público de tipo híbrido (diésel – solar), bajo condiciones de optimización de ciclos transitorios, el consumo de combustible aumentaba en diferente proporción con respecto a una temperatura de referencia de 25°C (39.7 L/100km). Así, los incrementos fueron de un +3.6% (30°C), +6.3% (35°C) y 11.1% (40°C), todos para un ambiente de aire húmedo (RH = 50%) en la ciudad de Beijing. Por otro lado, (Toback et al., 2004) plantearon un efecto combinado de la variación de la temperatura y la humedad en buses escolares diésel del Departamento de Transporte de la ciudad de New Jersey, de cuyos resultados se verifica, entre 20°C y 40°C (RH = 65%), un aumento del consumo de combustible del 3.25%, una disminución de la emisión de CO del -29.41% y en NO_x un incremento de +1.35%.

Por último, aun cuando la implementación de herramientas experimentales y de medición portátiles PEMS aún no tienen una aplicación extendida, bien por la dificultad en la calibración del sistema de monitoreo continuo, o por sus costes elevados de puesta en funcionamiento, existen varios trabajos de investigación que han tomado en cuenta la variación de las condiciones ambientales (debido al cambio de altitud) en autobuses diésel, considerando patrones reales de conducción, velocidad y comportamiento del

conductor. Así, en términos de normativa EURO III, (D. Liu et al., 2018) comprobó un factor de emisión de NO_x, para diferentes grados de carga, perfiles de velocidad y perfiles ambientales combinados en la ciudad de Shanghai, Hangzhou y Suzhou, entre 5.0 g/km a 19.1 g/km, mientras que se tiene un factor de emisión de PM entre 0.001 y 0.189 g/km. Por otro lado, (Q. Yu et al., 2016) involucraron términos de influencia con respecto a la ocupación por número de pasajeros en las unidades de transporte, llegando a la conclusión que la mencionada carga afecta significativamente en la formación de CO₂, NO_x y HC a velocidades de 30 km/h y superiores, mientras que la emisión de CO no se ve afectada por este factor, teniendo un impacto importante las aceleraciones realizadas por el conductor. Finalmente, (Z. Liu et al., 2011) analizaron una serie de recorridos de funcionamiento reales en la ciudad de Beijing, concluyendo que la congestión del tráfico y las muy bajas velocidades a las que circularían los autobuses en estas condiciones ocasionarían discrepancias en los resultados para estas secciones. Además, según estos últimos autores, los perfiles reales de conducción ocasionarían experimentalmente un incremento entre el 60% y el 120% comparado con las regulaciones por homologación del vehículo.

Con respecto al uso de PEMS, de forma específica en la República del Ecuador no es factible su aplicación, por la falta de implementos tecnológicos para su desarrollo, además de que institucionalmente el control de emisiones ha sido considerado los últimos años solamente un medio informativo, radicando aquí la importancia de los medios de simulación. Ahora, si bien es cierto esta realidad sobre PEMS se puede extender a otras naciones de la región latinoamericana, hay algunas investigaciones que se han aplicado con relativo éxito en el continente. En uno de estos proyectos, (Giraldo & Huertas, 2019) mediante el uso de PEMS pudieron hacer la medición de consumo de combustible, patrones de manejo, y factores de emisión de CO₂, CO y NO_x en varias ciudades de República de México. Sus resultados fueron concluyentes de forma parcial, obteniendo un consumo promedio de combustible de 0.41 L/km para la ciudad de México D.F., con factores de emisión de 965.8 g/km (CO₂), 41.4 g/km (CO) y 5.3 g/km (NO_x), con la novedad que las emisiones de CO fueron tres veces más elevadas que las indicadas por la literatura para bajas altitudes, mientras que el NO_x se redujo en un 50% de los valores reportados con respecto a condiciones atmosféricas similares.

CAPÍTULO 3

Simulación de las prestaciones y emisiones de un motor diésel de aspiración natural

3.	Simulación de prestaciones y emisiones de un motor diésel de aspiración natural	63
3.1.	Modelo de simulación del motor ADE360N mediante AVL BOOST™	63
3.2.	Configuración orográfica en Ecuador	64
3.3.	Reproducción de prestaciones del motor proporcionadas por el fabricante.	66
3.4.	Estimación de valores de entrada al modelo AVL BOOST™ para distintas altitudes	70
3.5.	Condiciones ambientales y datos de entrada al modelo AVL BOOST™ para distintas altitudes – aire seco.	73
3.6.	Condiciones ambientales y valores de entrada al modelo AVL BOOST™ para distintas altitudes – aire húmedo.	75

3. Simulación de las prestaciones y emisiones de un motor diésel de aspiración natural

Para el desarrollo de la presente investigación, se ha utilizado un modelo computacional a través del paquete informático AVL BOOST™, con introducción de, por un lado, los valores de diseño del motor ADE360N diésel provistos por el fabricante; y, por otro lado, información meteorológica registrada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador para obtención de las condiciones atmosféricas de referencia a diferentes altitudes.

3.1. Modelo de simulación del motor ADE360N mediante AVL BOOST™

El motor considerado para el análisis de la influencia de las condiciones ambientales en su ciclo de funcionamiento es un motor Mercedes Benz ADE 360N Series de aspiración natural, 6 cilindros en línea y una cilindrada de 5,958 litros. Se ha seleccionado un motor diésel de aspiración natural, sin utilización de un sistema de post tratamiento de gases por cuanto es representativo de los autobuses de transporte interurbano de pasajeros en Ecuador y otros países iberoamericanos.

Las principales especificaciones técnicas del motor se encuentran recogidas en la Tabla 3-1, mientras que el modelo de conexión, dirección de flujos, y funcionamiento mecánico en el software se presenta en la Fig. 3-1.

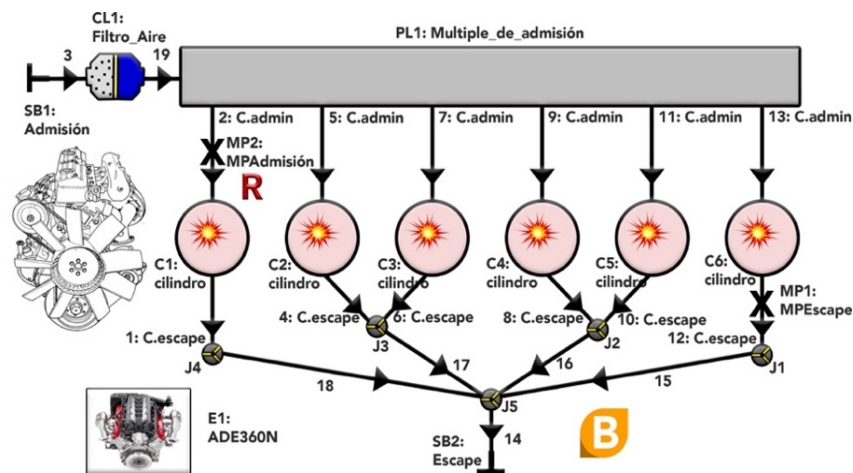


Fig. 3-1 Diseño del modelo en AVL BOOST™ aplicado a la configuración del motor ADE 360N Series de 6 cilindros

Tabla 3-1 Información Técnica Motor ADE 360N Series

Parámetro	Valor
Bore	97.5 mm
Stroke	133 mm
No. of cylinders	6
Cubic Capacity	5.958 l
Compression Ratio	17.25:1
Firing Order	1 - 5 - 3 - 6 - 2 - 4
Combustion system	Direct Injection
Cycle	4 stroke
Maximun Torque*	402 N.m @ 1400 r/min
Output kW*	100 kW @ 2800 r/min

*Detail of Ratings (Automotive) to SABS 013-1977

** **Fuente:** Engine Repair Manual ADE 360 Series. Atlantis Diesel Engines (PTY) LTD.

La característica de aspiración natural supone una gran dependencia de las prestaciones con respecto a la altitud y las condiciones ambientales. Por el contrario, tal como lo indican (Lapuerta, Armas, Agudelo, & Agudelo, 2006), en el caso de motores turboalimentados las variaciones estimadas sobre el desarrollo de la combustión al variar la altitud son casi inapreciables, por cuanto el sistema en sí contrarresta la disminución de la densidad del aire admitido en los cilindros, propio de la variación por efecto de la altitud.

3.2. Configuración orográfica en Ecuador

Las condiciones ambientales tienen un gran impacto en el rendimiento del transporte dentro de los países, como aquellos localizados en América Latina, especialmente Ecuador. Países como el Ecuador, además de otros localizados en la zona de la Cordillera de los Andes en América del Sur, tienen por naturaleza una característica muy típica que los distingue varios países del mundo: existe una clara diferencia de altitud, temperatura y humedad en diferentes puntos de su mapa nacional, con las consecuencias que conlleva esta configuración a las prestaciones, consumo y emisiones de gases contaminantes en los motores de combustión interna alternativos MCIA que se utilizan en los vehículos.

El Ecuador Continental, al estar dividido en tres regiones principales (Costa, Sierra y Amazonía), posee todas las características para ejemplificar la influencia de las condiciones ambientales en varios tipos de configuraciones de acuerdo a la ciudad a ser

analizada. Para llevar a cabo la investigación inicialmente se tomaron en cuenta seis ciudades: Guayaquil (4 m.s.n.m.), Tena (598 m.s.n.m.), Santo Domingo de los Tsáchilas (1000 m.s.n.m.), Santa Isabel (1641 m.s.n.m.), Baños de Agua Santa (1815 m.s.n.m.) y Ambato (2500 m.s.n.m.). Las altitudes y características ambientales de dichas ciudades se presentan en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2 Características ambientales medias de las ciudades seleccionadas del Ecuador

Ciudad	z (m. s. n. m.)	P (bar)	T (°C)	ϕ (%)	$\rho_{a.seco}$ (kg/m ³)
Guayaquil	4	1.0128	26.5	77	1.172
Tena	598	0.9716	23.8	87	1.135
Santo Domingo de los Tsáchilas	1000	0.9537	22.6	87	1.118
Santa Isabel	1641	0.9332	21.2	87	1.099
Baños de Agua Santa	1815	0.8356	14.2	93	1.008
Ambato	2500	0.8132	12.5	75	0.987

Con base al perfil real de presiones y temperaturas correspondiente a las condiciones ambientales en cada una de las ciudades, tomando como referencia las expresiones Ec. (2-4), Ec. (2-5), Ec. (2-8) y Ec. (2-9), desarrolladas en función de un perfil triangular, en conjunto con la aplicación de un gradiente térmico ($K_T = -7.41 \times 10^{-3}$), se calculan los valores de las variables relevantes para cada una de las ciudades, tanto en ámbitos de análisis en aire seco (Tabla 3-3), como su contraparte en aire húmedo (Tabla 3-4).

Tabla 3-3 Características Perfil Real - Aire Seco

Ciudad	X_{O_2} (mol)	X_{N_2} (mol)	R_a (J/kg.K)	PM_a (g/mol)	ψ (-)	σ_a (-)
Guayaquil	0.2100	0.7900	288.30	28.84	3.762	0.00728
Tena	0.2090	0.7909	288.34	28.84	3.784	0.00725
Santo Domingo Tsáchilas	0.2086	0.7914	288.35	28.83	3.793	0.00724
Santa Isabel	0.2081	0.7919	288.37	28.83	3.805	0.00722
Baños de Agua Santa	0.2056	0.7944	288.47	28.82	3.863	0.00713
Ambato	0.2050	0.7950	288.50	28.82	3.878	0.00711

Tabla 3-4 Características Perfil Real - Aire Húmedo

Ciudad	P_{sat} (bar)	ϕ (%)	ω (kg V./kg A.seco)	X_{H_2O} (g/mol)	K_{hum} (-)	$\rho_{a.hum}$ (kg/m ³)
Guayaquil	0.035	0.77	0.017	0.027	0.990	1.160
Tena	0.030	0.87	0.017	0.027	0.990	1.123
Santo Domingo Tsáchilas	0.027	0.87	0.016	0.026	0.991	1.108
Santa Isabel	0.025	0.8	0.014	0.022	0.992	1.090
Baños de Agua Santa	0.016	0.93	0.011	0.018	0.993	1.001
Ambato	0.015	0.75	0.008	0.014	0.995	0.981

3.3. Reproducción de las prestaciones del motor proporcionadas por el fabricante.

La metodología desarrollada en esta primera parte del trabajo debe considerarse como un enfoque de primer orden para estimar el rendimiento del motor cuando cambian las condiciones ambientales asociadas con la altitud. Como primer orden se indica que se han considerado las opciones del modelo AVL BOOST™ para simular la combustión del motor usando una ley de doble Wiebe para imponer la Tasa de Liberación de Calor (Rate of Heat Release ROHR). Este enfoque tiene la ventaja de una relativa simplificación y menor tiempo de cálculo, lo que ha permitido realizar un estudio paramétrico muy completo. Un enfoque de orden superior requeriría incluir todas las relaciones complejas asociadas con el proceso de inyección, la formación de la mezcla, la combustión y la generación de contaminantes que ocurren en un motor diésel. Cabe señalar que, al variar la altitud de 4 a 2500 m.s.n.m., las condiciones ambientales se modifican significativamente, por lo que los efectos de orden inferior pueden considerarse secundarios.

Dentro de las características principales del modelo, se incluyen toda la información y las dimensiones relevantes del motor, es decir, su configuración (ver Figura 2), sus dimensiones geométricas, así como los valores de sincronización de válvulas asociados con los procesos de intercambio de gases. A partir de estos valores, el modelo puede calcular la cantidad de aire admitido en el motor en cada punto de funcionamiento (presión, temperatura, humedad, condiciones de funcionamiento) y, por tanto, los cambios en la cantidad de aire por cilindro y ciclo cuando cambian estas condiciones.

En relación con el sistema de inyección de combustible, la información relevante utilizada es la cantidad de combustible inyectado por cilindro por ciclo, que se calcula a partir del valor de gastos de combustible. No se modela el proceso de inyección y formación de la mezcla aire-combustible dentro del cilindro, aunque obviamente hay una cantidad de combustible que se introduce en el cilindro y determina la cantidad total de calor liberado (Rate of Heat Release) en cada ciclo.

Dentro de la cámara de combustión se considera un modelo de dos zonas, por lo que se calculan las temperaturas de las dos zonas: quemados y no quemados. Asociado a estas temperaturas, la composición química de cada zona se calcula para tener en cuenta la formación de productos de combustión y emisiones contaminantes. Cabe recalcar que, como se indicó anteriormente, el proceso de combustión dentro de la cámara de combustión se simula especificando la Tasa de Liberación de Calor (ROHR), utilizando una función de la Ley de Wiebe, con dos componentes, uno para la combustión premezclada y otro para la combustión por difusión.

Para los coeficientes de producción cinética de NO_x, CO y Soot, se han adoptado los valores estándar propuestos en el código AVL BOOST™. El modelo implementado para la emisión de NO_x es el propuesto por (Pattas & Häfner, 1973), teniendo en cuenta seis reacciones basadas en el conocido mecanismo de Zeldovich. El modelo de CO se basa en el propuesto por (Onorati et al., 2001) y considera dos reacciones de CO con OH y O₂. Finalmente, bajo condiciones de un modelo de cálculo de 2 zonas (Table 2-Zone), entonces el modelo de estimación de Soot se basa en (Schubiger et al., 2002), teniendo en cuenta dos reacciones, una de formación y otra de oxidación, ambas gobernadas por mecanismos cinéticos. La formación de soot se atribuye a la velocidad de combustión de la combustión por difusión. La reacción de oxidación de Soot depende de la masa neta real de Soot en el cilindro y de la disponibilidad de oxígeno en la zona quemada.

El ajuste del modelo AVL BOOST™ del motor se realizó considerando la curva de rendimiento del motor proporcionada por el fabricante. En base a la geometría detallada del motor, incluido los diagramas de sincronización de válvulas de admisión y escape, y las condiciones de funcionamiento en homologación, se ha realizado la calibración del modelo, logrando una muy buena concordancia entre los valores predichos por el modelo

y los valores del fabricante en términos de rendimiento y variables de termo fluidos (como se puede ver en la Tabla 3-5 y la Fig. 3-3 y Fig. 3-4).

El modelo AVL BOOST™ también proporciona los valores de emisiones simulados, aunque el fabricante del motor no ofrece información detallada. Dado que el objetivo es analizar la influencia de los cambios en las condiciones ambientales mediante coeficientes de sensibilidad, este enfoque se ha considerado adecuado.

Para poner a punto el modelo de simulación del motor, se plantea en primer lugar reproducir las prestaciones del mismo en las condiciones que el fabricante (0 m.s.n.m., 1013.25 hPa, 20°C y 50% de humedad relativa).

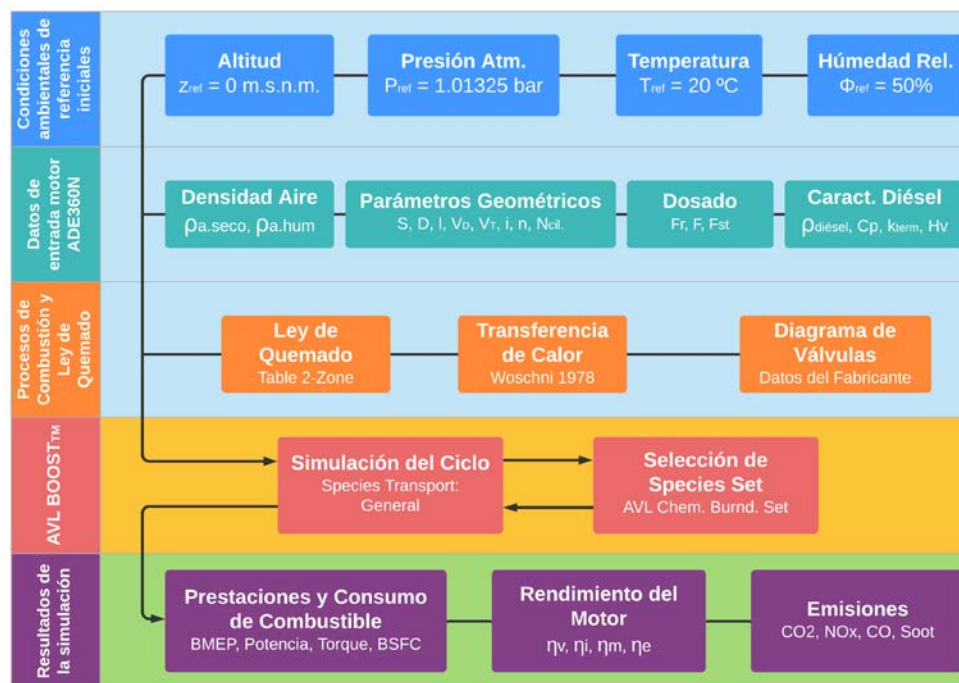


Fig. 3-2 Diagrama de procesos de simulación AVL BOOST™ para las condiciones de referencia del fabricante

Con base a este objetivo inicial se establece un diagrama de procesos inicial dentro de la simulación en AVL BOOST™, considerando tres etapas iniciales: las condiciones ambientales de referencia, los datos de entrada del motor ADE360N, las propiedades del combustible (poder calorífico, dosado estequiométrico F_{st}), dosado en condiciones operativas F y los procesos de combustión y ley de quemado (Fig. 3-2).

Tabla 3-5 Comparativa de los resultados del modelo en AVL BOOST™ con los datos del fabricante del motor

Régimen [rpm]	Torque [N.m]			Potencia [kW]			BSFC [g/kWh]	p _{me} [bar]	F	F _r *	ṁ _a	ṁ _f
	Fabriz.	Modelo	ΔTorque [%]	Fabriz.	Modelo	ΔPotencia [%]						
800	325.1	322.4	-0.8%	27.2	27.0	-3.6%	266.6	6.8	0.0465	0.6732	0.044	0.0138
1000	340.1	328.8	-3.3%	35.6	35.5	-3.0%	258.1	7.2	0.0472	0.6834	0.055	0.0179
1200	360.1	356.4	-1.1%	45.3	44.8	-0.8%	253.0	7.5	0.0485	0.7022	0.066	0.0219
1600	372.5	371.9	-0.2%	62.4	62.3	1.4%	247.4	7.9	0.0493	0.7138	0.088	0.0300
2000	370.2	372.7	0.7%	77.5	78.1	0.8%	245.5	7.9	0.0491	0.7109	0.110	0.0378
2400	356.6	356.8	0.1%	89.6	89.7	1.6%	246.5	7.5	0.0475	0.6877	0.131	0.0448
2800	330.9	329.5	-0.4%	97.0	96.6	1.2%	249.5	7.0	0.0449	0.6501	0.152	0.0511

*Cálculo realizado en base a $F_{st} = 0.0691$, para un combustible de fórmula $C_{12}H_{22}$

A partir de estos datos de entrada (columnas de la parte derecha de la Tabla 3-5) se obtiene como resultado preliminar las curvas de torque, potencia, y consumo específico de combustible en diferentes regímenes de giro del motor (Tabla 3-5), así como las emisiones de CO_2 y de otros contaminantes. Adicionalmente, los valores de gasto de aire y gasto de combustible (kg/s) se incluyen, como resultados obtenidos de la aplicación de la Ec. (3-4) y Ec. (3-6) expuestos en la siguiente sección.

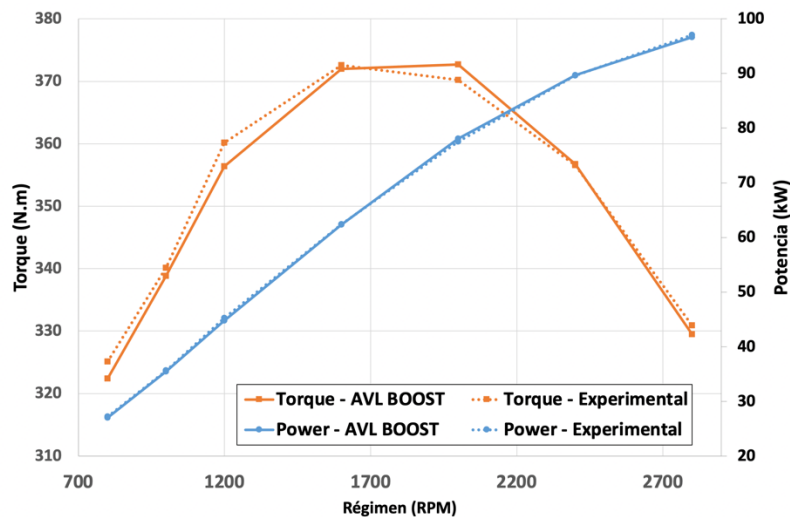


Fig. 3-3 Curvas de Torque y Potencia – Fabricante – AVL BOOST™

Como se puede observar en Fig. 3-3, el modelo de simulación diseñado proporciona resultados muy semejantes con respecto a aquellos de referencia del fabricante, manteniendo un margen de aproximación entre -3.33% y 0.67% para resultados en simulación de torque. Por ello, siendo este rango menor al 5%, se puede considerar el

modelo como válido para reproducir las prestaciones del motor en las condiciones de referencia, permitiendo su empleo para la caracterización y parametrización del efecto de las condiciones ambientales.

Tal como también se indica en la Fig. 3-4, para determinar la coherencia de los resultados obtenidos, se han calculado una serie de rendimientos del motor (Heywood, 1988), como son el rendimiento volumétrico (η_v), rendimiento efectivo (η_e), rendimiento indicado (η_i) y rendimiento mecánico (η_m) para cada uno de los regímenes estudiados y considerando tanto aire seco como aire húmedo (marcado con asterisco). Para dichos cálculos se ha considerado un dorado relativo promedio $F_r = 0.667$ (dosado pobre $F_r < 1$). Puede verse que los rendimientos calculados tienen todos ellos valores dentro de los rangos esperados, así como tendencias correctas al variar el régimen de giro.

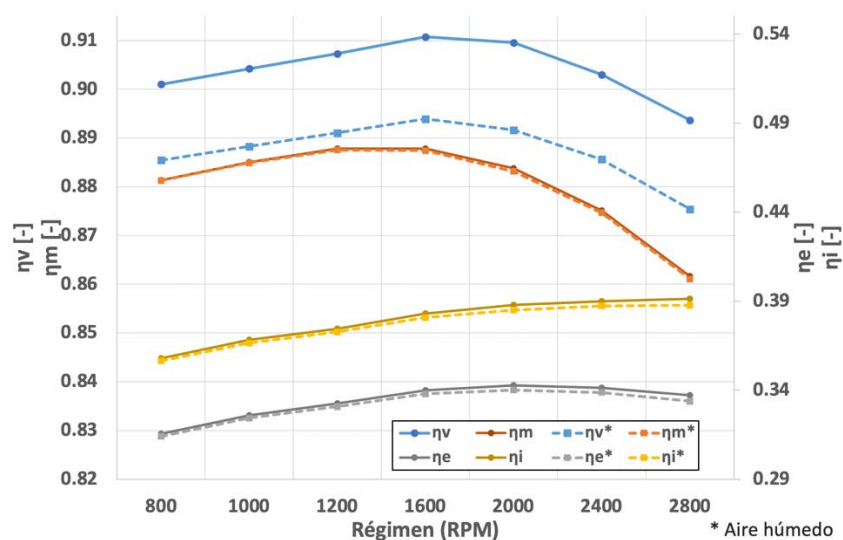


Fig. 3-4 Curvas de rendimientos del motor ADE 360N Series estimadas para el modelo en AVL BOOST™, para ambientes de aire seco y aire húmedo (indicado en *)

3.4. Estimación de valores de entrada al modelo AVL BOOST™ para distintas altitudes

Siguiente a la validación del modelo de simulación, con respecto a resultados bajo condiciones experimentales propuestos por parte del fabricante, es necesario establecer una metodología teórica de obtención de datos de entrada específicos para las condiciones de cada una de las ciudades a ser estudiadas. Las previsiones necesarias para poder concretar cada uno de estos casos se basan en la estimación teórica de la presión media

efectiva pme , el rendimiento volumétrico η_v , el dosado absoluto F , el gasto de aire \dot{m}_a y el gasto de combustible \dot{m}_f .

Tal como apunta (Lapuerta, Armas, Agudelo, & Sánchez, 2006), para poder establecer medios de comparación entre valores a altitud z , con respecto a sus valores de referencia, se requiere la aplicación de expresiones que relacionen la variable de prestaciones en unas condiciones de altitud con el correspondiente valor en condiciones de referencia. Así, la expresión para la potencia indicada, está detallada según Ec. (3-1).

$$\frac{N_{i_z}}{N_{i_{ref}}} = \left(\frac{P_z}{P_{ref}}\right)^a * \left(\frac{T_z}{T_{ref}}\right)^b \quad (3-1)$$

Adicionalmente, se considera que la misma dependencia funcional de la potencia indicada se puede aplicar también para la potencia efectiva. Esto es así basándose en dos premisas principales: primero, que 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 y, segundo, que la potencia de pérdidas mecánicas se reduce ligeramente con la altitud, debido a que las pérdidas asociadas a la presión en el cilindro tienen una disminución mucho menos significativa. Esta última razón justifica que muchos autores supongan a esta pérdida mecánica como un porcentaje constante de la variación de la potencia indicada, o que directamente la desprecien.

Con base en esta suposición de equivalencia, además especificando que la relación entre la potencia efectiva con la presión media efectiva, como una presión constante que durante la carrera de expansión produciría un trabajo igual al trabajo efectivo, entonces Ec. (3-1) quedaría, en términos de la presión media efectiva, expresada de la siguiente manera:

$$\frac{N_{i_z}}{N_{i_{ref}}} = \frac{N_{e_z}}{N_{e_{ref}}} = \frac{pme_z}{pme_{ref}} = \left(\frac{P_z}{P_{ref}}\right)^a * \left(\frac{T_z}{T_{ref}}\right)^b \quad (3-2)$$

En la literatura científica, la especificación de los valores de los exponentes a y b depende, en gran medida, de las características del motor y las condiciones de funcionamiento. Es así que, específicamente para motores como el ADE 360N Series, el exponente a suele ser igual $a = 1$ en motores diésel de aspiración natural (Lapuerta, Armas, Agudelo, & Sánchez, 2006); mientras que para el exponente b , según lo especifica

la norma ISO 3046-1, es recomendable asignarle el valor de $b = -0.75$ para el mismo tipo de motor. Otros autores recomiendan usar el valor $b = -0.5$, que es el utilizado en este trabajo.

En términos de una proyección de prestaciones limitadas por la capacidad que tiene el motor, en determinadas condiciones ambientales y constructivas, para la renovación de la masa de aire en el cilindro, se precisa realizar una estimación del rendimiento volumétrico η_v en cada una de las ciudades.

En función de las expresiones propuestas por (Heywood, 1988), el único efecto sobre el rendimiento volumétrico (asociado a la geometría y a las condiciones en el colector de admisión) que se considera es el de la temperatura ambiente, en forma de dependencia potencial con un exponente $c = 0,5$, tal como se expresa en la Ec. (3-3).

$$\eta_{v_z} = \eta_{v_{ref}} * \left(\frac{T_z}{T_{ref}} \right)^c \quad (3-3)$$

Una vez estimados los valores modificados de la presión media efectiva y el rendimiento volumétrico debido a la modificación de la presión y la temperatura ambiente por la altitud, se pasa a determinar los valores del gasto de aire y de combustible. El gasto de aire se determina a partir de la Ec. (3-4).

$$\dot{m}_{a_z} = i \cdot n \cdot \eta_{v_z} \cdot V_T \cdot \rho_z \quad (3-4)$$

Hay que indicar que la reducción de presión debido a la altitud se traslada al gasto de aire, principalmente por el cambio de densidad de éste, mientras que el rendimiento volumétrico es esencialmente constante (sólo varía ligeramente con la temperatura).

El dosado absoluto, como relación entre los gastos de combustible y de aire, se puede obtener de la Ec. (3-5).

$$F_z = \frac{p m e_z}{\rho_z \cdot \eta_{v_z} \cdot \eta_e \cdot H_C} \quad (3-5)$$

A partir de lo anterior es posible determinar el gasto de combustible en las condiciones correspondientes a cada altitud (Ec. (3-6)).

$$\dot{m}_{f_z} = \dot{m}_{a_z} \cdot F_z \quad (3-6)$$

Adicionalmente, como se detalla en el apartado siguiente, al variar la altitud hay que decidir si lo que se mantiene constante es el dosado F_z (con reducción de gasto de combustible) o bien la cantidad de combustible (con aumento de dosado, con ligera reducción asociada de la cantidad de aire). Esta segunda configuración mantendría la potencia efectiva del motor, a pesar de una ligera reducción asociada en el rendimiento efectivo.

3.5. Condiciones ambientales y datos de entrada al modelo AVL BOOST™ para distintas altitudes – aire seco.

Siguiente a la validación del modelo de simulación, en conjunto con la determinación teórica de valores de entrada complementarios para la simulación, se requiere especificar las condiciones específicas sobre las que se trabajará el estudio paramétrico de variación de la temperatura, la presión atmosférica y la humedad ambiental para cada una de las ciudades. A partir de estas condiciones, los datos de entrada para el modelo del motor pueden ser estimados, en orden para computar las prestaciones de cada ciudad (proveyendo los resultados para el análisis regional).

Con base a las formulaciones indicadas, según la estimación teórica previa de acuerdo con las expresiones Ec. (3-2), Ec. (3-5) y Ec. (3-6), se han obtenido los valores de entrada para la simulación, tomando en cuenta que este análisis se basa en condiciones de masa de combustible constante, con relación al régimen de giro (Tabla 3-6 y Tabla 3-7).

Tabla 3-6 Valores estimados de presión media efectiva BMEP y rendimiento volumétrico η_v .

Régimen [rpm]	Guayaquil		Tena		Santo Domingo		Santa Isabel		Baños de Agua Santa		Ambato	
	<i>pme</i> [bar]	η_v [-]	<i>pme</i> [bar]	η_v [-]	<i>pme</i> [bar]	η_v [-]	<i>pme</i> [bar]	η_v [-]	<i>pme</i> [bar]	η_v [-]	<i>pme</i> [bar]	η_v [-]
800	6.60	0.919	6.38	0.915	6.28	0.913	6.16	0.911	5.62	0.900	5.49	0.897
1000	6.94	0.922	6.70	0.918	6.60	0.916	6.48	0.914	5.91	0.903	5.77	0.900
1200	7.30	0.925	7.05	0.921	6.94	0.919	6.81	0.917	6.21	0.906	6.07	0.903
1600	7.61	0.929	7.35	0.925	7.24	0.923	7.11	0.920	6.48	0.909	6.34	0.907
2000	7.63	0.928	7.37	0.923	7.26	0.921	7.13	0.919	6.50	0.908	6.35	0.906
2400	7.30	0.921	7.05	0.917	6.95	0.915	6.82	0.913	6.22	0.902	6.08	0.899
2800	6.75	0.911	6.52	0.907	6.41	0.905	6.30	0.903	5.74	0.892	5.61	0.890

Tabla 3-7 Valores estimados de gasto de aire y gasto de combustible necesarios para el cálculo de dosado en cada ciudad.

Régimen [rpm]	Guayaquil		Tena		Santo Domingo		Santa Isabel		Baños Agua Santa		Ambato	
	<i>ma</i> [g/s]	<i>mf</i> [g/s]	<i>ma</i> [g/s]	<i>mf</i> [g/s]	<i>ma</i> [g/s]	<i>mf</i> [g/s]	<i>ma</i> [g/s]	<i>mf</i> [g/s]	<i>ma</i> [g/s]	<i>mf</i> [g/s]	<i>ma</i> [g/s]	<i>mf</i> [g/s]
800	42.79	1.93	41.23	1.87	40.55	40.55	39.77	1.80	36.03	1.65	35.17	1.61
1000	53.67	2.46	51.72	2.37	50.86	50.86	49.88	2.29	45.19	2.09	44.11	2.05
1200	64.63	3.04	62.27	2.94	61.24	61.24	60.06	2.84	54.42	2.59	53.12	2.53
1600	86.50	4.14	83.35	4.00	81.97	81.97	80.39	3.86	72.83	3.52	71.09	3.44
2000	107.9 8	5.14	104.0 5	4.97	102.3 3	102.3 3	100.3 6	4.80	90.92	4.38	88.75	4.28
2400	128.6 4	5.93	123.9 6	0.91 7	121.9 1	121.9 1	119.5 6	5.54	108.3 2	5.05	105.7 3	4.94
2800	148.5 3	6.47	143.1 2	0.90 7	140.7 5	140.7 5	138.0 5	6.04	125.0 7	5.51	122.0 7	5.38
<i>F_{avg}</i>	0.04616		0.04627		0.04632		0.04638		0.04668		0.04675	
<i>F_{ravg}</i>	0.6683		0.6729		0.6749		0.6773		0.6898		0.6928	

Llegado a este punto, tomando en cuenta las condiciones características de cada las ciudades del Ecuador seleccionadas, los cálculos de dependencia de la altitud con respecto a los resultados de la simulación de referencia iniciales del fabricante, con aplicación de procesos de combustión y ley de quemado en condiciones de cantidad de combustible constante (Constant Fuel Mass), se establece un segundo diagrama de proceso para obtención de resultados característicos de cada una de las ciudades, tal como se indica en Fig. 3-5.

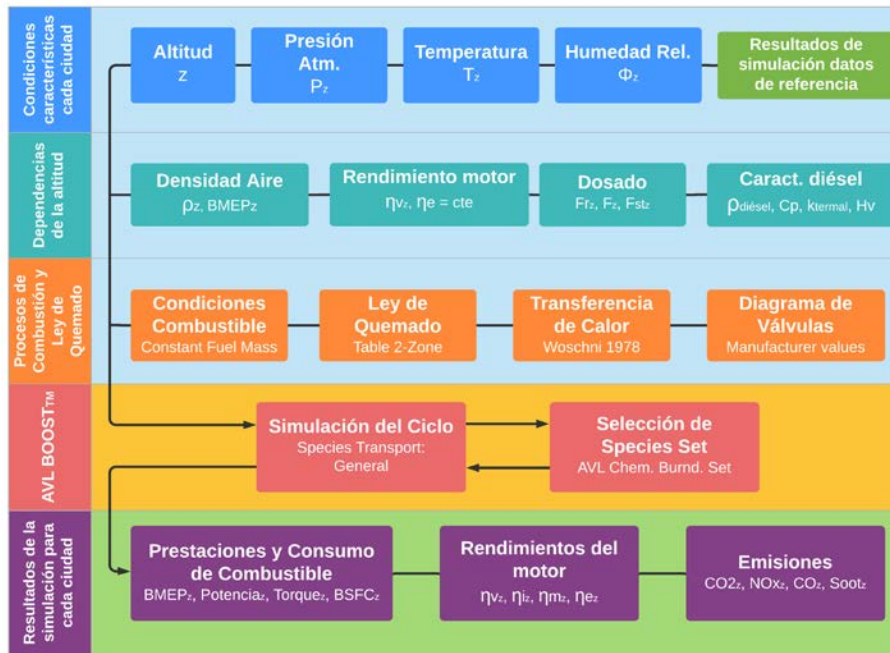


Fig. 3-5 Diagrama de procesos de simulación con AVL BOOST™ para las condiciones características de cada ciudad seleccionada

La razón principal del cálculo de estos gastos de aire y combustible (como estimaciones intermedias) es obtener los valores de dosado, utilizados como datos de entrada en las simulaciones AVL BOOST™. Además, el gasto de combustible se utilizará posteriormente en el estudio paramétrico bajo el supuesto de mantenerlo constante cuando cambien las condiciones ambientales. Como primera aproximación a la simulación del rendimiento del motor se han mantenido las curvas de doble Wiebe que establecen el ROHR para cada régimen del motor, aunque podría esperarse un cambio en la forma de estas curvas debido a cambios de segundo orden provocados por modificaciones en el tiempo de retardo de la combustión.

3.6. Condiciones ambientales y valores de entrada al modelo AVL BOOST™ para distintas altitudes – aire húmedo.

Para el estudio de influencia de la humedad relativa, tanto en las prestaciones del motor, el consumo, y las emisiones contaminantes, se escogieron por un lado únicamente dos de las seis ciudades analizadas en los apartados previos, Guayaquil ($1.0128 \text{ bar}_{\text{atm}}$) y Ambato ($0.8132 \text{ bar}_{\text{atm}}$), además se estudiaron los efectos de cuatro valores de humedad relativa (0% aire seco, 40%, 60% y 100% de humedad relativa), todos ellos aplicados en tres niveles de temperatura ambiente (0°C, 20°C y 40°C).

Como primer paso dentro de este estudio paramétrico complementario, se calculan los valores de todas las variables que participan en la determinación de influencia de la humedad ambiente (Tabla 3-8 y Tabla 3-9): la presión de saturación P_{sat} (Ec. (2-13)), la humedad absoluta ω (Ec. (2-14)) y la seudofracción molar del vapor de agua X_{H_2O} (Ec. (2-16)). A estos valores se calcula además la densidad del aire húmedo (Ec. (2-19)), obtenida mediante la aplicación del factor de corrección $K_{hum.}$ (Ec. (2-18)).

Tabla 3-8 Características perfil aire húmedo - variación de humedad relativa - Guayaquil.

Ciudad	T ($^{\circ}C$)	ϕ (%)	P_{sat} (bar)	ω (kg V./kg A. seco)	X_{H_2O} (g/mol)	K_{hum} (-)	$\rho_{a.hum}$ (kg/m ³)
Guayaquil (4 m.s.n.m., 1.0128 bar _{patm})	0	0	0.61	0.0000	0.000	1.0000	1.2857
		40	0.61	0.0015	0.002	0.9991	1.2845
		60	0.61	0.0023	0.004	0.9986	1.2840
		100	0.61	0.0038	0.006	0.9977	1.2828
	20	0	2.34	0.0000	0.000	1.0000	1.1980
		40	2.34	0.0058	0.009	0.9965	1.1938
		60	2.34	0.0088	0.014	0.9948	1.1917
		100	2.34	0.0148	0.024	0.9913	1.1876
	40	0	7.40	0.0000	0.000	1.0000	1.1215
		40	7.40	0.0188	0.030	0.9890	1.1092
		60	7.40	0.0286	0.046	0.9835	1.1030
		100	7.40	0.0492	0.079	0.9726	1.0907

Tabla 3-9 Características perfil aire húmedo - variación de humedad relativa - Ambato.

Ciudad	T ($^{\circ}C$)	ϕ (%)	P_{sat} (bar)	ω (kg V./kg A. seco)	X_{H_2O} (g/mol)	K_{hum} (-)	$\rho_{a.hum}$ (kg/m ³)
Ambato (2500 m.s.n.m. 0.8132 bar _{patm})	0	0	0.61	0.0000	0.000	1.0000	1.0319
		40	0.61	0.0019	0.003	0.9989	1.0308
		60	0.61	0.0028	0.005	0.9983	1.0302
		100	0.61	0.0047	0.008	0.9972	1.0290
	20	0	2.34	0.0000	0.000	1.0000	0.9615
		40	2.34	0.0073	0.012	0.9957	0.9573
		60	2.34	0.0110	0.018	0.9935	0.9553
		100	2.34	0.0185	0.030	0.9892	0.9511
	40	0	7.40	0.0000	0.000	1.0000	0.9001
		40	7.40	0.0236	0.038	0.9863	0.8878
		60	7.40	0.0361	0.058	0.9795	0.8817
		100	7.40	0.0625	0.100	0.9659	0.8694

Cabe apuntar que el modelo AVL BOOST™ inicial no puede ser aplicado directamente considerando aire húmedo debido a las limitaciones del software para la estimación de emisiones contaminantes en estas condiciones. De ahí la importancia de establecer una metodología alternativa de obtención de estimaciones, con aplicación de la densidad del aire húmedo, considerando únicamente la influencia de la humedad en este parámetro, sin considerar otros aspectos como la reducción de la temperatura en la cámara de combustión, cambios característicos en el comportamiento del frente de llama, entre otros.

Para la obtención de los valores de dosado $F_{a,hum}$, inicialmente se mantiene constante el valor calculado de rendimiento volumétrico, según Ec. (3-3), ya que la densidad $\rho_{a,hum}$ cambia por efecto de la aplicación del factor de corrección K_{hum} , para luego estimar el valor aproximado de presión media efectiva $BMEP$ en cada uno de los casos (Ec. (3-5)). Los valores de rendimiento volumétrico η_v y presión media efectiva $BMEP$ se registran en Tabla 3-10 y Tabla 3-11, para Guayaquil y Ambato respectivamente.

Tabla 3-10 Características teórica de BMEP - variación de humedad relativa - Guayaquil.

Régimen [rpm]	Guayaquil (4 m.s.n.m., 1.0128 bar _{atm})												
	T (°C)	0				20				40			
	ϕ (%)	0	40	60	100	0	40	60	100	0	40	60	100
	η_v [-]	pme [bar]	pme [bar]	pme [bar]	pme [bar]	pme [bar]	pme [bar]	pme [bar]	pme [bar]	pme [bar]	pme [bar]	pme [bar]	pme [bar]
800	0.909	7.15	7.14	7.13	7.12	6.75	6.72	6.69	6.65	6.39	6.29	6.22	6.10
1000	0.912	7.50	7.49	7.48	7.47	7.09	7.05	7.03	6.98	6.72	6.61	6.53	6.41
1200	0.915	7.88	7.87	7.86	7.85	7.45	7.41	7.38	7.34	7.06	6.94	6.86	6.72
1600	0.919	8.21	8.20	8.19	8.18	7.76	7.72	7.69	7.64	7.36	7.23	7.14	6.99
2000	0.917	8.20	8.19	8.18	8.17	7.76	7.72	7.69	7.64	7.37	7.24	7.15	7.00
2400	0.911	7.73	7.71	7.69	7.67	7.45	7.41	7.38	7.33	7.12	7.00	6.91	6.76
2800	0.901	7.25	7.24	7.23	7.22	6.88	6.84	6.81	6.77	6.59	6.46	6.38	6.22

Tabla 3-11 Características teórica de BMEP - variación de humedad relativa - Ambato.

Régimen [rpm]	Ambato (2500 m.s.n.m., 0.8132 bar _{atm})												
	T (°C)	0				20				40			
	ϕ (%)	0	40	60	100	0	40	60	100	0	40	60	100

	η_v [-]	p_{me} [bar]	p_{me} [bar]	p_{me} [bar]	p_{me} [bar]	p_{me} [bar]	p_{me} [bar]	p_{me} [bar]	p_{me} [bar]	p_{me} [bar]	p_{me} [bar]	p_{me} [bar]	p_{me} [bar]
800	0.909	5.43	5.42	5.42	5.41	5.13	5.10	5.08	5.04	4.87	4.75	4.70	4.58
1000	0.912	5.71	5.70	5.69	5.68	5.40	5.36	5.34	5.30	5.12	5.00	4.94	4.82
1200	0.915	6.01	5.99	5.99	5.98	5.68	5.64	5.62	5.57	5.39	5.26	5.19	5.06
1600	0.919	6.26	6.24	6.24	6.22	5.92	5.87	5.85	5.80	5.61	5.48	5.40	5.26
2000	0.917	6.24	6.23	6.22	6.21	5.91	5.86	5.84	5.79	5.61	5.47	5.40	5.25
2400	0.911	5.98	5.95	5.94	5.93	5.65	5.60	5.58	5.53	5.37	5.23	5.16	5.01
2800	0.901	5.46	5.45	5.44	5.43	5.18	5.14	5.12	5.07	4.94	4.82	4.74	4.60

Una vez obtenidos los valores de rendimiento volumétrico η_v , densidad del aire húmedo $\rho_{a.hum}$, rendimiento efectivo de referencia $\eta_{e.ref}$ y la estimación teórica de BMEP, se procede a establecer el dosado correspondiente a cada uno de los casos propuestos, con base a la aplicación de Ec. (3-6), considerando siempre condiciones de dosado por cantidad de combustible constante. Una vez que se fija la relación aire-combustible para cada punto de funcionamiento, se completan todos los datos de entrada para el modelo AVL BOOST™ y se ejecuta el código para generar los resultados de rendimiento y emisiones.

CAPÍTULO 4

Efecto de las variables ambientales sobre las prestaciones y emisiones del motor diésel ADE 360N

4.	Efecto de las variables ambientales sobre las prestaciones y emisiones del motor diésel ADE 360N.....	82
4.1.	Variación de la temperatura ambiente para cada altitud.....	83
4.1.1.	Efecto sobre BMEP.....	83
4.1.2.	Efecto sobre BSFC.....	85
4.1.3.	Efecto sobre la emisión de NOx.....	87
4.1.4.	Efecto sobre la emisión de CO.....	89
4.1.5.	Efecto sobre la emisión de Soot.....	91
4.2.	Variación de la presión atmosférica para cada altitud.....	94
4.2.1.	Efecto sobre BMEP.....	94
4.2.2.	Efecto sobre BSFC.....	96
4.2.3.	Efecto sobre la emisión de NOx.....	99
4.2.4.	Efecto sobre la emisión de CO.....	101
4.2.5.	Efecto sobre la emisión de Soot.....	104
4.3.	Variación de la humedad relativa para cada altitud.....	106
4.3.1.	Efecto sobre BMEP.....	107
4.3.2.	Efecto sobre BSFC.....	108

4.3.3. Efecto sobre la emisión de NOx.....	109
4.3.4. Efecto sobre la emisión de CO.....	111
4.3.5. Efecto sobre la emisión de Soot.....	112
4.4. Obtención de coeficientes de sensibilidad y de correlaciones estadísticas de influencia de la temperatura y presión atmosféricas.....	113
4.4.1. Coeficientes de sensibilidad de BMEP.....	114
4.4.2. Coeficientes de sensibilidad de BSFC.....	117
4.4.3. Coeficientes de sensibilidad de CO2.....	118
4.4.4. Coeficientes de sensibilidad para otras emisiones.....	119
4.4.5. Bondad de las correlaciones estadísticas.....	121

4. Efecto de las variables ambientales sobre las prestaciones y emisiones del motor diésel ADE 360N.

Una vez desarrollado y validado el modelo del motor ADE360N, y habiendo establecido que, las condiciones de cantidad de combustible constante son las adecuadas para la simulación de estudios de variación de las condiciones ambientales; es el momento adecuado para examinar, mediante estudios paramétricos, los efectos de forma individual del aumento, o disminución, tanto de la temperatura y la presión atmosférica, así como de la humedad ambiental.

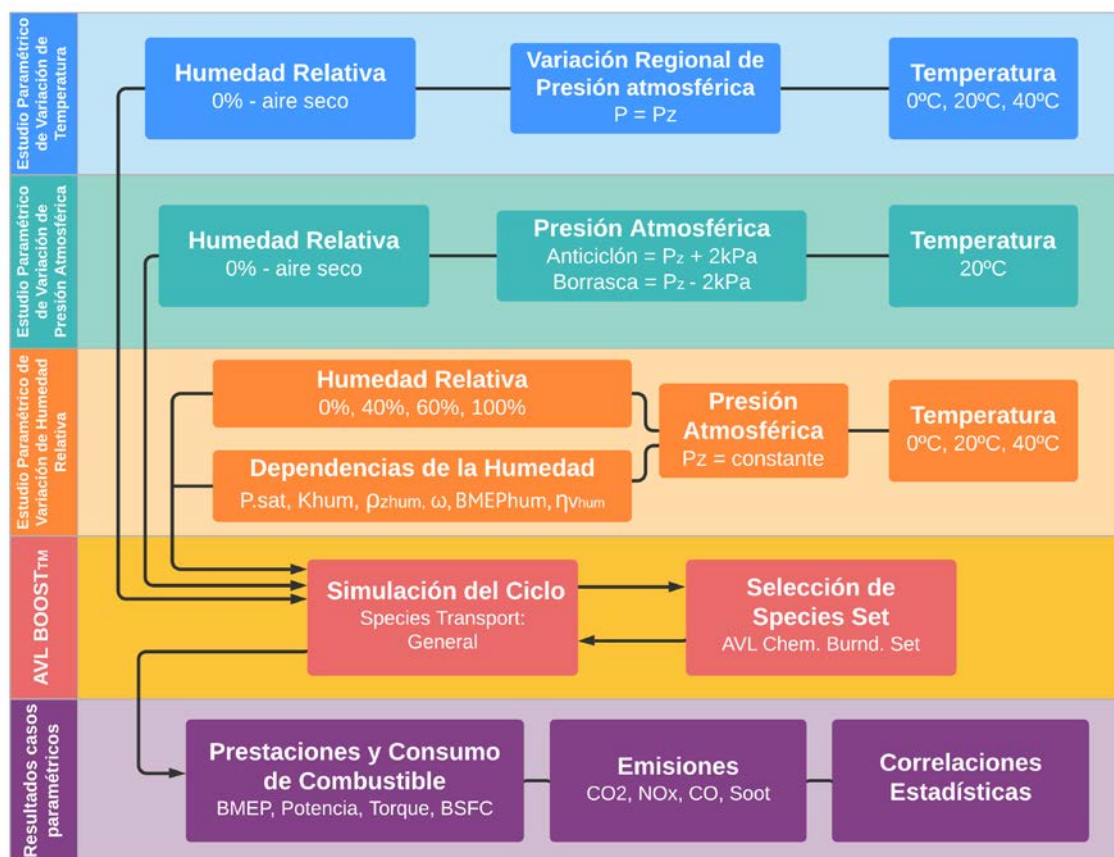


Fig. 4-1 Diagrama de procesos de simulación en AVL BOOST™ para el estudio paramétrico de cada variable ambiental por separado.

Como se puede observar en la Fig. 4-1, tanto en el estudio paramétrico de variación de temperatura como en la variación de presión atmosférica se consideran dos niveles de análisis. En primer lugar, se desarrolla un estudio de características regionales mediante el cual se estima el rendimiento del motor en condiciones de referencia para las condiciones atmosféricas de cada ciudad. En este intervalo considerado, la presión atmosférica desciende de 1012,8 hPa (Guayaquil) a 813,2 hPa (Ambato), mientras que la

temperatura media desciende de 26,5°C a 12,5°C respectivamente. Posteriormente, sobre estos valores de referencia, se establece un segundo nivel del estudio paramétrico, a nivel local, dentro del cual se modifican las condiciones de presión considerando situaciones de anticiclón (aumento local de presión) y borrasca (reducción local de presión), independientemente de la variación de temperatura (en intervalos de 20k de 0° a 40°C), así como la humedad relativa (en intervalos específicos de 0% - aire seco -, 40%, 60% y 100%).

4.1. Variación de la temperatura ambiente para cada altitud.

En este primer apartado del estudio paramétrico de influencia, en el caso de la temperatura, se marca un rango de variación predeterminado, siendo 0°C su valor mínimo y 40°C su máximo registrado en el Anuario Meteorológico del Ecuador, con registros intermedios cada 5°C, para tres regímenes de giro específicos: 1200 rpm (régimen bajo), 1600 rpm (régimen medio) y 2400 rpm (régimen alto).

Si bien es cierto que es un rango que puede ser considerado aceptable, cabe recalcar que, en muchos de los lugares del Ecuador con mayor altitud, en sus registros históricos, en raras ocasiones se alcanzan temperaturas elevadas (>30°C); mientras que, en aquellos más cercanos al nivel del mar, casi nunca experimentan bajas temperaturas (<10°C). Por ello, los casos simulados cubren valores extremos, cuya observación experimental tendría una mayor complejidad.

4.1.1. Efecto sobre BMEP

Iniciando el análisis desde el campo de afección en las prestaciones, la BMEP obtenida para un dosado equivalente para cada una de las ciudades, siempre tomando en cuenta una cantidad de combustible constante, verifica una disminución general con respecto al aumento de la temperatura de forma local, siendo levemente mayor en ciudades con mayor altitud.

Es muy importante indicar que estas tendencias se pueden unificar para todas las condiciones computadas (presión, rpm) como una única reducción relativa en base porcentual como se muestra en la Fig. 4-2, con un factor de sensibilidad de BMEP con temperatura de -0,17%/°C (o estrictamente hablando %/K).

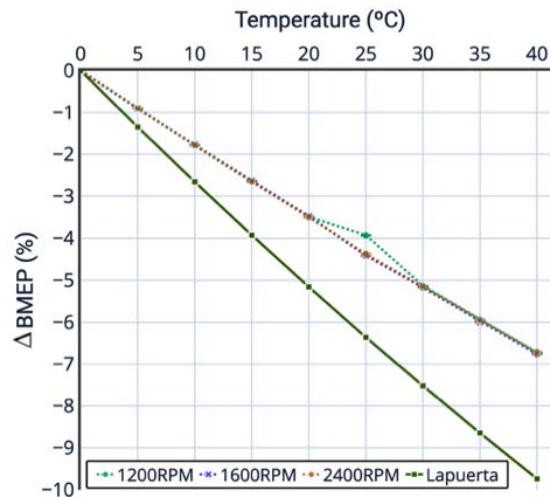


Fig. 4-2 Dependencia relativa de la BMEP con respecto a la temperatura para tres regímenes de giro (1200, 1600 y 2400 rpm)

La diferencia porcentual de prestaciones entre todas las ciudades no supera un 0.002%/°C entre regímenes de giro, indicativo de una mínima influencia de los factores ambientales en las prestaciones del motor Diésel, en condiciones de cantidad de combustible constante, como se puede verificar en Fig. 4-2.

Si suponemos un incremento entre los valores mínimos y máximos de temperatura (0°C – 40°C), la diferencia promedio de los valores de régimen de giro (1200 rpm, 1600 rpm y 2400 rpm) (Fig. 4-3) entre Guayaquil (1.0128 bar_{Patm}) y Ambato (0.8132 bar_{Patm}) no supera el -0.2%/°C (Tabla 4-1).

Tabla 4-1 Sensibilidad promedio de BMEP con la temperatura ambiente para tres presiones ambiente características cuando ésta varía de forma regional debido a la altitud

Temperatura (°C)	<i>BMEP_{avg}</i> (bar)- Cantidad de Combustible Constante		
	Guayaquil (1.0128 bar_{Patm})	Santa Isabel (0.9332 bar_{Patm})	Ambato (0.8132 bar_{Patm})
0	7.46	6.88	6.00
10	7.33	6.76	5.89
20	7.20	6.64	5.79
30	7.08	6.53	5.69
40	6.96	6.42	5.59
ΔBMEP/ΔT			
<i>bar</i> /°C	-0.013	-0.012	-0.010
(%/°C)	(-0.168)	(-0.167)	(-0.171)

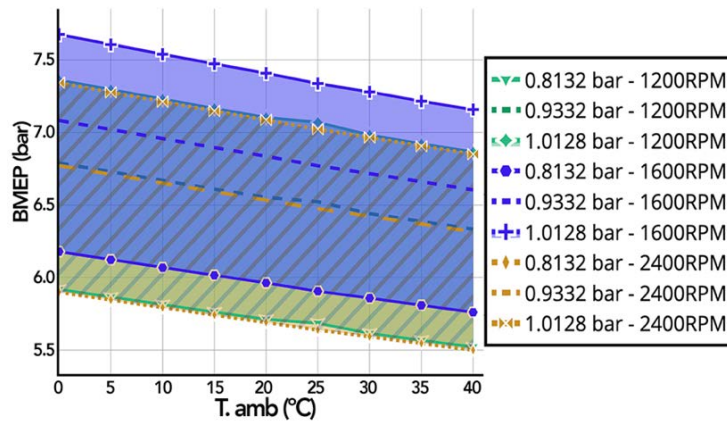


Fig. 4-3 Efecto de la Temperatura sobre valores absolutos de la BMEP para tres presiones ambiente características a tres regímenes de giro.

4.1.2. Efecto sobre BSFC

En contraposición a la disminución de BMEP (bar) con respecto al incremento de la temperatura, el coeficiente de sensibilidad estimado para el consumo específico de combustible BSFC percibe un incremento porcentual a nivel local de mínima variación (alrededor de +0.09%/°C), con ligeras diferencias entre bajos regímenes de giro (mayor coeficiente) y altos regímenes (pequeños coeficientes). Adicionalmente, el efecto es ligeramente más importante a elevadas altitudes con respecto a aquellas a nivel del mar.

Es así que, tal como se señala en (Fig. 4-4 - recuadro A) y (Fig. 4-4 - recuadro B), el incremento promedio obtenido a régimen de funcionamiento medio (1600 rpm) a temperaturas bajas medias (ΔTemp : 5°C a 15°C) y temperaturas altas (ΔTemp : 30°C a 40°C), respectivamente, es:

Tabla 4-2 Sensibilidad de la BSFC en dos rangos de temperatura (baja - media, alta) para tres presiones ambiente características cuando ésta varía de forma regional debido a la altitud

ΔBSFC (g/kWh) - Cantidad de Combustible Constante - Régimen = 1600 rpm					
Presión Atmosférica	Baja - Media Temperatura		Alta Temperatura		$\Delta\text{BSFC}_{\text{avg}}$ (%/°C)
	5°C	15°C	30°C	40°C	
Guayaquil (1.0128 bar _{atm})	244.83	246.95	250.16	252.25	0.085
Santa Isabel (0.9332 bar _{atm})	247.55	249.72	253.02	255.18	0.087
Ambato (0.8132 bar _{atm})	252.55	254.82	258.31	260.53	0.088

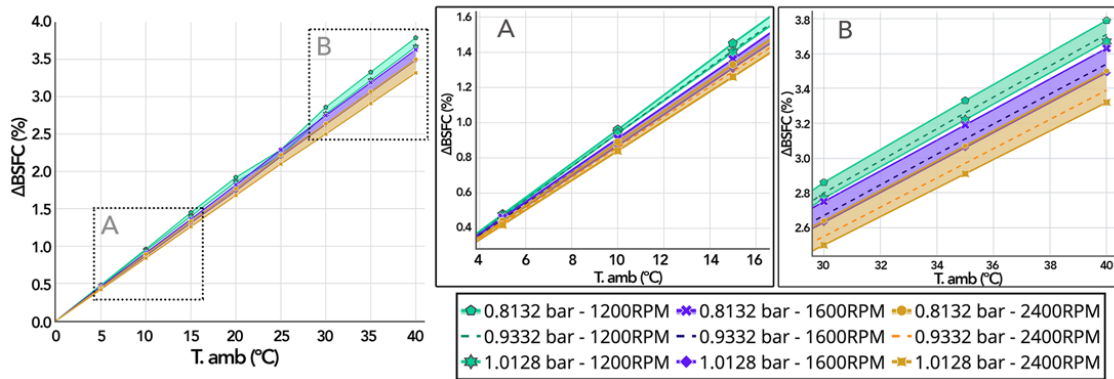


Fig. 4-4 Dependencia relativa de BSFC con respecto a la temperatura para tres presiones ambiente características a tres regímenes de giro (1200RPM, 1600RPM y 2400RPM)

Si lo observamos desde una perspectiva más amplia, considerando un rango de temperatura total (0°C – 40°C), se presenta un porcentaje de BSFC más definido para cada altitud estudiada, con tendencias de crecimiento lineal entre todas las ciudades e incrementos acumulados entre 3.49% y 3.64% en el intervalo seleccionado (Tabla 4-3).

Tabla 4-3 Sensibilidad promedio de BSFC con la temperatura ambiente para tres presiones ambiente características cuando ésta varía de forma regional debido a la altitud

<i>BSFC_{avg} (g/kWh)</i> - Cantidad de Combustible Constante			
Temperatura [°C]	Guayaquil (1.0128 bar _{patm})	Santa Isabel (0.9332 bar _{patm})	Ambato (0.8132 bar _{patm})
0	245.40	248.21	253.39
10	247.58	250.44	255.73
20	249.72	252.64	258.04
30	251.87	254.85	260.36
40	253.98	257.02	262.63
$\Delta BSFC/\Delta T$ <i>g/kWh.°C</i> (%/°C)	+0.21 (+0.087%)	+0.22 (+0.089%)	+0.23 (+0.091%)

La tendencia de crecimiento con respecto a la variación de la temperatura es lineal entre todas las ciudades, siendo de mayor tasa de consumo de combustible el funcionamiento del motor en régimen bajo (1200 rpm), siendo el consumo en régimen medio (1600 rpm) y régimen alto (2400 rpm) semejantes entre sí (Fig. 4-5).

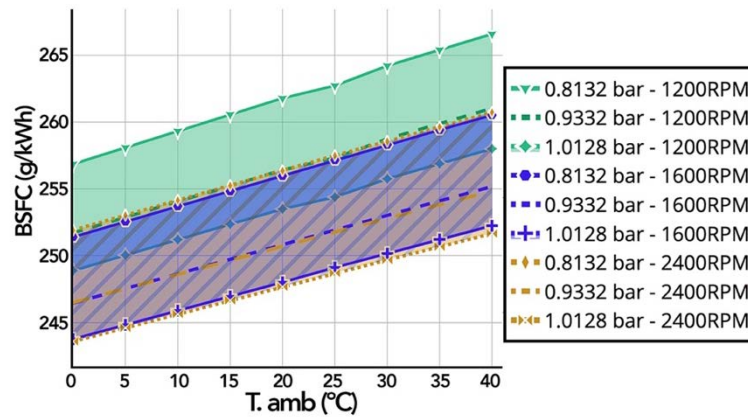


Fig. 4-5 Efecto de la Temperatura sobre valores absolutos de BSFC para tres presiones ambiente características en tres regímenes de giro (1200RPM, 1600RPM y 2400RPM)

4.1.3. Efecto sobre la emisión de NOx

El grado de emisión de NOx, con respecto a la variación de la temperatura, se ve marcada por el régimen de giro de funcionamiento del motor, con coeficientes de sensibilidad de 0.86%/°C a alto régimen de giro (2400 rpm) (Fig. 4-6 – recuadro D), a diferencia de los 0.54%/°C a régimen medio (1600 rpm) y 0.47%/°C a régimen bajo (1200 rpm) (Fig. 4-6 – recuadro E).

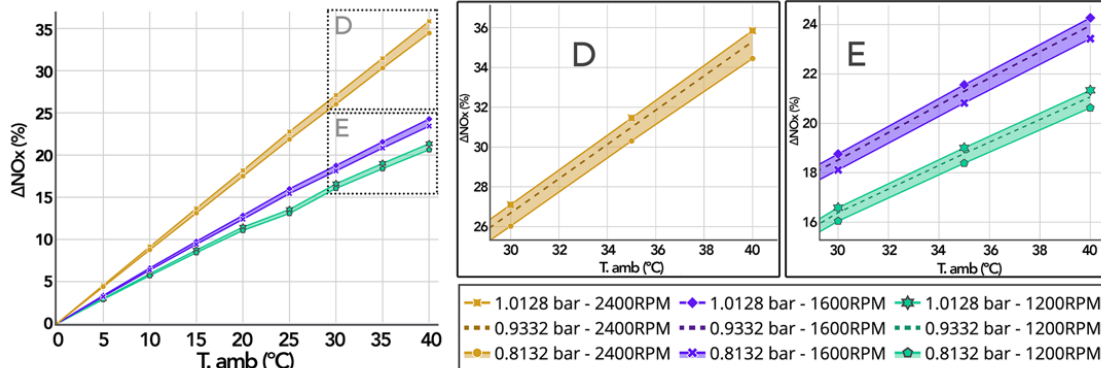


Fig. 4-6 Dependencia relativa de la emisión de NOx con respecto a la temperatura para tres presiones ambiente características a tres regímenes de giro (1200RPM, 1600RPM y 2400RPM)

Especificando la emisión de NOx para tres de las ciudades analizadas, de acuerdo a la variación del parámetro de temperatura ambiente, promediando los valores obtenidos a los tres regímenes de giro (1200 rpm, 1600 rpm y 2400 rpm), el incremento a temperaturas bajas medias (ΔTemp : 10°C a 20°C) y a temperaturas altas (ΔTemp : 30°C a 40°C), con respecto a un kilogramo de combustible diésel consumido en el proceso de combustión, quedaría expresado según los valores de Tabla 4-4.

Tabla 4-4 Sensibilidad de NOx en dos rangos de temperatura (baja - media, alta) para tres presiones ambiente características cuando ésta varía de forma regional debido a la altitud

$\Delta NOx (g_{NOx}/kg_{Diesel})$ - Cantidad de Combustible Constante					
Presión Atmosférica	Baja - Media Temperatura		Alta Temperatura		ΔNOx_{avg} (%/°C)
	10°C	20°C	30°C	40°C	
Guayaquil (1.0128 bar _{atm})	36.23	38.19	40.03	41.74	+0.484
Santa Isabel (0.9332 bar _{atm})	35.32	37.21	38.97	40.60	+0.477
Ambato (0.8132 bar _{atm})	33.74	35.50	37.12	38.63	+0.465

Generalizando las tasas de emisión absolutas, considerando el rango de temperatura total (0°C – 40°C) (Fig. 4-7), tal como se realizó anteriormente para el grado de reducción de las prestaciones y el incremento en el consumo de combustible, se presenta un porcentaje de emisión de NOx acumulado según la Tabla 4-5.

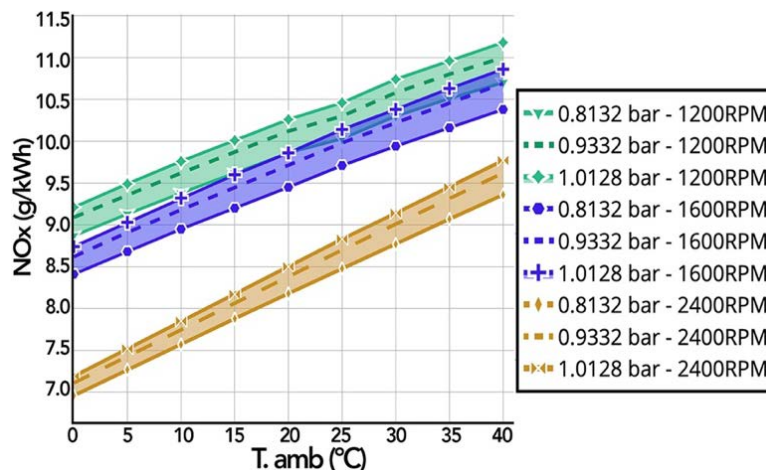


Fig. 4-7 Efecto de la Temperatura sobre valores absolutos de NOx para tres presiones ambiente características en tres regímenes de giro (1200RPM, 1600RPM y 2400RPM)

Tabla 4-5 Sensibilidad de la emisión de NOx con la temperatura ambiente para tres presiones ambiente características cuando ésta varía de forma regional debido a la altitud

$NOx_{avg} (g/kWh)$ - Cantidad de Combustible Constante			
Temperatura [°C]	Guayaquil (1.0128 bar _{atm})	Santa Isabel (0.9332 bar _{atm})	Ambato (0.8132 bar _{atm})
0	8.38	8.27	8.08
10	8.97	8.85	8.63
20	9.54	9.40	9.16

30	10.09	9.94	9.67
40	10.60	10.44	10.15
$\Delta\text{NO}_x/\Delta T$ <i>g/kWh. °C</i> (%/°C)	+0.056 (+0.66%)	+0.054 (+0.65%)	+0.051 (+0.64%)

4.1.4. Efecto sobre la emisión de CO

En el marco de estimación sobre la tasa de emisión de CO con respecto a la variación de la temperatura, la tendencia porcentual presenta varios grados de fluctuación, especialmente a regímenes de giro bajos (1200 rpm) donde el crecimiento porcentual entre 15°C – 30°C no mantiene una regularidad con respecto a la variación a temperaturas bajas (5°C – 15°C) (Fig. 4-8 – recuadro E) y temperaturas altas (30°C – 40°C) (Fig. 4-8 – recuadro F). Estas diferencias se pueden ver con más detalle en la Fig. 4-8, donde se grafica el coeficiente de sensibilidad para cada condición.

Los valores de los mencionados coeficientes oscilan entre 0.20%/°C (2400 rpm) y 0.35%/°C (1200 rpm). Además, cuanto mayor sea la altitud (menor presión), mayor será el coeficiente de sensibilidad.

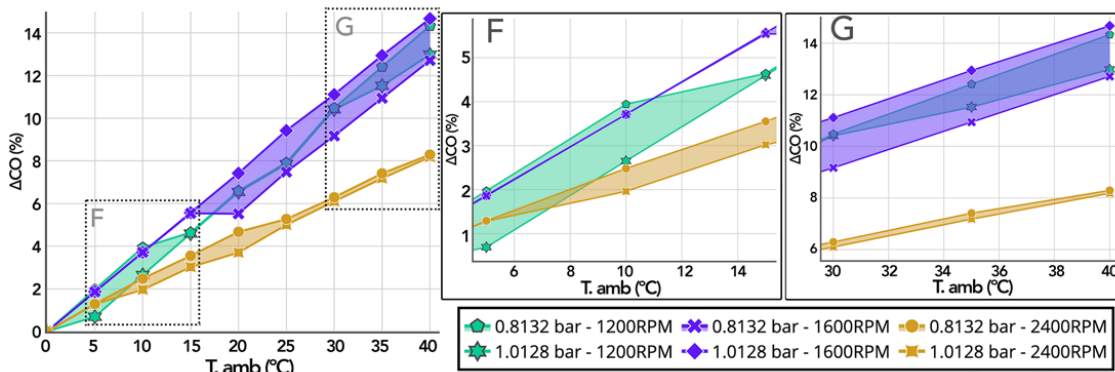


Fig. 4-8 Dependencia relativa de las emisiones de CO con respecto a la temperatura para tres presiones ambiente características a tres regímenes de giro (1200RPM, 1600RPM y 2400RPM).

Aun cuando la fluctuación de resultados para la emisión de CO es clara, la tasa de formación con respecto al combustible diésel consumido en cada uno de los casos establece un incremento en todos los puntos de funcionamiento, inicialmente mayor en rangos de temperatura bajos (ΔT Temp: 5°C – 15°C) y ligeramente menor en rangos de temperatura elevados (ΔT Temp: 30°C – 40°C) (Tabla 4-6).

Tabla 4-6 Sensibilidad de CO en dos rangos de temperatura (baja - media, alta) para tres presiones ambiente características cuando ésta varía de forma regional debido a la altitud

$\Delta CO (g_{CO}/kg_{Diesel}) - \text{Cantidad de Combustible Constante}$					
Presión Atmosférica [bar _{atm}]	Baja - Media Temperatura		Alta Temperatura		ΔCO_{avg} (%/°C)
	10°C	20°C	30°C	40°C	
Guayaquil (1.0128 bar _{atm})	91.34	93.17	96.01	97.55	+0.180
Santa Isabel (0.9332 bar _{atm})	90.80	92.49	95.15	96.22	+0.149
Ambato (0.8132 bar _{atm})	89.97	91.51	93.64	95.38	+0.179

Como se mencionó anteriormente, por un lado es importante apuntar la diferencia de tendencia de valores porcentuales en el grado de emisión de CO donde, por ejemplo, en el rango de temperatura elevado (30°C – 40°C), en Guayaquil (1.0128 bar_{atm}) se obtiene un +0.16%/°C de variación y en Ambato (0.8132 bar_{atm}) una mayor variación con un +0.19%/°C, mientras que en temperaturas bajas, el efecto es contrario, siendo en el primer caso de Guayaquil mayor con +0.20%/°C, y en Ambato +0.17%/°C.

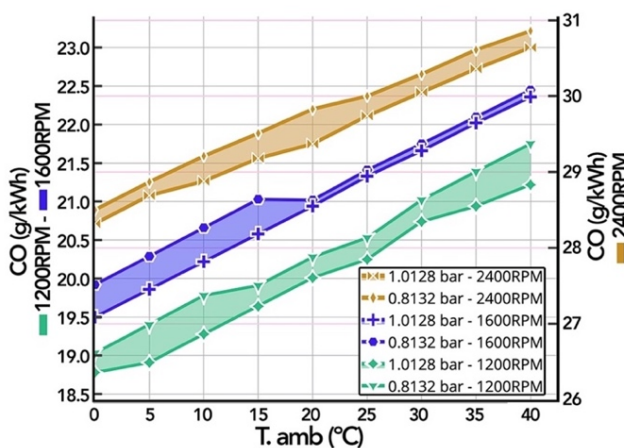


Fig. 4-9 Efecto de la Temperatura sobre valores absolutos de CO para tres presiones ambiente características en tres regímenes de giro (1200RPM, 1600RPM y 2400RPM)

En el amplio rango de temperatura (0°C – 40°C), el seguimiento progresivo de los datos es mucho más claro, con líneas de tendencia aproximadas entre las ciudades próximas al nivel del mar, y aquellas con mucha mayor altitud, aun cuando la fluctuación en la simulación sigue siendo visible en los resultados. De esta forma, las tasas de emisión de CO acumuladas (Fig. 4-9) establecerían un incremento en cada una de las ciudades según los siguientes datos:

Tabla 4-7 Sensibilidad de la emisión de CO con la temperatura ambiente para tres presiones ambiente características cuando ésta varía de forma regional debido a la altitud

Temperatura [°C]	<i>CO_{avg} (g/kWh)- Cantidad de Combustible Constante</i>		
	Guayaquil (1.0128 <i>bar_{patm}</i>)	Santa Isabel (0.9332 <i>bar_{patm}</i>)	Ambato (0.8132 <i>bar_{patm}</i>)
0	22.20	22.28	22.48
10	22.79	22.91	23.22
20	23.44	23.62	23.71
30	24.15	24.22	24.35
40	24.74	24.70	25.02
$\Delta CO/\Delta T$ <i>g/kWh.°C</i> (%/°C)	+0.064 (+0.29%)	+0.060 (+0.27%)	+0.063 (+0.28%)

La variabilidad de las estimaciones, dentro del análisis por plano de afección a diferentes grados de temperatura, para distintos niveles de presión atmosférica (Fig. 4-9), es identificable en relación a tasas elevadas de emisión de CO a altos regímenes de giro (2400 rpm), en comparación a los niveles estimados para bajos y medios regímenes (1200 rpm – 1600 rpm). Tal es el caso que, por ejemplo, a 2400 rpm, 20°C, la emisión de CO cambia de 29.37 g/kWh en Guayaquil (1.0128 *bar_{patm}*), a 29.83 g/kWh en Ambato (0.8132 *bar_{patm}*).

4.1.5. Efecto sobre la emisión de Soot

Sobre la estimación para la generación de partículas (Soot), a través del modelo desarrollado, si bien es cierto la variación de la temperatura representa un incremento proporcionalmente notable, la comparativa de generación entre ciudades en el mayor de los casos (temperaturas superiores a 30°C) no supera el 2%.

Con base a este primer aproximamiento general, la tasa de emisión de partículas Soot mantiene una mínima diferencia a regímenes de funcionamiento del motor bajos (1200 rpm) y medios (1600 rpm), con rangos del coeficiente de sensibilidad de entre 1.51%/°C (T5: 10°C – 20°C) (Fig. 4-10 – recuadro G) y 1.74%/°C (Δ Temp: 30°C – 40°C) (Fig. 4-10 – recuadro H) respectivamente; mientras que, a regímenes de funcionamiento superiores (2400 rpm) los coeficientes de sensibilidad son de 1.56%/°C (Δ Temp: 10°C – 20°C) (Fig. 4-10 – recuadro G) y 1.81%/°C (Fig. 4-10 – recuadro H).

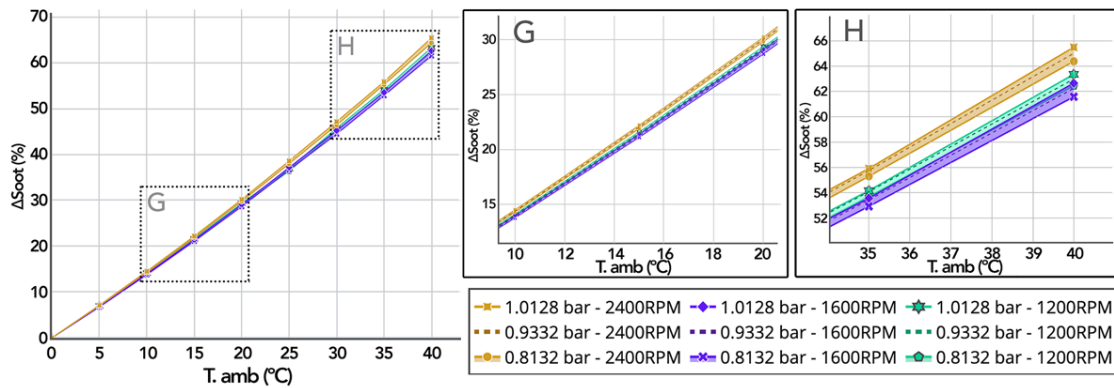


Fig. 4-10 Dependencia relativa de Soot con respecto a la temperatura para tres presiones ambiente características a tres regímenes de giro (1200RPM, 1600RPM y 2400RPM).

Como se puede observar en Fig. 4-10, la tendencia de las estimaciones tiene un comportamiento de curva, aumentando en mayor su tasa de generación a medida que la temperatura ambiente alcanza valores superiores. La diferencia porcentual entre ciudades, con respecto al incremento porcentual por la variación del parámetro de temperatura, indica una pequeña participación de la presión atmosférica en este caso, efecto que se comprobará posteriormente. Con base en estas premisas, la estimación de emisión de partículas Soot en valores absolutos es:

Tabla 4-8 Sensibilidad de la emisión de Soot con la temperatura ambiente para tres presiones ambiente características cuando ésta varía de forma regional debido a la altitud

Temperatura [°C]	<i>Soot_{avg}</i> (g/kWh)- Cantidad de Combustible Constante		
	Guayaquil (1.0128 bar _{patm})	Santa Isabel (0.9332 bar _{patm})	Ambato (0.8132 bar _{patm})
0	0.53	0.55	0.59
10	0.60	0.63	0.67
20	0.68	0.71	0.76
30	0.77	0.80	0.86
40	0.87	0.90	0.96
$\Delta Soot/\Delta T$ g/kWh.°C (%/°C)	$+8.5 \cdot 10^{-3}$ (+1.60%)	$+8.8 \cdot 10^{-3}$ (+1.59%)	$+9.3 \cdot 10^{-3}$ (+1.57%)

Para el correspondiente análisis por plano de afección por grados de temperatura, a diferentes niveles de presión atmosférica (Fig. 4-11), el valor estimado de emisión de partículas es menor a regímenes de funcionamiento bajo (1200 rpm), mientras que a medios (1600 rpm) y altos regímenes (2400 rpm) la diferencia entre ambos es mínima,

siendo ligeramente mayor a regímenes medios. Para ejemplificar esta diferencia, la emisión de partículas Soot a 20°C, 1600 rpm, pasa de 0.74 g/kWh en Guayaquil (1.0128 bar_{patm}) a 0.82 g/kWh en Ambato (0.8132 bar_{patm}), mientras que, a la misma temperatura, 2400 rpm, varía de 0.72 g/kWh en Guayaquil (1.0128 bar_{patm}) a 0.81 g/kWh en Ambato (0.8132 bar_{patm}).

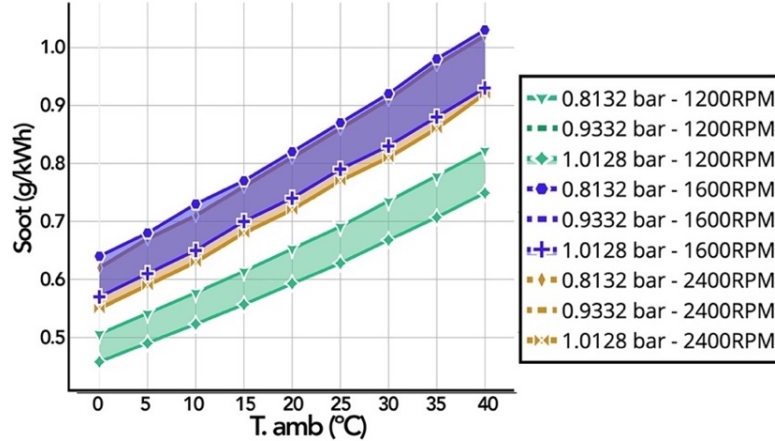


Fig. 4-11 Efecto de la Temperatura sobre valores absolutos de Soot para tres presiones ambiente características en tres regímenes de giro (1200RPM, 1600RPM y 2400RPM)

Si comparamos este aumento porcentual de emisión, con respecto al consumo de combustible diésel (Tabla 4-9), se mantiene la tendencia de aumento de emisión, siendo mayor su diferencia en niveles de temperatura bajos – medios ($\Delta Temp$: 10°C – 20°C), con $\Delta Soot_{m\acute{a}x} = +12.35\%$, y a temperaturas altas ($\Delta Temp$: 30°C – 40°C), con $\Delta Soot_{m\acute{a}x} = +11.11\%$.

Tabla 4-9 Sensibilidad de Soot en dos rangos de temperatura (baja - media, alta) para tres presiones ambiente características cuando ésta varía de forma regional debido a la altitud

Presión Atmosférica [bar_{patm}]	$\Delta Soot (g_{Soot}/kg_{Diesel})$ – Cantidad de Combustible Constante				$\Delta Soot_{avg}$ (%/°C)
	Baja – Media Temperatura		Alta Temperatura		
	10°C	20°C	30°C	40°C	
Guayaquil (1.0128 bar_{patm})	2.44	2.74	3.07	3.41	+1.169
Santa Isabel (0.9332 bar_{patm})	2.51	2.82	3.15	3.50	+1.173
Ambato (0.8132 bar_{patm})	2.63	2.95	3.29	3.65	+1.156

4.2. Variación de la presión atmosférica para cada altitud

En el caso de variación de la presión ambiental, es fundamental, al igual que con la temperatura, su análisis de influencia tanto a nivel local como a nivel regional entre cada una de las ciudades, tal como se especifica al inicio de este capítulo. De acuerdo con esto, en una primera aproximación a nivel regional, se estiman los valores de presión atmosférica de cada una de las ciudades seleccionadas para tres valores de temperatura determinados (0°C, 20°C y 40°C), a diferentes revoluciones del motor (1200 rpm, 1600 rpm y 2400 rpm). Posteriormente, a nivel local, se consideró un valor único de temperatura ambiente ($T_{avg} = 20^\circ\text{C}$), mientras que se introduce un aumento o disminución de ± 2 kPa en la presión ambiental promedio de cada ciudad, para representar el aumento y disminución de la presión asociada con un anticiclón y una borrasca respectivamente.

4.2.1. Efecto sobre BMEP

Desde un plano comparativo entre ciudades, la disminución de las prestaciones es clara, presenciándose coeficientes de sensibilidad entre la ciudad de Guayaquil ($1.0128 \text{ bar}_{Patm}$) y Ambato ($0.8132 \text{ bar}_{Patm}$) de: 0.073 bar/kPa a regímenes bajos (1200 rpm), 0.071 bar/kPa a regímenes medios (1600 rpm) y 0.068 bar/kPa a regímenes altos (2400 rpm), igualmente con una clara tendencia de disminución lineal (Fig. 4-12). Todos los valores de BMEP entre ambas ciudades, para cada una de las temperaturas (0°C, 20°, 40°C), y cada uno de los regímenes de giro, se presentan a continuación:

Tabla 4-10 Sensibilidad de BMEP en tres rangos de temperatura para dos presiones ambiente características cuando ésta varía de forma regional debido a la altitud

$BMEP_{avg}$ (bar)– Cantidad de Combustible Constante									
Presión Atmosférica [bar_{Patm}]	Baja Temperatura (0°C)			Media Temperatura (20°C)			Alta Temperatura (40°C)		
	1200 rpm	1600 rpm	2400 rpm	1200 rpm	1600 rpm	2400 rpm	1200 rpm	1600 rpm	2400 rpm
Guayaquil ($1.0128 \text{ bar}_{Patm}$)	7.36	7.68	7.34	7.10	7.41	7.09	6.87	7.16	6.85
Ambato ($0.8132 \text{ bar}_{Patm}$)	5.92	6.18	5.90	5.71	5.96	5.69	5.52	5.76	5.50
$\Delta BMEP / \Delta Patm$ (bar / kPa)	0.072	0.075	0.072	0.070	0.073	0.070	0.067	0.070	0.068
$\Delta BMEP_{avg} / \Delta Patm$ (bar / kPa)	0.073			0.071			0.068		

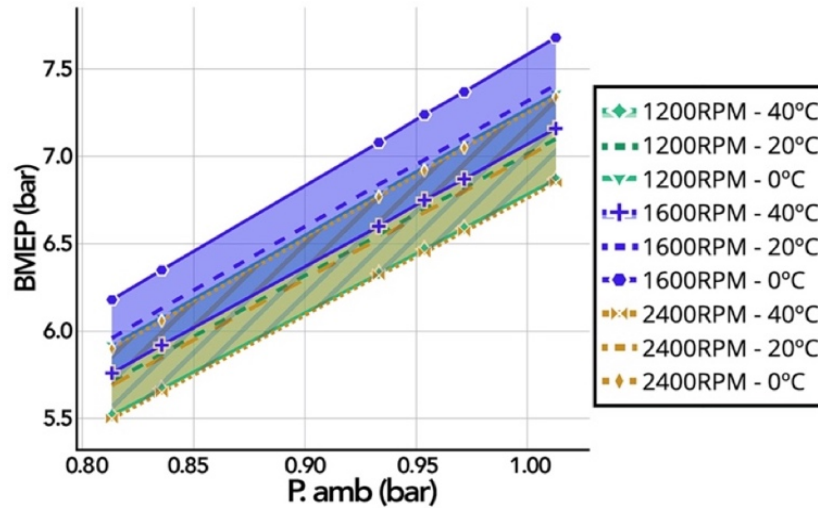


Fig. 4-12 Efecto de la variación regional de la presión atmosférica sobre la BMEP a 0°C, 20°C y 40°C

Visualizando la influencia de la variación de la presión atmosférica a nivel local, a una temperatura de $T_{avg} = 20^\circ\text{C}$, se evidencia una ligera diferencia con la presencia de anticiclón (+2 kPa_{patm}) y borrasca (-2 kPa_{patm}) sobre el valor de BMEP promedio obtenido (Fig. 4-13), con diferencias porcentuales de $\pm 1.13\%/kPa$ para la ciudad de Guayaquil (1.0128 bar_{patm}), $\pm 1.24\%/kPa$ para Santa Isabel (0.9332 bar_{patm}) y $\pm 1.45\%/kPa$ para Ambato (0.8132 bar_{patm}), cuyos valores promedio se presentan en Tabla 4-11:

Tabla 4-11 Sensibilidad local de la BMEP en presencia de anticiclón y borrasca ($\pm 2 kPa_{patm}$) para tres presiones ambiente características a 20°C.

BMEP (bar) - Cantidad de Combustible Constante					
Presión Atmosférica	Régimen 1200 rpm	Régimen 1600 rpm	Régimen 2400 rpm	$BMEP_{avg}$	$\Delta BMEP$ (%/kPa)
Guayaquil (1.0128 bar_{patm})	6.94	7.24	6.92	7.04	-1.13
	7.10	7.41	7.09	7.20	-
	7.26	7.58	7.25	7.36	+1.13
Santa Isabel (0.9332 bar_{patm})	6.39	6.67	6.37	6.48	-1.24
	6.55	6.84	6.53	6.64	-
	6.71	7.01	6.70	6.81	1.24
Ambato (0.8132 bar_{patm})	5.55	5.79	5.52	5.62	-1.45
	5.71	5.96	5.69	5.79	-
	5.88	6.13	5.86	5.96	+1.45

Anticiclón (+2 kPa)
 Borrasca (-2 kPa)

Es importante mencionar que, relativo al comparativo de variación a nivel local, la presencia de cualidades meteorológicas de anticiclón (+2 kPa_{patm}) producirían un incremento en las prestaciones obtenidas por el motor, mientras que en presencia de borrascas (-2 kPa_{patm}) las prestaciones a disminuyen porcentualmente en la misma medida. Además, con respecto a ciudades intermedias, tal como se expone en Fig. 4-13, la tendencia de disminución con respecto a la presión atmosférica es prácticamente lineal.

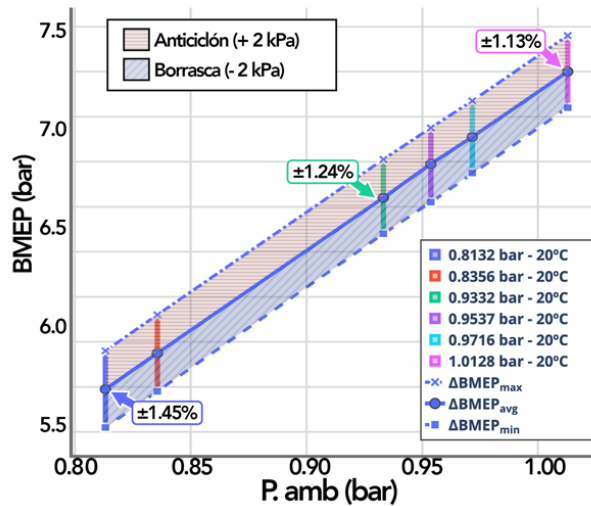


Fig. 4-13 Efecto de la variación local de la presión atmosférica sobre la BMEP con características de anticiclón y borrasca

4.2.2. Efecto sobre BSFC

Al contrario de lo ocurrido con la disminución de BMEP con respecto a la variación de la presión atmosférica, en el caso de BSFC existe un aumento en ambos niveles de análisis del estudio paramétrico.

El incremento promedio de consumo específico de combustible, si la comparación se realiza entre ciudades (tomando como referencia la diferencia de $\Delta P_{amb_{GYE-AMB}} = 19.96 kPa_{patm}$), es de +0.40 $g/kWh.kPa$ a 0°C, 0.42 $g/kWh.kPa$ a 20°C y 0.43 $g/kWh.kPa$ a 40°C, apoyando así los resultados de incremento en el consumo de combustible por variación de la temperatura, realizados previamente, con un 0.16%/kPa de aumento.

Otros valores estimados por el modelo para diferencias de BSFC entre Guayaquil (1.0128 bar_{patm}) y Ambato (0.8132 bar_{patm}), para los tres regímenes de giro (1200 rpm, 1600 rpm y 2400 rpm), a las tres temperaturas de análisis (0°C, 20°C y 40°C) son:

Tabla 4-12 Sensibilidad de BSFC en tres rangos de temperatura (baja, media y alta) para dos presiones ambiente características cuando ésta varía de forma regional debido a la altitud

<i>BSFC_{avg} (g/kWh)- Cantidad de Combustible Constante</i>									
Presión Atmosférica	Baja Temperatura (0°C)			Media Temperatura (20°C)			Alta Temperatura (40°C)		
	1200 rpm	1600 rpm	2400 rpm	1200 rpm	1600 rpm	2400 rpm	1200 rpm	1600 rpm	2400 rpm
Guayaquil (1.0128 bar_{Patm})	248.88	243.75	243.58	253.50	248.01	247.67	258.01	252.25	251.66
Ambato (0.8132 bar_{Patm})	256.86	251.40	251.92	261.79	255.97	256.37	266.60	260.53	260.74
ΔBSFC / ΔPatm (g/kWh.kPa)	-0.40	-0.38	-0.42	-0.42	-0.40	-0.44	-0.43	-0.41	-0.45
ΔBSFC_{avg} / ΔPatm (g/kWh.kPa)	-0.40			-0.42			-0.43		

Como se verifica en Fig. 4-14, el coeficiente de sensibilidad es porcentualmente mayor a temperaturas elevadas (40°C) con un 3.41% g_{BSFC}/kWh , si lo comparamos con el estimado, según el modelo a temperaturas bajas (0°C), de 3.26% g_{BSFC}/kWh .

Además, debido a la afección de este parámetro ambiental, considerando regímenes de funcionamiento bajo (1200 rpm) el incremento de BSFC promedio acumulado es de 3.27% g_{BSFC}/kWh , a régimen medio (1600 rpm) se reduce ligeramente a 3.21% g_{BSFC}/kWh , para finalmente a régimen alto (2400 rpm) verificarse un incremento de 3.52% g_{BSFC}/kWh (Fig. 4-14 – recuadro I).

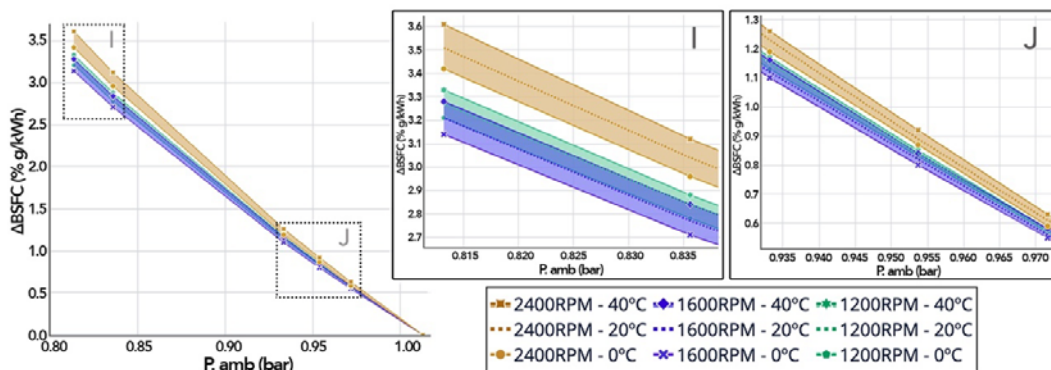


Fig. 4-14 Efecto porcentual acumulado de la variación de la presión atmosférica sobre la BSFC a 0°C, 20°C y 40°C.

De forma local, la evaluación sobre la afección de condiciones de anticiclón y borrasca tiene un resultado contrario ya que, a diferencia de en las prestaciones, con presencia de anticiclón (+2 kPa_{atm}) el BSFC disminuye en promedio un -0.17%/kPa, mientras que en borrasca (-2 kPa_{atm}) aumenta el consumo en +0.18%/kPa (Fig. 4-15).

Para el resto de ciudades, la influencia de la variación local de la presión atmosférica quedaría representada de la siguiente manera:

Tabla 4-13 Sensibilidad local de la BSFC en presencia de anticiclón y borrasca (± 2 kPa_{atm}) para tres presiones ambiente características a 20°C

<i>BSFC (g_{BSFC}/kWh) - Cantidad de Combustible Constante</i>					
Presión Atmosférica	Régimen 1200 rpm	Régimen 1600 rpm	Régimen 2400 rpm	BSFC	ΔBSFC (%/kPa)
<i>Guayaquil</i> (1.0128 bar _{atm})	254.38	248.80	248.32	250.50	+0.16
	253.50	248.01	247.67	249.72	-
	253.65	247.25	247.05	248.98	-0.15
<i>Santa Isabel</i> (0.9332 bar _{atm})	257.42	251.71	251.44	253.52	+0.17
	256.42	250.80	250.71	252.64	-
	255.47	249.95	250.00	251.81	-0.17
<i>Ambato</i> (0.8132 bar _{atm})	262.99	257.07	257.28	259.11	+0.21
	261.79	255.97	256.37	258.04	-
	260.64	254.92	255.52	257.02	-0.20

Anticiclón (+2 kPa)
 Borrasca (-2 kPa)

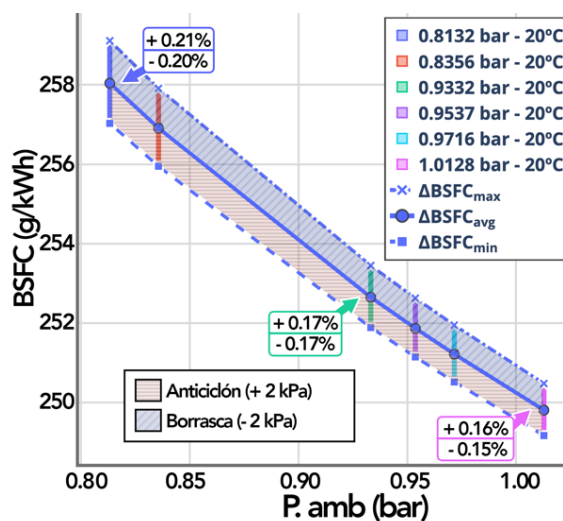


Fig. 4-15 Efecto promedio de la variación local de la presión atmosférica sobre el BSFC con características de anticiclón y borrasca.

Cabe recalcar en este punto que, relativo al comparativo de variación a nivel local, por un lado, tal como se mencionó anteriormente, a diferencia de con la variación de las prestaciones del motor, la presencia de cualidades meteorológicas de anticiclón (+2 kPa_{Patm}) producen una disminución en el consumo específico de combustible BSFC por el motor, mientras que en presencia de borrascas (-2 kPa_{Patm}) este consumo aumenta porcentualmente en diferente medida (Fig. 4-15).

4.2.3. Efecto sobre la emisión de NOx

Regionalmente, si la comparación se realiza entre ciudades (tomando como referencia la diferencia de $\Delta P_{amb_{GYE-AMB}} = 19.96 kPa_{Patm}$), se presenta una disminución promedio de -0.30 g/kWh a 0°C, -0.38 g/kWh a 20°C y -0.45 g/kWh a 40°C (Fig. 4-17), en concordancia con los valores obtenidos en el análisis de variación de la temperatura. No existen diferencias relevantes en las pendientes de cada una de las líneas de emisión generadas para cada régimen de giro, en las tres temperaturas propuestas. Es así que, para el modelo de diferencias de NOx entre Guayaquil (1.0128 bar_{Patm}) y Ambato (0.8132 bar_{Patm}), para los tres regímenes de giro (1200 rpm, 1600 rpm y 2400 rpm), a las tres temperaturas de análisis (0°C, 20°C y 40°C), se registran estos resultados:

Tabla 4-14 Sensibilidad de NOx en tres rangos de temperatura (baja, media y alta) para dos presiones ambiente características cuando ésta varía de forma regional debido a la altitud.

<i>NOx_{avg} (g/kWh)- Cantidad de Combustible Constante</i>									
Presión Atmosférica [bar_{Patm}]	Baja Temperatura (0°C)			Media Temperatura (20°C)			Alta Temperatura (40°C)		
	1200 rpm	1600 rpm	2400 rpm	1200 rpm	1600 rpm	2400 rpm	1200 rpm	1600 rpm	2400 rpm
Guayaquil (1.0128 bar_{Patm})	9.21	8.74	7.19	10.26	9.86	8.50	11.18	10.86	9.77
Ambato (0.8132 bar_{Patm})	8.87	8.41	6.96	9.86	9.45	8.18	10.70	10.38	9.36
$\Delta NOx/\Delta Patm$ ($g/kWh.kPa$)	0.017	0.016	0.012	0.020	0.021	0.016	0.024	0.024	0.021
$\Delta NOx_{avg}/\Delta Patm$ ($g/kWh.kPa$)	0.015			0.019			0.023		

Tal como se observa en (Tabla 4-14) la reducción promedio es porcentualmente más amplia a temperaturas elevadas (40°C) con un -0.22%/kPa, si lo comparamos con el estimado, según el modelo a temperaturas bajas (0°C), de -0.18%/kPa. Finalmente, Si consideramos los puntos propuestos por la diferencia regional de presión atmosférica ($\Delta P_{amb_{GYE-AMB}} = 19.96 \text{ kPa}_{Patm}$), entre 0°C y 40°C, para regímenes de funcionamiento bajo (1200 rpm) la diferencia porcentual en la emisión de NOx promedio es de -1.00% g/kWh , a régimen medio (1600 rpm) se reduce ligeramente a -0.65% g/kWh , para finalmente a régimen alto (2400 rpm) verificarse una variación de -0.56% g/kWh (Fig. 4-16).

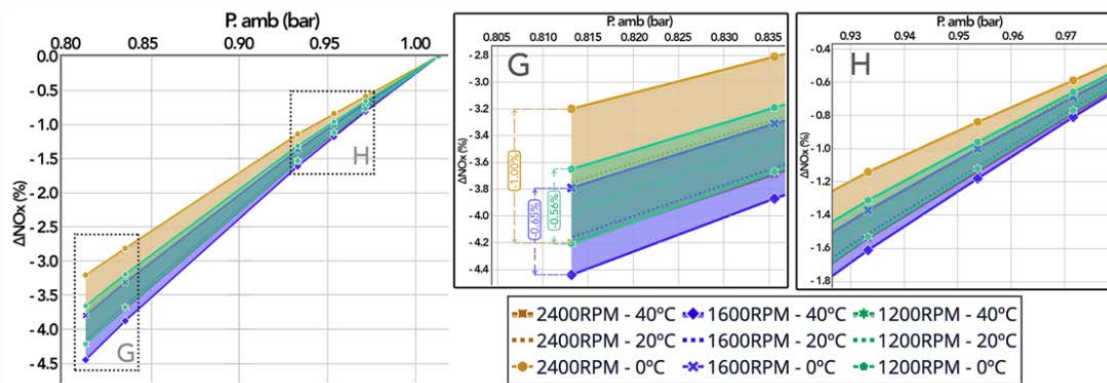


Fig. 4-16 Efecto porcentual acumulado de la variación de la presión atmosférica sobre la emisión de NOx a 0°C, 20°C y 40°C

A nivel local, la presencia de anticiclón (+2 kPa_{Patm}) y borrasca (-2 kPa_{Patm}) es ligeramente mayor a la presentada para BSFC, pero en ningún momento del modelo supera el 1% g_{NOx}/kWh de influencia (con $\Delta NOx_{m\acute{a}x} = 0.78\%$ absoluto como referencia). La tendencia de formación de contaminantes es positiva en el primer caso, mientras que para el segundo caso se observa una reducción de la emisión de NOx (Fig. 4-17). Para el resto de ciudades, la influencia de la variación local de la presión atmosférica quedaría representada de la siguiente manera:

Tabla 4-15 Sensibilidad local de la emisión de NOx en presencia de anticiclón y borrasca ($\pm 2 \text{ kPa}_{Patm}$) para tres presiones ambiente características a 20°C.

<i>NOx (g/kWh) – Constant Fuel Mass</i>					
Presión Atmosférica	Régimen 1200 rpm	Régimen 1600 rpm	Régimen 2400 rpm	NOx_{avg}	ΔNOx (%/kPa)
Guayaquil <i>(1.0128 bar_{Patm})</i>	10.29	9.91	8.61	9.60	-0.30%
	10.26	9.96	8.68	9.66	-
	10.38	10.02	8.74	9.72	+0.29%

Santa Isabel (0.9332 bar_{Patm})	10.07	9.67	8.35	9.36	-0.33%
	10.13	9.73	8.42	9.43	-
	10.18	9.79	8.48	9.49	+0.32%
Ambato (0.8132 bar_{Patm})	9.70	9.27	7.90	8.96	-0.41%
	9.77	9.34	7.98	9.03	-
	9.84	9.41	8.06	9.10	+0.39%
 Anticiclón (+2 kPa)		 Borrasca (+2 kPa)			

El comportamiento de la tendencia de afección (Fig. 4-17) para NOx, es de ligera formación curvilínea, con proyección a una mayor disminución entre los dos extremos meteorológicos expuestos a menor presión atmosférica presente en el ambiente. Además, se observa un aumento de generación de NOx a bajo régimen de giro (1200 rpm), con respecto a un punto de funcionamiento mayor (2400 rpm), con un +19.51% g/kWh en Guayaquil (1.0128 bar_{Patm}) y un +22.78% g/kWh en Ambato (0.8132 bar_{Patm}) en ambientes de borrasca (-2 kPa_{Patm}), en comparación con un +18.74% g/kWh en Guayaquil (1.0128 bar_{Patm}) y un +22.08% g/kWh en Ambato (0.8132 bar_{Patm}) en ambientes de anticiclón (+2 kPa_{Patm}).

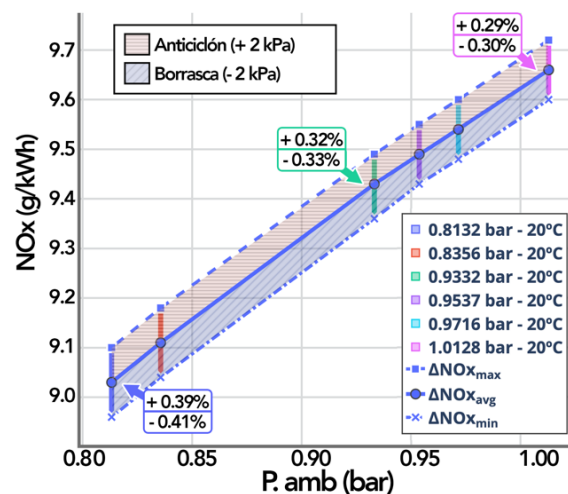


Fig. 4-17 Efecto de la variación local de la presión atmosférica sobre NOx con características de anticiclón y borrasca.

4.2.4. Efecto sobre la emisión de CO

Si el estudio de variación lo ampliamos de forma regional, las tendencias no siguen un patrón claro, como se puede observar en Fig. 4-18. Destaca principalmente que, en el caso de regímenes de giro, la producción de CO sería mucho mayor en altos regímenes de funcionamiento (2400 rpm), con una diferencia promedio de 9.34 g/kWh con respecto a

regímenes bajos y medios (1200 rpm y 1600 rpm). La pendiente de crecimiento entre ciudades mantiene una tendencia menos estable en todos de los casos, si bien es cierto la emisión promedio de CO verifica esta ligera diferencia.

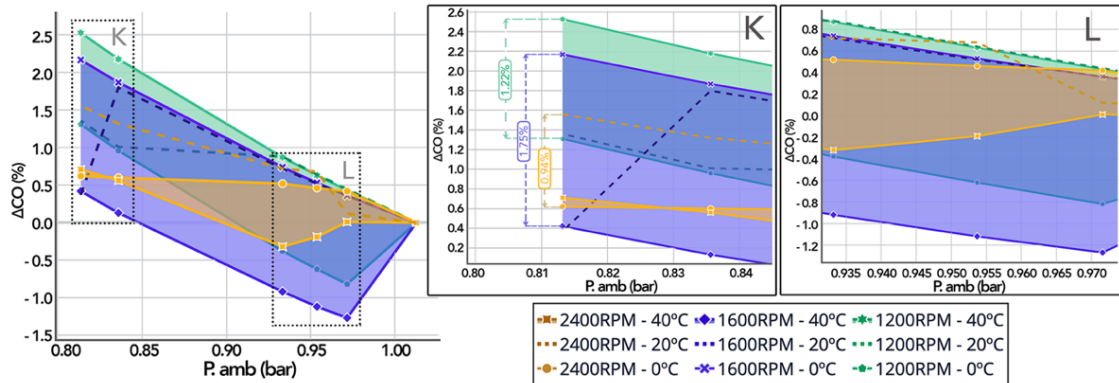


Fig. 4-18 Efecto porcentual acumulado de la variación de la presión atmosférica sobre la emisión de CO a 0°C, 20°C y 40°C.

Ejemplificando, para $\Delta P_{amb_{GYE-AMB}} = 19.96 \text{ kPa}_{Patm}$, en bajas temperaturas de funcionamiento (0°C) tiene una variación de $\Delta CO_{avg} = +1.27\%$, en temperaturas medias (20°C) de $\Delta CO_{avg} = +1.15\%$, y en altas temperaturas (40°C) $\Delta CO_{avg} = +1.14\%$. A continuación, para el modelo de variación de la emisión de CO entre Guayaquil (1.0128 bar_{Patm}) y Ambato (0.8132 bar_{Patm}), en los tres regímenes de giro (1200 rpm, 1600 rpm y 2400 rpm), a las tres temperaturas (0°C, 20°C y 40°C), se registran estos resultados:

Tabla 4-16 Sensibilidad de CO en tres rangos de temperatura (baja, media y alta) para dos presiones ambiente características cuando ésta varía de forma regional debido a la altitud

CO_{avg} (g/kWh)- Cantidad de Combustible Constante									
Presión Atmosférica [bar_{Patm}]	Baja Temperatura (0°C)			Media Temperatura (20°C)			Alta Temperatura (40°C)		
	1200 rpm	1600 rpm	2400 rpm	1200 rpm	1600 rpm	2400 rpm	1200 rpm	1600 rpm	2400 rpm
Guayaquil (1.0128 bar_{Patm})	18.78	19.50	28.32	20.01	20.94	29.37	21.22	22.36	30.64
Ambato (0.8132 bar_{Patm})	19.03	19.92	28.50	20.28	21.02	29.83	21.75	22.45	30.86
$\Delta CO/\Delta Patm$ (g/kWh. kPa)	-0.013	-0.021	-0.009	-0.014	-0.004	-0.023	-0.027	-0.005	-0.011
$\Delta CO_{avg} / \Delta Patm$ (g/kWh. kPa)	-0.014			-0.014			-0.014		

Porcentualmente, el modelo para la estimación en la generación de CO, aun cuando la fluctuación de resultados es evidente, tiene un mejor grado de aproximación en los regímenes de funcionamiento bajo (1200 rpm) y medio (1600 rpm), mientras que para regímenes altos presenta un mayor margen de error en los resultados (Fig. 4-18).

En el caso de relación entre puntos máximo y mínimos de generación, por ejemplo, en régimen bajo (1200 rpm) la diferencia porcentual en la ciudad de Ambato ($0.8132 \text{ bar}_{patm}$) es de $1.22\% \text{ g/kWh}_{CO}$, para régimen medio (1600 rpm) aumenta a $1.75\% \text{ g/kWh}_{CO}$, pero a régimen alto (2400 rpm) esta diferencia se disminuye a $0.94\% \text{ g/kWh}_{CO}$ (Fig. 4-18).

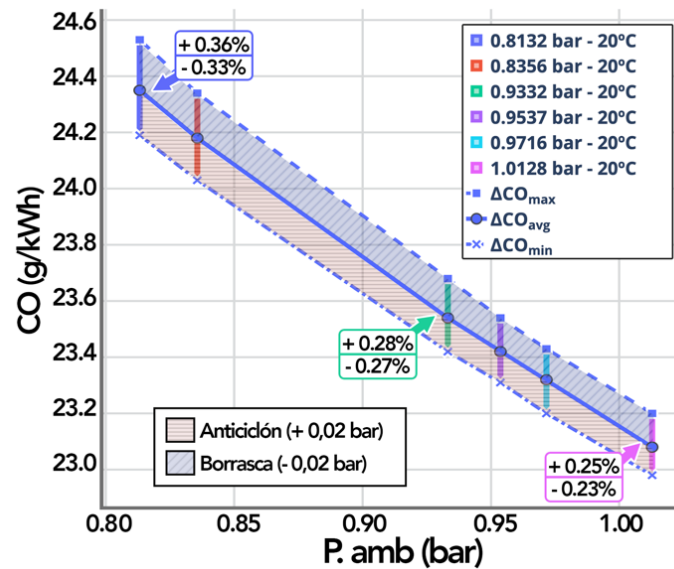


Fig. 4-19 Efecto promedio de la variación local de la presión atmosférica sobre CO con características de anticiclón y borrasca.

Localmente, con incidencia de anticiclón ($+2 \text{ kPa}_{patm}$) y borrasca (-2 kPa_{patm}) (Fig. 4-19) señala una mayor influencia en la emisión de CO en ciudades con mayor altitud con una diferencia de 0.69% en Ambato ($0.8132 \text{ bar}_{patm}$). En este caso, el coeficiente de sensibilidad de CO aumenta en la presencia de borrasca con $\Delta CO_{m\acute{a}x} = +0.36\%/kPa$, mientras que en presencia de anticiclón se reduce en $\Delta CO_{min} = -0.33\%/kPa$, a diferencia de la ciudad de Guayaquil ($1.0128 \text{ bar}_{patm}$), donde los valores se reducen a $\Delta CO_{m\acute{a}x} = +0.25\%/kPa$ y $\Delta CO_{min} = -0.23\%/kPa$, para condiciones de borrasca y anticiclón respectivamente. Para el resto de ciudades, la influencia de la variación local de la presión atmosférica tendría los siguientes valores:

Tabla 4-17 Sensibilidad local de la emisión de CO en presencia de anticiclón y borrasca ($\pm 2 \text{ kPa}_{\text{atm}}$) para tres presiones ambiente características a 20°C.

CO (g/kWh) – Cantidad de Combustible Constante					
Presión Atmosférica [bar_{atm}]	Régimen 1200 rpm	Régimen 1600 rpm	Régimen 2400 rpm	CO_{avg}	ΔCO (%/kPa)
<i>Guayaquil</i> (1.0128 bar_{atm})	20.10	21.04	29.53	23.56	+0.25%
	20.01	20.94	29.37	23.44	-
	19.92	20.85	29.23	23.33	-0.23%
<i>Santa Isabel</i> (0.9332 bar_{atm})	20.29	21.21	29.77	23.76	+0.28%
	20.19	21.10	29.59	23.62	-
	20.08	20.99	29.42	23.50	-0.27%
<i>Ambato</i> (0.8132 bar_{atm})	20.41	21.16	30.07	23.88	0.36%
	20.28	21.02	29.83	23.71	-
	20.16	20.89	29.63	23.56	-0.33%

Anticiclón (+2 kPa)
 Borrasca (+2 kPa)

4.2.5. Efecto sobre la emisión de Soot

A diferencia de lo ocurrido con NOx, en el caso del Soot se produce una mayor producción de Soot en regímenes de funcionamiento medio y alto (para 1600 rpm: $Soot_{GYE} = 0.93 \text{ g/kWh}$, $Soot_{AMB} = 1.03 \text{ g/kWh}$), y en regímenes de funcionamiento una menor formación (para 1200 rpm: $Soot_{GYE} = 0.75 \text{ g/kWh}$, $Soot_{AMB} = 0.82 \text{ g/kWh}$).

Como porcentaje, en el caso que se muestra en la Fig. 4-20 – recuadro O se observa claramente este fenómeno donde, para la ciudad de Ambato (0.8132 bar_{atm}), a 2400 rpm tenemos una variación $\Delta Soot = 0.75\%$, a 1600 rpm una variación $\Delta Soot = 0.74\%$ y a 1200 rpm una diferencia $\Delta Soot = 0.61\%$.

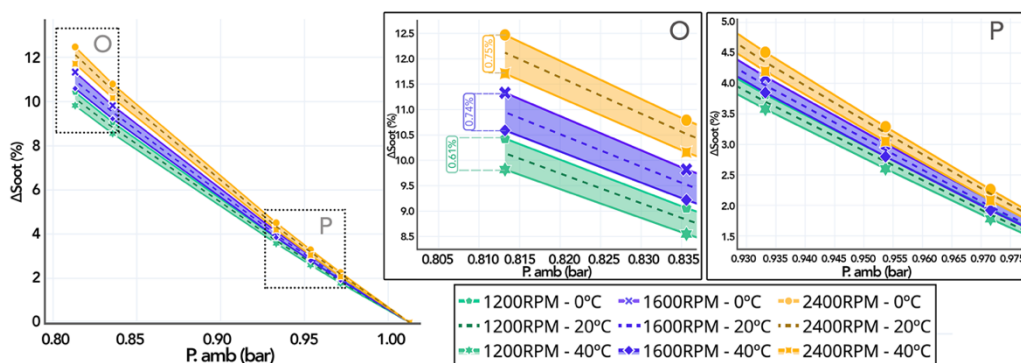


Fig. 4-20 Efecto porcentual acumulado de la variación de la presión atmosférica sobre la emisión de Soot a 0°C, 20°C y 40°C

Es importante especificar que, si bien anteriormente se indicó una generación equivalente en los regímenes de funcionamiento medio y elevado (1600 rpm y 2400 rpm), si analizamos la influencia acumulada, con respecto a los valores de referencia de Guayaquil ($1.0128 \text{ bar}_{\text{atm}}$), el plano de generación es mayor en 2400 rpm a medida que la presión atmosférica disminuya más, visualizándose un aumento promedio de $+3.18 \times 10^{-3} \text{ g/kWh.kPa}$ a 0°C , $+3.84 \times 10^{-3} \text{ g/kWh.kPa}$ a 20°C y $+4.51 \text{ g/kWh.kPa}$ a 40°C (Tabla 4-18).

Tabla 4-18 Valores promedio de emisión de Soot en presencia de anticiclón y borrasca ($\pm 0.02 \text{ bar}_{\text{atm}}$) para tres presiones ambiente características.

<i>Soot_{avg} (g/kWh) - Constant Fuel Mass</i>									
Presión Atmosférica [bar_{atm}]	Baja Temperatura (0°C)			Media Temperatura (20°C)			Alta Temperatura (40°C)		
	1200 rpm	1600 rpm	2400 rpm	1200 rpm	1600 rpm	2400 rpm	1200 rpm	1600 rpm	2400 rpm
Guayaquil (1.0128 bar_{atm})	0.46	0.57	0.55	0.59	0.74	0.72	0.75	0.93	0.92
Ambato (0.8132 bar_{atm})	0.51	0.64	0.62	0.65	0.82	0.81	0.82	1.03	1.02
$\Delta\text{Soot}/\Delta\text{Patm}$ (g/kWh.kPa) $\times 10^{-3}$	-2.51	-3.51	-3.51	-3.01	-4.01	-4.51	-3.51	-5.01	-5.01
$\Delta\text{Soot}_{\text{avg}}/\Delta\text{Patm}$ (g/kWh.kPa)	$-3.18 \cdot 10^{-3}$			$-3.84 \cdot 10^{-3}$			$-4.51 \cdot 10^{-3}$		

En presencia de anticiclón (+2 kPa) y borrasca (-2 kPa), la variación de la presión atmosférica tiene mayor influencia sobre la generación de este contaminante, superior a las tasas de generación de NOx y CO, llegando a rangos aproximados a $\Delta\text{Soot}_{\text{máx}} = 0.97\%/kPa$ en las ciudades con mayor altitud, como lo es la ciudad de Ambato (0.8132 bar_{atm}).

Las tendencias de generación en presencia del primer fenómeno meteorológico son de disminución de Soot, mientras que, en la posición contraria, de borrascas, aumenta la generación en un rango equivalente proporcionalmente (Fig. 4-21). Para las otras ciudades analizadas, la influencia de la variación local de la presión atmosférica tiene este registro:

Tabla 4-19 Sensibilidad local de la emisión de Soot en presencia de anticiclón y borrasca ($\pm 2 \text{ kPa}_{patm}$) para tres presiones ambiente características a 20°C.

Soot (g/kWh) - Cantidad de Combustible Constante					
Presión Atmosférica	Régimen 1200 rpm	Régimen 1600 rpm	Régimen 2400 rpm	$Soot_{avg}$	$\Delta Soot$ (%/kPa)
<i>Guayaquil</i> (1.0128 bar_{patm})	0.598	0.745	0.725	0.689	+0.38%
	0.593	0.740	0.720	0.684	-
	0.588	0.734	0.715	0.679	-0.39%
<i>Santa Isabel</i> (0.9332 bar_{patm})	0.621	0.775	0.757	0.718	+0.41%
	0.615	0.769	0.752	0.712	-
	0.609	0.762	0.746	0.706	-0.42%
<i>Ambato</i> (0.8132 bar_{patm})	0.660	0.828	0.814	0.768	+0.48%
	0.653	0.820	0.807	0.760	-
	0.646	0.812	0.800	0.753	-0.49%

Anticiclón (+2 kPa)
 Borrasca (+2 kPa)

Si bien la comparación de generación local, con respecto a la representada a nivel regional con base a regímenes de giro (Fig. 4-21), expone una fluctuación aparente, la tendencia de incremento de valores con respecto a la disminución de la presión atmosférica es clara.

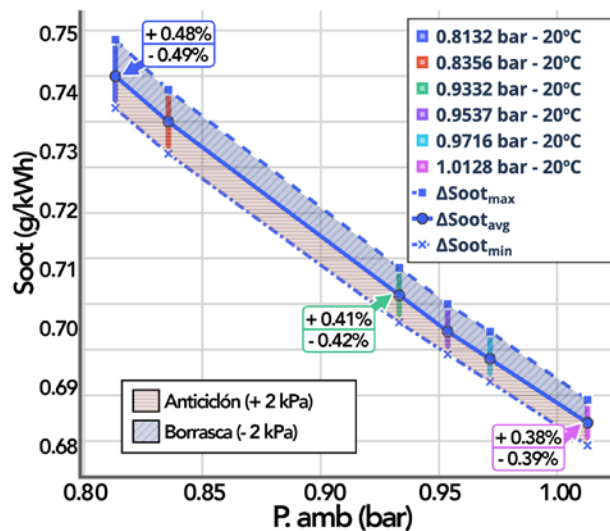


Fig. 4-21 Efecto promedio de la variación local de la presión atmosférica sobre Soot con características de anticiclón y borrasca.

4.3. Variación de la humedad relativa para cada altitud

De forma complementaria al análisis en aire seco, es importante la revisión de casos con participación de la variación de la humedad ambiental. Como se especificó anteriormente, para el estudio de influencia de la humedad relativa, tanto en las prestaciones del motor,

el consumo, y las emisiones contaminantes, se escogieron por un lado únicamente dos ciudades: Guayaquil ($1.0128 \text{ bar}_{\text{atm}}$) y Ambato ($0.8132 \text{ bar}_{\text{atm}}$), además se estudiaron los efectos de cuatro escenarios de humedad relativa (0% aire seco, 40%, 60% y 100% de humedad relativa), todos ellos aplicados en tres niveles de temperatura ambiente (0°C , 20°C y 40°C).

4.3.1. Efecto sobre BMEP

El efecto de la humedad relativa del aire ambiente sobre la BMEP es menor que los efectos debidos a la variación de la temperatura y la presión ambiente. Los resultados de la BMEP calculados para las dos ciudades de altitudes extremas consideradas, tomando en cuenta el efecto de pasar de 0% a 100% de humedad relativa se pueden ver en la (Fig. 4-22). en valores absolutos (izq.) y en valores porcentuales referidos a 0% humedad relativa. En general se produce una ligera disminución de la BMEP, que es más apreciable a mayores temperaturas (40°C) con respecto a medianas y bajas temperaturas (0°C y 20°C).

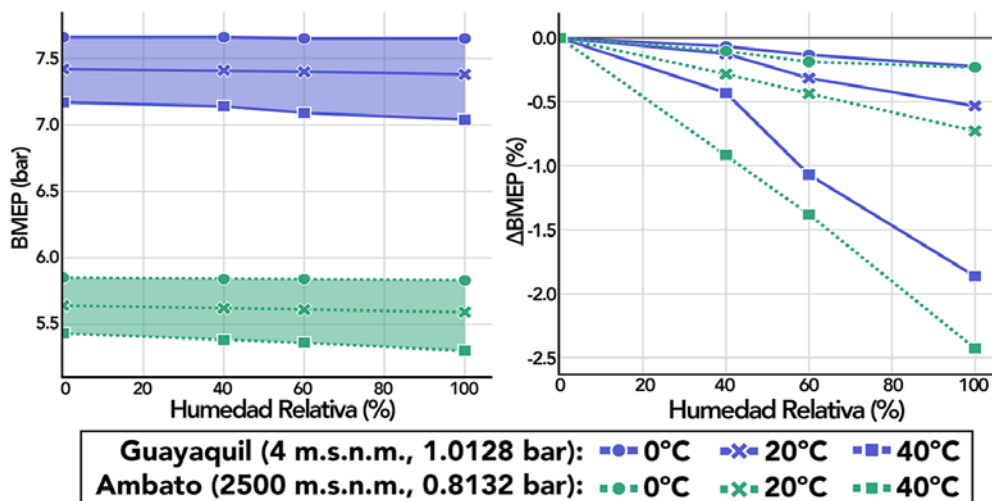


Fig. 4-22 Efecto de la humedad relativa ambiental sobre BMEP a 0°C , 20°C y 40°C

Si bien es cierto que, como se puede observar en Fig. 4-22 – der, la variación de BMEP puede llegar a valores de -2.5% , las características ambientales sobre las cuales se obtienen estos valores ($T = 40^\circ\text{C}$, $\phi = 100\%$) representan casos hipotéticos extremos, que experimentalmente serían de improbable obtención. A continuación, se registran los valores promedio de BMEP, para los tres rangos de temperatura (0°C , 20°C y 40°C), en las dos ciudades seleccionadas.

Tabla 4-20 Valores promedio de BMEP para dos presiones ambiente características - Variación de Humedad Relativa

<i>BMEP_{avg} (bar)</i> - Cantidad de Combustible Constante						
Humedad Relativa (%)	Guayaquil (1.0128 <i>bar_{patm}</i>)			Ambato (0.8132 <i>bar_{patm}</i>)		
	0°C	20°C	40°C	0°C	20°C	40°C
0	7.66	7.42	7.17	5.85	5.64	5.43
40	7.66	7.41	7.14	5.84	5.62	5.38
60	7.65	7.40	7.09	5.84	5.61	5.36
100	7.65	7.38	7.04	5.83	5.59	5.30
$\Delta BMEP/\Delta RH$ (<i>bar</i> /%)	$-1.0 \cdot 10^{-4}$	$-4.0 \cdot 10^{-4}$	$-1.3 \cdot 10^{-3}$	$-2.0 \cdot 10^{-4}$	$-5.0 \cdot 10^{-4}$	$-1.3 \cdot 10^{-3}$

4.3.2. Efecto sobre BSFC

Para la influencia de la variación de la humedad relativa, el consumo específico de combustible BSFC experimenta una dependencia de generación con respecto al régimen de giro donde, por ejemplo, a 20°C, a régimen bajo (1200 rpm), para Guayaquil (1.0128 *bar_{patm}*) se experimenta una disminución acumulada de $\Delta BSFC_{\phi=100\%} = -0.032\%$, en Ambato $\Delta BSFC_{\phi=100\%} = -0.018\%$; a régimen medio (1600 rpm), un $\Delta BSFC_{\phi=100\%} = -0.021\%$ para Guayaquil, $\Delta BSFC_{\phi=100\%} = -0.004\%$ para Ambato; y a régimen alto (2400 rpm), un $\Delta BSFC_{\phi=100\%} = +0.008\%$ y $\Delta BSFC_{\phi=100\%} = +0.035\%$ para Guayaquil y Ambato respectivamente.

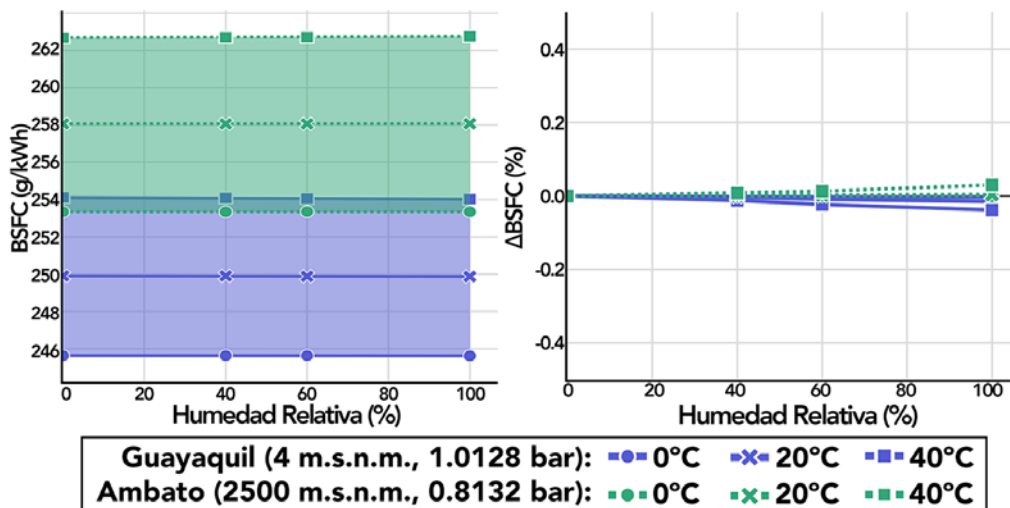


Fig. 4-23 Efecto de la humedad relativa ambiental sobre BSFC a 0°C, 20°C y 40°C

Como se puede observar en Fig. 4-23, la variación de BSFC por influencia de la humedad relativa es prácticamente despreciable, por cuanto los valores porcentuales en ningún caso llegan a expresar un $\pm 0.05\%$ de diferencia promedio. A continuación, en Tabla 4-21, se registran los valores promedio de BSFC, para los tres rangos de temperatura (0°C , 20°C y 40°C), en las dos ciudades seleccionadas, confirmando la prácticamente nula influencia en variación porcentual de este parámetro.

Tabla 4-21 Valores promedio de BSFC para dos presiones ambiente características - Variación de Humedad Relativa

<i>BSFC_{avg} (g/kWh)- Cantidad de Combustible Constante</i>						
Humedad Relativa (%)	Guayaquil (1.0128 bar _{atm})			Ambato (0.8132 bar _{atm})		
	0°C	20°C	40°C	0°C	20°C	40°C
0	245.63	249.90	254.11	253.34	258.06	262.28
40	245.63	249.90	254.08	253.34	258.06	262.70
60	245.63	249.88	254.05	253.35	258.06	262.71
100	245.62	249.87	254.02	253.34	258.07	262.75
$\Delta\text{BSFC}/\Delta\text{RH}$ (g/kWh.%)	$-1.0 \cdot 10^{-4}$	$-3.0 \cdot 10^{-4}$	$-9.0 \cdot 10^{-4}$	0	$+1.0 \cdot 10^{-4}$	$+4.7 \cdot 10^{-3}$

4.3.3. Efecto sobre la emisión de NOx

El efecto de la variación de la humedad relativa sobre las emisiones de NOx provoca una ligera reducción de las mismas (Fig. 4-24). En el caso de ciudades próximas a nivel del mar, como en Guayaquil (1.0128 bar_{atm}), la variación es pequeña para todas las temperaturas ambiente, siendo mayor ésta diferencia cuanto mayor sea la temperatura ($\Delta\text{NOx} = -0.63\%$, para $T = 40^{\circ}\text{C}$, $\phi = 100\%$).

El efecto es ligeramente más importante a medida que aumenta la altitud (menor presión atmosférica), mostrando una alta dependencia vinculada a este efecto, como se observa en Ambato (0.8132 bar_{atm}), donde si bien es cierto a temperatura baja (0°C) la afección es prácticamente despreciable, en el caso de temperaturas medias (20°C), cuando la humedad relativa ϕ pasa desde 0% hasta el 100%, se obtiene una disminución $\Delta\text{NOx} = -0.64\%$. A temperaturas altas (40°C), con el mismo incremento de humedad relativa, la disminución es aproximadamente el doble ($\Delta\text{NOx} = -1.47\%$).

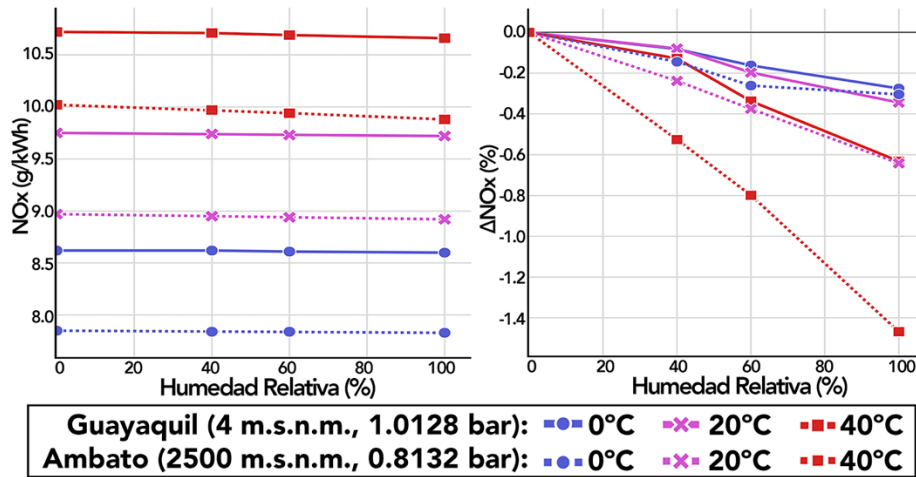


Fig. 4-24 Efecto de la humedad relativa ambiental sobre la emisión de NOx a 0°C, 20°C y 40°C

En este escenario, la influencia de la variación de la humedad relativa como afección en la densidad del aire únicamente, en el caso de ciudades próximas a nivel del mar, como Guayaquil (1.0128 bar_{patm}), se experimenta una variación mínima en todos los rangos de temperatura, siendo mayor ésta diferencia cuanto mayor sea la temperatura alcanzada ($\Delta NOx = -0.63\%$, $T = 40^\circ C$, $\phi = 100\%$).

El efecto es más visible a medida que se disminuye la presión atmosférica, mostrando una alta dependencia vinculada a este efecto, como se observa en Ambato (0.8132 bar_{patm}), donde si bien es cierto a temperatura baja (0°C) la afección es prácticamente despreciable, en el caso de temperaturas medias (20°C), cuando la humedad relativa ϕ pasa desde 0% hasta 100%, se detalla una disminución $\Delta NOx = -0.64\%$; mientras que, a temperaturas altas (40°C), con el mismo incremento de humedad relativa, la disminución es aproximadamente el doble ($\Delta NOx = -1.47\%$). En Tabla 4-22 se registran los valores de emisión de NOx promedio en todos los casos, tanto para Guayaquil como para Ambato.

Tabla 4-22 Valores promedio de NOx para dos presiones ambiente características - Variación de Humedad Relativa

Humedad Relativa (%)	NOx_{avg} (g/kWh)- Cantidad de Combustible Constante					
	Guayaquil (1.0128 bar_{patm})			Ambato (0.8132 bar_{patm})		
	0°C	20°C	40°C	0°C	20°C	40°C
0	8.62	9.75	10.72	7.85	8.97	10.02
40	8.61	9.74	10.71	7.84	8.95	9.97

60	8.61	9.73	10.69	7.84	8.94	9.94
100	8.60	9.73	10.66	7.83	8.92	9.88
$\Delta NO_x/\Delta RH$ (g/kWh. %)	$-2.0 \cdot 10^{-4}$	$-2.0 \cdot 10^{-4}$	$-6.0 \cdot 10^{-4}$	$-2.0 \cdot 10^{-4}$	$-5.0 \cdot 10^{-4}$	$-1.4 \cdot 10^{-3}$

4.3.4. Efecto sobre la emisión de CO

Los resultados de la influencia de la humedad relativa sobre las emisiones de CO muestran un incremento con la humedad relativa en todos los rangos de temperatura, tanto para la ciudad de Guayaquil (1.0128 bar_{atm}) como para la ciudad de Ambato (0.8132 bar_{atm}), siendo los valores de $\Delta CO_{m\acute{a}x} = 1.89\%$ para la primera y, $\Delta CO_{m\acute{a}x} = 3.23\%$ para la segunda respectivamente (Fig. 4-25). Este incremento es mayor (en m\u00f3dulo) que la reducci\u00f3n de la emisi\u00f3n de NOx.

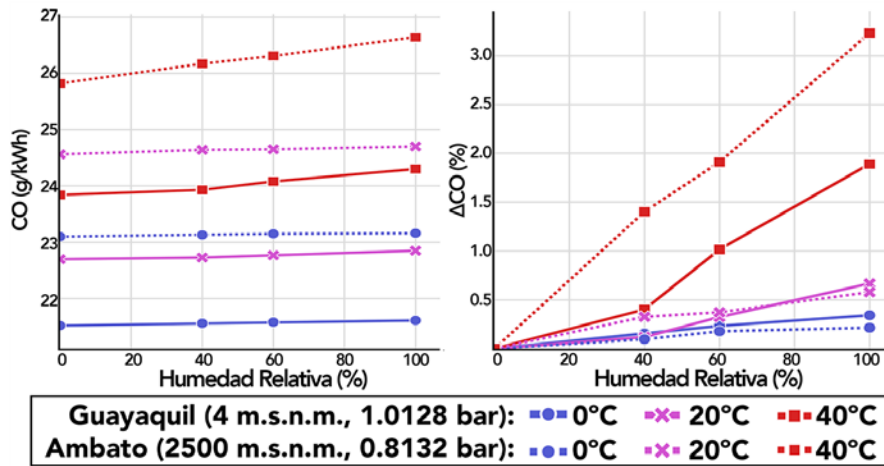


Fig. 4-25 Efecto de la humedad relativa sobre la emisi\u00f3n de CO a 0\u00b0C, 20\u00b0C y 40\u00b0C

Como bien se puede ver en Fig. 4-25, aunque existe fluctuaci\u00f3n de los valores estimados mediante el modelo, la misma que se experiment\u00f3 previamente tanto en el estudio param\u00e9trico de influencia de la temperatura y la presi\u00f3n atmosf\u00e9rica, se denota una clara tendencia de aumento en la tasa de emisi\u00f3n en presencia de ambientes con un mayor grado de humedad relativa.

Adem\u00e1s, es importante mencionar que la influencia de la humedad tiene una gran dependencia a la variaci\u00f3n de la temperatura, y a la diferencia de presi\u00f3n atmosf\u00e9rica, como en el caso de Guayaquil (1.0128 bar_{atm}) que tiene, entre la temperatura media 20\u00b0C y temperatura alta 40\u00b0C, con 60% de humedad relativa, un $\Delta CO = +0.69\%$; mientras que en Ambato (0.8132 bar_{atm}), un $\Delta CO = +1.54\%$. A continuaci\u00f3n, en

Tabla 4-23, se apuntan los demás valores promedio estimados de emisión de CO, para cada uno de los conjuntos de características ambientales propuestos.

Tabla 4-23 Valores promedio de CO para dos presiones ambiente características - Variación de Humedad Relativa

<i>CO_{avg} (g/kWh)</i> - Cantidad de Combustible Constante						
Humedad Relativa (%)	Guayaquil (1.0128 bar _{Patm})			Ambato (0.8132 bar _{Patm})		
	0°C	20°C	40°C	0°C	20°C	40°C
0	21.52	22.70	23.84	23.10	24.56	25.82
40	21.56	22.73	23.93	23.13	24.64	26.17
60	21.58	22.77	24.08	23.15	24.65	26.31
100	21.61	22.85	24.30	23.16	24.70	26.64
$\Delta CO/\Delta RH$ (g/kWh.%)	$+9.0 \cdot 10^{-4}$	$+1.5 \cdot 10^{-3}$	$+4.6 \cdot 10^{-3}$	$+6.0 \cdot 10^{-4}$	$+1.4 \cdot 10^{-3}$	$+8.2 \cdot 10^{-3}$

4.3.5. Efecto sobre la emisión de Soot

La mayor influencia de la humedad relativa se presenta sobre las estimaciones de Soot, con valores que oscilan entre $\Delta Soot_{m\acute{a}x} = -9.20\%$ para Guayaquil (1.0128 bar_{Patm}) y $\Delta Soot_{m\acute{a}x} = -11.45\%$ la ciudad de Ambato (0.8132 bar_{Patm}) (Fig. 4-26). La tendencia general es de disminución con respecto a la humedad relativa. En el caso de Guayaquil, a 0°C, existe un ligero aumento del resultado corregido de la emisión para tener en cuenta el aire húmedo.

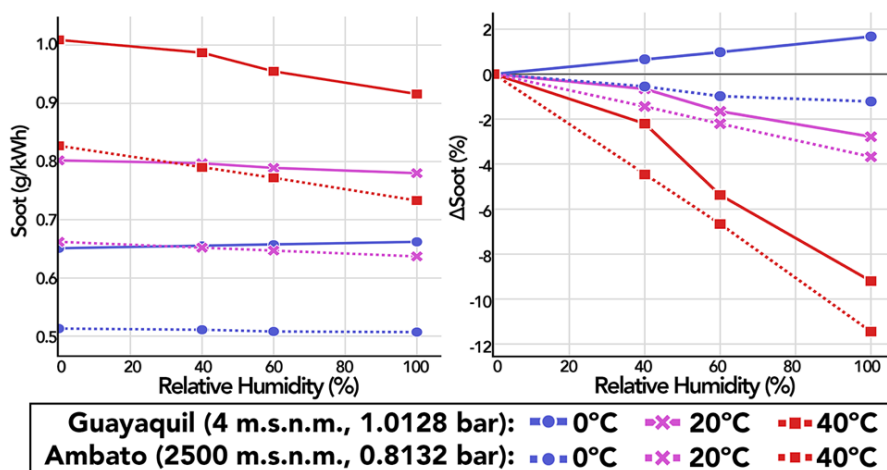


Fig. 4-26 Efecto de la humedad relativa sobre la emisión de Soot a 0°C, 20°C y 40°C

La presencia de fluctuaciones en la estimación es menor, comparándola con el caso anterior de cálculo de emisiones de CO, siendo mucho más evidente en casos de

temperaturas elevadas (40°C). De igual forma que en el análisis de CO, se puede observar una dependencia sobre la diferencia de temperatura ambiente, y presión atmosférica donde, por ejemplo, entre 20°C y 40°C, con 60% de humedad relativa, en Guayaquil (1.0128 bar_{patm}) existe una diferencia de $\Delta Soot = -3.72\%$; mientras que en Ambato (0.8132 bar_{patm}), un $\Delta Soot = -4.42\%$.

A continuación, en Tabla 4-24, se registran los valores de estimación promedio de emisión de Soot, tanto para Guayaquil, como para Ambato, en los casos paramétricos propuestos.

Tabla 4-24 Valores promedio de Soot para dos presiones ambiente características - Variación de Humedad Relativa

<i>Soot_{avg} (g/kWh)- Cantidad de Combustible Constante</i>						
Humedad Relativa (%)	Guayaquil (1.0128 bar_{patm})			Ambato (0.8132 bar_{patm})		
	0°C	20°C	40°C	0°C	20°C	40°C
0	0.651	0.802	1.009	0.513	0.662	0.827
40	0.655	0.797	0.987	0.511	0.652	0.790
60	0.657	0.789	0.955	0.508	0.647	0.772
100	0.662	0.780	0.916	0.507	0.637	0.733
$\Delta Soot/\Delta RH$ (g/kWh. %)	$+1.1 \cdot 10^{-4}$	$-2.2 \cdot 10^{-4}$	$-9.3 \cdot 10^{-4}$	$-6.0 \cdot 10^{-5}$	$-2.5 \cdot 10^{-4}$	$-9.4 \cdot 10^{-4}$

4.4. Obtención de coeficientes de sensibilidad y de correlaciones estadísticas de influencia de la temperatura y presión atmosféricas

Si bien es cierto que, el análisis individual de influencia de cada uno de los factores ambientales que intervienen en el proceso de combustión mantiene una importancia relevante, es necesario en este punto de la investigación obtener correlaciones estadísticas que nos permitan establecer una relación analítica con respecto a las condiciones ambiente, tanto de las prestaciones del motor (BMEP), como del consumo de combustible (BSFC) y las emisiones (NOx, CO y Soot). Para la obtención de las correlaciones deseadas se sigue el diagrama de procesos expuesto en Fig. 4-27.

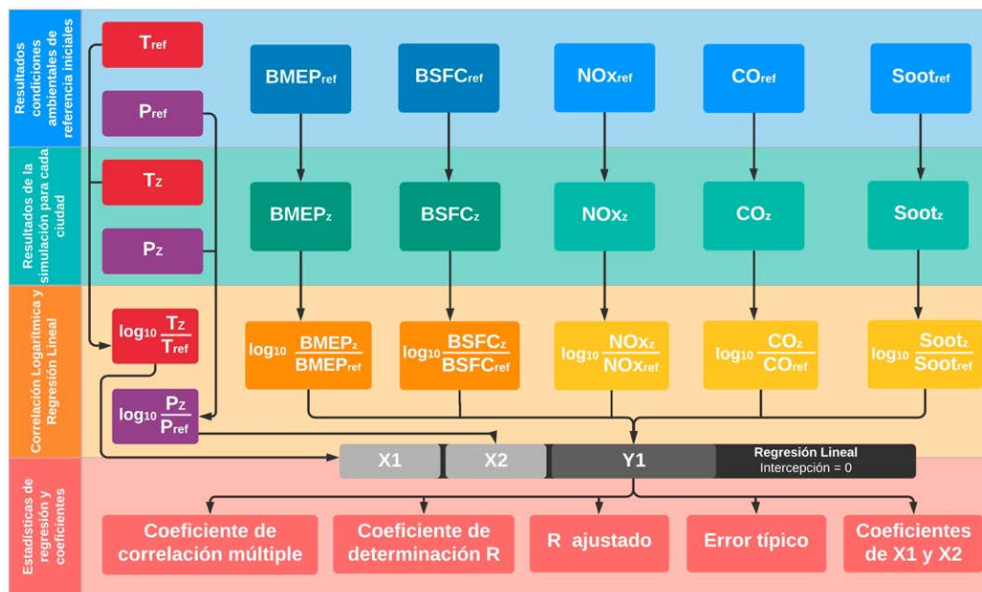


Fig. 4-27 Diagrama de procesos de obtención de correlaciones y coeficientes de ajuste estadísticos

Estas correlaciones estadísticas, tal como indican (Lapuerta, Armas, Agudelo, & Sánchez, 2006), no provienen de un análisis teórico de las ecuaciones, sino que en este caso específico vinculan el tipo de motor y las condiciones ambientales en las que se establece su funcionamiento. Sin embargo, el uso de valores de referencia permite adimensionalizar las variables de entrada (presión y temperaturas ambiente) y también las de salida (BMEP, BSFC, NOx, CO, Soot), a fin de obtener relaciones que pueden ser utilizadas en otros motores similares.

4.4.1. Coeficientes de sensibilidad de BMEP

En los apartados 4.1 y 4.2, sobre el efecto de la variación de la temperatura y la presión ambiente, para cada altitud en ambientes de aire seco, se especificó inicialmente que la diferencia de BMEP por la influencia de la variación de la temperatura en cada ciudad (o altitud, o presión atmosférica) de forma local es pequeña; sin embargo, la variación de BMEP es mucho más amplia si se considera con respecto a la variación de la altitud a nivel regional, en diferentes rangos de temperatura.

El efecto global de la variación de la presión y temperatura ambiente sobre la BMEP se puede representar, para cada régimen de giro del motor, como una superficie que relaciona tres variables (Fig. 4-28): BMEP (bar), temperatura (°C) y presión atmosférica (bar).

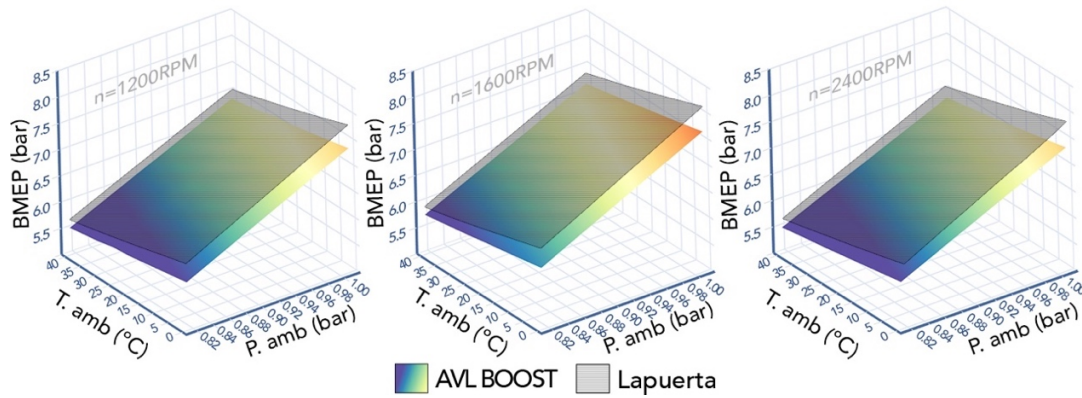


Fig. 4-28 Efecto de la temperatura y la presión atmosférica sobre la BMEP. AVL BOOST™ - (Lapuerta, Armas, Agudelo, & Sánchez, 2006)

Una forma de caracterizar cuantitativamente la sensibilidad en la dependencia de BMEP con respecto a la temperatura del aire es considerando un coeficiente que represente la pendiente de la superficie de BEMP a lo largo de una línea de presión atmosférica constante. Los valores de este coeficiente, en bar/°C (estrictamente hablando, en bar/K), se muestran en la Tabla 4-25. Dado que los resultados para cada presión atmosférica (o cada ciudad o altitud) son ligeramente diferentes, la última fila de la tabla incluye los valores promediados en cada ciudad.

Tabla 4-25 $\Delta BMEP / \Delta T_{amb}$ para Guayaquil, Santa Isabel y Ambato

Régimen [rpm]	$\Delta BMEP / \Delta T_{amb(0^{\circ}C-40^{\circ}C)}$ (bar/°C)		
	Guayaquil (1.0128 bar _{atm})	Santa Isabel (0.9332 bar _{atm})	Ambato (0.8132 bar _{atm})
1200	-0.0124	-0.0114	-0.0099
1600	-0.0129	-0.0120	-0.0104
2400	-0.0123	-0.0114	-0.0100
$(\Delta BMEP / \Delta T_{amb})_{avg}$ (bar/°C)	-0.013	-0.012	-0.010

La Tabla 4-26 muestra los valores análogos de un coeficiente de variación de la BMEP con respecto a la presión atmosférica, como la pendiente de la superficie de BMEP a lo largo de una línea de temperatura del aire constante, expresado en bar/KPa, (es decir, la variación de BMEP, medida en bar, al variar 1 kPa de presión atmosférica). Se presentan los resultados tanto para temperaturas bajas (0°C), temperaturas medias (20°C) y temperaturas altas (40°C), en cada uno de los regímenes de giro especificados (1200 rpm, 1600 rpm y 2400 rpm). Finalmente se indica en la última fila el valor promedio del coeficiente de dependencia de la BMEP con la presión ambiental para una temperatura

dada, en este caso el coeficiente indica que la sensibilidad de BMEP a la presión atmosférica es mayor a temperaturas más bajas.

Tabla 4-26 $\Delta BMEP/\Delta P_{atm}$ para 0°C, 20°C y 40°C.

$\Delta BMEP/\Delta P_{atm(GYE-AMB)} \text{ (bar/kPa)}$			
Régimen [rpm]	Baja Temperatura (0°C)	Media Temperatura (20°C)	Alta Temperatura (40°C)
1200	-0.072	-0.070	-0.067
1600	-0.075	-0.072	-0.070
2400	-0.072	-0.070	-0.068
$(\Delta BMEP/\Delta P_{atm})_{avg}$ (bar/kPa)	-0.073	-0.071	-0.068

Los coeficientes de dependencia lineal de la BMEP con respecto a la temperatura y a la presión ambiente obtenidos a partir de los resultados de la Tabla 4-25, y Tabla 4-26, permiten obtener valores de la BMEP en unas condiciones de ambiente a partir de los valores en otras condiciones de referencia, mediante el uso de expresiones lineales. Como ejemplo del uso de este coeficiente de variación, a un régimen de giro bajo (1200 rpm), con una temperatura de 20°C, la BMEP pasaría de 7.10 bar en Guayaquil (1.0128 bar_{patm}) a 5.71 bar en Ambato (0.8132 bar_{patm}), con un valor intermedio de 6.55 bar en Santa Isabel (0.9332 bar_{patm}).

Una alternativa más conveniente para expresar la dependencia de la BMEP, con respecto a las variables ambientales, es considerar una correlación estadística que proporcione una función analítica sencilla. Esto se puede obtener mediante una herramienta estadística de correlación múltiple, aplicada a todos los resultados calculados mediante el modelo de simulación, considerando todos los regímenes del motor, para todos los cambios de presión y temperatura ambiente. Los resultados se han ajustado a una expresión de BMEP, como funciones de potencia de la temperatura y la presión. Todas las variables no se dimensionan mediante el uso de los valores de referencia correspondientes de BMEP y temperatura y presión ambiente, como se indica en la Ec. (4-1).

$$BMEP_z = BMEP_{ref} \cdot \left(\frac{T_z}{T_{ref}} \right)^{-0.51} \cdot \left(\frac{P_z}{P_{ref}} \right)^{0.99} \quad (4-1)$$

Los exponentes obtenidos para la dependencia con la temperatura y la presión son aproximadamente -0.5 y 1, pero en realidad esto es consecuencia de las condiciones de trabajo del motor simulado se han ajustado para que la BMEP fuera la dada por la expresión Ec. (4-1), usando precisamente esos valores. Este tema se ve con mayor detalle al final de este apartado. Cabe recalcar nuevamente que, tal como se especifica en Fig. 4-2 y Fig. 4-3, la diferencia porcentual entre el valor obtenido mediante el modelo en AVL BOOST™, con respecto al valor estimado mediante Ec. (4-1), en el mayor de los casos no supera el 3%.

4.4.2. Coeficientes de sensibilidad de BSFC

De igual manera que con la variación de la BMEP, se puede obtener una dependencia de BSFC considerando las condiciones de presión y temperatura dependientes de la altitud en cada ciudad, que gráficamente es una superficie tridimensional para cada régimen de giro del motor, como se ve en la Fig. 4-29.

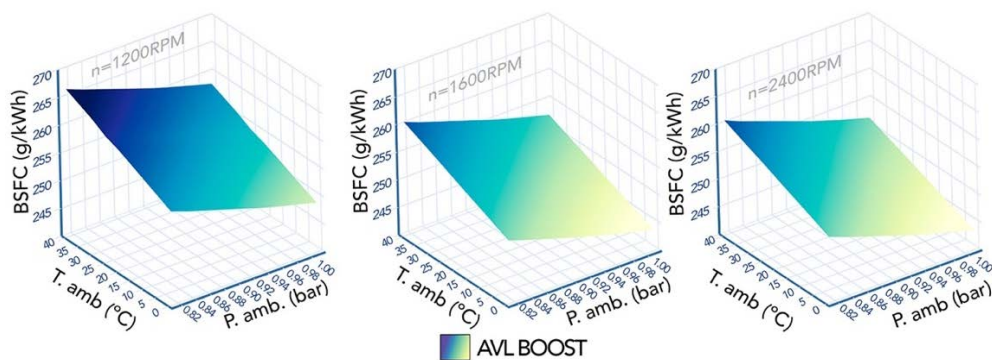


Fig. 4-29 Efecto de la temperatura y la presión atmosférica sobre BSFC para cada uno de los regímenes de giro considerados

Es así que, por ejemplo, en un régimen bajo de funcionamiento (1200 rpm), a 20°C, el BSFC cambiaría de 253.50 g/kWh en Guayaquil (1.0128 bar_{Patm}) a 261.79 g/kWh en Ambato (0.8132 bar_{Patm}), con un valor intermedio de 256.42 g/kWh en Santa Isabel (0.9332 bar_{Patm}). Los valores de los coeficientes de variación lineal de BSFC respecto a la temperatura ambiente para cada presión de referencia en tres ciudades representativas se pueden ver en la Tabla 4-27, con valores ligeramente distintos para cada régimen de giro. Análogamente, la Tabla 4-28 contiene los correspondientes coeficientes de variación de BSFC respecto a la presión ambiente.

Tabla 4-27 $\Delta BSFC/\Delta T_{amb}$ para Guayaquil, Santa Isabel y Ambato

$\Delta BSFC/\Delta T_{amb(0^{\circ}C-40^{\circ}C)} (g/kWh/10^{\circ}C)$			
Régimen [rpm]	Guayaquil (1.0128 bar P_{atm})	Santa Isabel (0.9332 bar P_{atm})	Ambato (0.8132 bar P_{atm})
1200	+0.23	+0.23	+0.24
1600	+0.21	+0.22	+0.23
2400	+0.20	+0.21	+0.22
$(\Delta BSFC/\Delta T_{amb})_{avg} (g/kWh/^{\circ}C)$	+0.21	+0.22	+0.23

Tabla 4-28 $\Delta BSFC/\Delta P_{atm}$ para 0°C, 20°C y 40°C

$\Delta BSFC/\Delta P_{atm(GYE-AMB)} (g/kWh.kPa)$			
Régimen [rpm]	Baja Temperatura (0°C)	Media Temperatura (20°C)	Alta Temperatura (40°C)
1200	+0.40	+41.55	+43.04
1600	+0.38	+39.89	+41.48
2400	+0.42	+43.58	+45.49
$(\Delta BSFC/\Delta P_{atm})_{avg} (g/kWh/kPa)$	+0.40	+0.42	+0.43

Para expresar de forma más general la dependencia de BSFC respecto a la temperatura y la presión ambiente en condiciones de masa de combustible constante, se ha obtenido una correlación en forma de función de potencia, tal como se ve en la Ec. (4-2). La tendencia general, de acuerdo con los resultados obtenidos por diversos autores, es que BSFC aumenta si la temperatura ambiente aumenta o la presión atmosférica disminuye.

$$BSFC_z = BSFC_{ref} \cdot \left(\frac{T_z}{T_{ref}}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{P_z}{P_{ref}}\right)^{-0.15} \quad (4-2)$$

4.4.3. Coeficientes de sensibilidad de CO2

Considerando el consumo específico de combustible BSFC dado por la Ec. (4-3) y un factor de emisión del combustible, la emisión de CO2 en las condiciones de referencia (tanto de la composición del combustible como de la altitud) puede expresarse como:

$$CO2_{ref} = BSFC_{ref} \cdot e_{CO2_{ref}} \quad (4-3)$$

En caso de que se utilice un combustible diferente, con un factor de emisión e_{CO_2x} , y la altitud z cambie, la emisión de CO_2 puede estimarse teniendo en cuenta tanto el combustible como las condiciones ambientales:

$$CO_{2x,z} = CO_{2ref} \cdot \frac{e_{CO_2x}}{e_{CO_2ref}} \cdot \left(\frac{T_z}{T_{ref}}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{P_z}{P_{ref}}\right)^{-0.15} \quad (4-4)$$

4.4.4. Coeficientes de sensibilidad para otras emisiones

Dentro del análisis por planos de influencia de la temperatura y la presión atmosférica (Fig. 4-30), si nos fijamos, por ejemplo, a un régimen medio (1600 rpm) con una temperatura de 20°C, la emisión de NO_x experimentaría una variación entre 9.86 g/kWh en Guayaquil (1.0128 bar_{Patm}) y 9.45 g/kWh en Ambato (0.8132 bar_{Patm}); la emisión de CO un ligero incremento entre 20.94 g/kWh en Guayaquil (1.0128 bar_{Patm}) y 21.02 g/kWh en Ambato (0.8132 bar_{Patm}); y, finalmente, la emisión de Soot aumenta de 0.74 g/kWh en Guayaquil (1.0128 bar_{Patm}) a 0.82 g/kWh en Ambato (0.8132 bar_{Patm}).

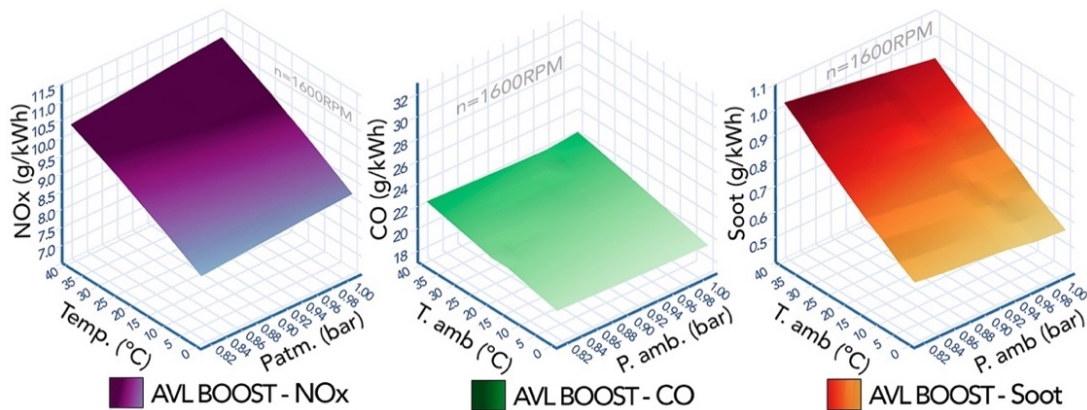


Fig. 4-30 Efecto de la temperatura y la presión atmosférica sobre la emisión de NO_x , CO y Soot.

Como tendencias generales, puede observarse que el aumento de la temperatura tiene una gran influencia sobre las emisiones específicas de los tres contaminantes considerados, aumentando dichos valores. El efecto de la presión es menor en el rango de altitudes considerado. Además, el efecto de una disminución de presión al aumentar la altitud conduce a una reducción de la emisión de NO_x , mientras que las emisiones de CO y Soot aumentan ligeramente.

Los resultados obtenidos siguen las mismas tendencias de los valores presentados en investigaciones previas realizadas por (Giraldo & Huertas, 2019) (He et al., 2011) (Bishop et al., 2001) sobre la formación de NOx y CO, y los registros obtenidos por (Serrano et al., 2019) (Ghazikhani et al., 2013) sobre emisión de Soot con respecto a la variación de las condiciones ambientales a diferentes altitudes.

Los valores de los coeficientes que representan la pendiente de la superficie de cada emisión contaminante se presentan en la Tabla 4-29, para la dependencia de la temperatura a presión constante, y en la Tabla 4-30, para la dependencia de la presión a temperatura constante.

En general, salvo algunos casos en la estimación de las emisiones de CO, ambos coeficientes de dependencia muestran tendencias uniformes con las rpm del motor, lo que permite obtener valores promediados, incluidos en la última fila de cada tabla.

Tabla 4-29 $\Delta ER/\Delta T_{amb}$ para Guayaquil, Santa Isabel y Ambato

Régimen [rpm]	$\Delta ER/\Delta T_{amb(0^{\circ}C-40^{\circ}C)} (g/kWh. ^{\circ}C)$								
	Guayaquil (1.0128 bar _{atm})			Santa Isabel (0.9332 bar _{atm})			Ambato (0.8132 bar _{atm})		
	NOx	CO	Soot*	NOx	CO	Soot*	NOx	CO	Soot*
1200	0.049	0.061	7.3	0.048	0.067	7.5	0.046	0.068	7.9
1600	0.053	0.072	9.0	0.052	0.063	9.3	0.049	0.063	9.8
2400	0.064	0.058	9.1	0.063	0.052	9.4	0.060	0.059	10.0
$(\Delta ER/\Delta T_{amb})_{avg}$ (g/kWh/°C)	0.056	0.064	8.5	0.054	0.061	8.7	0.052	0.063	9.2

*Valores expresados en notación científica $\times 10^{-3}$.

Tabla 4-30 $\Delta ER/\Delta P_{atm}$ para 0°C, 20°C y 40°C

Régimen [rpm]	$\Delta ER/\Delta P_{atm(GYE-AMB)} (g/kWh. kPa)$								
	Baja Temperatura (0°C)			Media Temperatura (20°C)			Alta Temperatura (40°C)		
	NOx	CO	Soot*	NOx	CO	Soot*	NOx	CO	Soot*
1200	-0.017	0.012	2.40	-0.020	0.014	3.01	-0.024	0.027	3.69
1600	-0.017	0.021	3.25	-0.021	0.004	4.06	-0.024	0.005	4.94
2400	-0.012	0.009	3.45	-0.016	0.023	4.37	-0.021	0.011	5.37
$(\Delta ER/\Delta P_{atm})_{avg}$ (g/kWh/kPa)	-0.015	0.014	3.03	-0.019	0.014	3.81	-0.023	0.014	4.67

*Valores expresados en notación científica $\times 10^{-3}$.

Siguiendo el mismo procedimiento estadístico de regresión lineal, utilizado para obtener correlaciones de efecto conjunto de temperatura y presión atmosférica, utilizando todos los valores obtenidos para los diferentes regímenes de giro del motor (1200 rpm, 1600 rpm y 2400 rpm), se obtienen las expresiones siguientes:

$$NOx_z = NOx_{ref} \cdot \left(\frac{T_z}{T_{ref}}\right)^{1.71} \cdot \left(\frac{P_z}{P_{ref}}\right)^{0.20} \quad (4-5)$$

$$CO_z = CO_{ref} \cdot \left(\frac{T_z}{T_{ref}}\right)^{0.81} \cdot \left(\frac{P_z}{P_{ref}}\right)^{-0.06} \quad (4-6)$$

$$Soot_z = Soot_{ref} \cdot \left(\frac{T_z}{T_{ref}}\right)^{3.58} \cdot \left(\frac{P_z}{P_{ref}}\right)^{-0.47} \quad (4-7)$$

4.4.5. Bondad de las correlaciones estadísticas

Como se ha visto, se han obtenido una serie de correlaciones estadísticas que permiten obtener una estimación aproximada de las prestaciones del motor, su consumo y sus emisiones, a una altitud z , a través de sus valores de temperatura y presión atmosférica a tal altitud (T_z, P_z), siempre que se disponga de una valor de referencia de la prestación, el consumo o la emisión contaminante ($BMEP_{ref}, BSFC_{ref}, NOx_{ref}, CO_{ref}, Soot_{ref}$), en las condiciones ambiente de referencia (T_{ref}, P_{ref}), y una serie de exponentes propios de cada variable (a, b).

Con la finalidad de evaluar la bondad de la aproximación estadística de los resultados, es preciso verificar por una parte los valores de R^2 ajustado, además del error típico obtenido en cada caso. Estos valores se exponen en la Tabla 4-31.

Tabla 4-31 Estudio de R^2 y error típico

Correlación Estadística	Exponentes		R^2	Error típico
	a	b		
$BMEP_z$ (Ec. (4-1))	-0.51	0.99	0.994	0.05%
$BSFC_z$ (Ec. (4-2))	0.25	-0.15	0.993	0.04%
NOx_z (Ec. (4-5))	1.71	0.20	0.947	0.75%
CO_z (Ec. (4-6))	0.81	-0.06	0.940	0.42%
$Soot_z$ (Ec. (4-7))	3.58	-0.47	0.993	0.26%

Aun habiendo obtenido valores de coeficiente de determinación ajustado R^2 en su gran mayoría elevados y cercanos a la unidad (valor que nos representa el grado de intensidad o efectividad que tienen las variables independientes en exponer la variable dependiente), es primordial visualizar el comportamiento que tiene cada una de las correlaciones al ser aplicada a cada régimen de giro, considerando el correspondiente valor de referencia de la variable involucrada.

En el caso de la BMEP, la determinación de los coeficientes a y b ha sido sujeto de extenso estudio, por ejemplo, (Lapuerta, Armas, Agudelo, & Sánchez, 2006) indica que el exponente a suele variar entre -0.5 y -1 para motores diésel de aspiración natural, mientras que el exponente b por lo general toma el valor de la unidad, resultados que coinciden con los valores expuestos por (Heywood, 1988), además de los incluidos en la norma DIN 70020 (1986) y en la norma SAE J 1349.

Aplicando los exponentes $a=-0.51$ y $b=0.99$, con respecto a la relación de la temperatura ambiente y la temperatura de referencia, y considerando una altitud intermedia de 1259.67 m.s.n.m., equivalente a 0.92 bar, se observa una tendencia uniforme en todos los regímenes de giro si comparamos sus valores con respecto al modelo desarrollado en AVL BOOST™ (Fig. 4-31 – Izq.), donde existe máximo un 0.46% de diferencia en los resultados. Para la correlación de $BSFC_z$, con los exponentes $a=0.25$ y $b=-0.15$, y de nuevo considerando como ejemplo la presión a la altitud intermedia de 1259.7 m.s.n.m., el error típico es menor, con una variación de resultados que oscila entre 0.02% y 0.14% como máximo (Fig. 4-31 – Der).

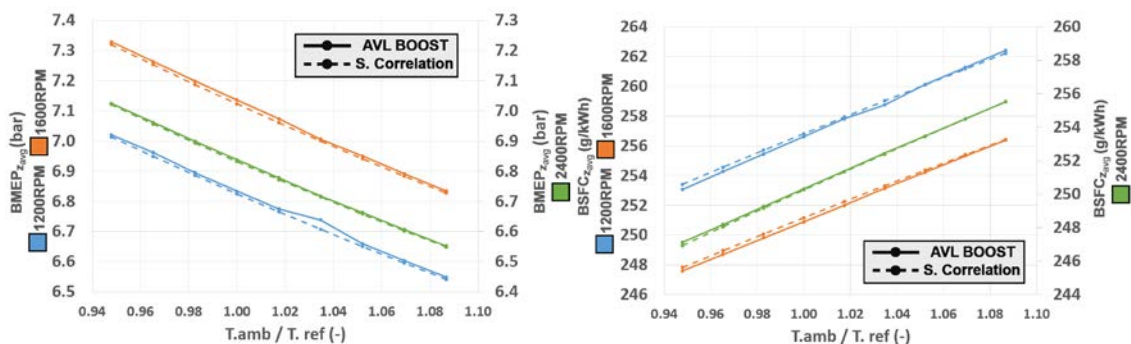


Fig. 4-31 Comparación de valores de $BMEP_{z_{avg}}$ y $BSFC_{z_{avg}}$ - AVL BOOST™ y las correlaciones obtenidas.

Análogamente, en la Fig. 4-32 se presenta la comparación entre los valores de la correlación y los resultados del modelo AVL BOOST™, en función de la temperatura

ambiente, considerando la presión de la altitud intermedia, tanto para NOx (Fig. 4-32, izquierda) como Soot (Fig. 4-32, derecha). Puede verse que para Soot el error es menor que para NOx, si bien, el mayor error en NOx se da para valores elevados de la relación entre temperaturas T_{amb}/T_{ref} , con un máximo de 3.61%.

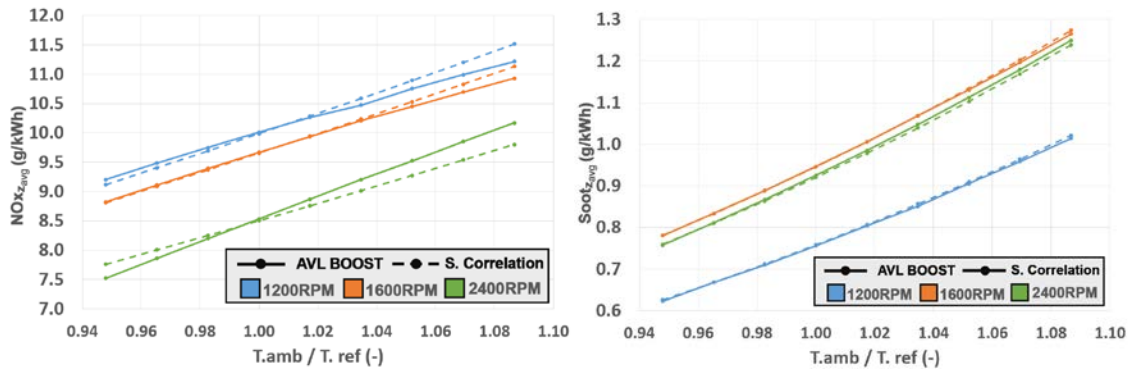


Fig. 4-32 Comparación de valores de $NO_{x,z_{avg}}$ y $Soot_{z_{avg}}$ de AVL BOOST™ y las correlaciones obtenidas.

Finalmente, en la Fig. 4-33 se muestran los resultados correspondientes a la comparación entre los valores de la emisión de CO del modelo y los correspondientes a la correlación obtenida (Ec. 32). Las tendencias son similares a las de NOx, con un error máximo de 2.35%.

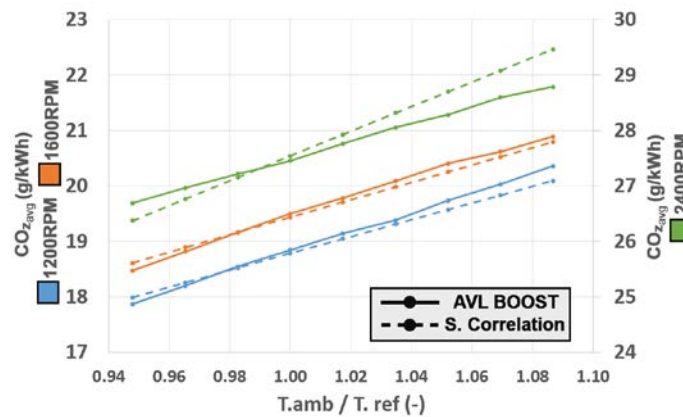


Fig. 4-33 Comparación de valores de $CO_{z_{avg}}$ de AVL BOOST™ y las correlaciones obtenidas.

CAPÍTULO 5

Estimación de prestaciones y emisiones de un autobús diésel con perfiles de conducción reales

5.	Simulación de prestaciones y emisiones de un autobús diésel con perfiles de conducción reales	125
5.1.	Características del sistema de propulsión y del vehículo para su simulación mediante AVL CRUISE™.....	125
5.2.	Configuración de las condiciones de simulación y del ciclo de conducción en AVL CRUISE™	128
5.2.1	Unidades lógicas de control de conducción.....	128
5.2.2	Establecimiento de condiciones de conducción representativas.....	131
5.2.3	Configuración del ciclo de conducción Cycle Run.....	134
5.2.4	Integración de las curvas características del motor de AVL BOOST™ en el modelo del vehículo AVL CRUISE™.....	135
5.3.	Conformación de mapas característicos del motor para distintas altitudes.....	137
5.3.1.	Variables de entrada para distintas condiciones de temperatura y presión atmosférica	137
5.3.2.	Mapas característicos de consumo de combustible y emisiones de NOx, CO y Soot del motor para distintas altitudes	140

5. Simulación de prestaciones y emisiones de un autobús diésel con perfiles de conducción reales

Una vez concluido el planteamiento de las prestaciones del motor a través del modelo de simulación del motor ADE360N mediante AVL BOOST™, detallado en el Cap. 3, es momento de establecer medios de estimación desde una perspectiva de funcionamiento en condiciones de conducción reales. Para poder llevar a cabo este cometido se ha utilizado el paquete informático AVL CRUISE™, el mismo que gracias a su configuración de elementos, nos permite introducir todo el sistema mecánico, información constructiva, configuración de dinámica vehicular, propiedades de conducción, conformación de la línea de dirección, y otra información técnica. En los apartados de este capítulo se expondrá todo el desarrollo planteado, su vinculación con la información obtenida por medio del estudio paramétrico anterior, para que en el siguiente capítulo se indique los grados de prestación, consumo de combustible y emisiones de gases contaminantes.

5.1. Características del sistema de propulsión y del vehículo para su simulación mediante AVL CRUISE™.

Para poder establecer un medio más generalizado de estimación en vehículos de transporte público típicos dentro de las ciudades seleccionadas de la República del Ecuador, se ha seleccionado el autobús con chasis desarrollado por BUSSCAR, modelo Buss 340 – Mercedes Benz MB OF-1722, con las siguientes características constructivas, expuestas dentro de la Tabla 5-1.

Tabla 5-1 Características constructivas BUSSCAR Bus 340 – Mercedes Benz MB OF-1722

Parámetro	Especificación	Valor
Motor*	Modelo	Motor ADE 360N series (ficha técnica Tabla 3-1)
Transmisión*	Modelo	Mercedes Benz MB G 85-6
	Máx. Torque Entrada (N.m / lbs-ft)	850 / 629
	Relación de reducción / desmultiplicación total	6.70 – 0.73 / 9.18
	Largo de Montaje	711 / 28

(mm / pulgada)		
	Eficiencia y Corrección de Pérdida de Torque	95%
Chasis	Tipo	Bastidor con largueros y travesaños. Material LNE38
	Capacidad Tanque de Combustible	0.3 m³
	Distancia desde enganche hasta ángulo frontal	9495.0 mm
	Altura del punto de apoyo en el banco de prueba	100.0 mm
	Batalla	5950.0 mm
	Curb weight	10766.0 kg
	Gross weight	12834.0 kg
	Embrague	Máximo Torque Transferible
Sistema de Escape	Coefficiente de pérdida de calor	0.93
	Capacidad de calor específico	210.0 J/(kg.K)
	Coefficiente de transferencia de calor catalizador/aire	25.0 W/m².K
	Peso	11.0 kg
	Temperatura de Operación	450°C
Frenos	Superficie del Pistón de Freno	5437.0 mm²
	Eficiencia del Freno	99%
	Coefficiente de Fricción	0.25
Neumáticos	Radio de Rodadura Estático	436.0 mm Circunferencia: 2739.47 mm
	Radio de Rodadura Dinámico	464.0 mm Circunferencia: 2915.4 mm

* **Fuente:** Engine Repair Manual ADE 360 Series. Atlantis Diesel Engines (PTY) LTD.

** **Fuente:** DaimlerChrysler Global Training Manual.

La variedad de características constructivas existentes en el Ecuador hace de la selección de un único modelo de autobús sea realmente una tarea compleja por cuanto, sobre todo en el centro del país, existe una elevada producción de elementos de fabricación de carrocerías, siendo de gran utilidad la información provista por el Centro de Fomento Productivo Metalmeccánico y Carrocero de la ciudad de Ambato.

La disposición de cada uno de los componentes, en conjunto con sus características y propiedades constructivas (Tabla 5-1), se disponen bajo un modelo de conexión (Fig. 5-1) a través de un bus virtual de datos de entrada y salida, exigiendo la denominación de una serie de controladores lógicos, que permitan representar con la mayor exactitud posible estas condiciones de conducción propuestas.

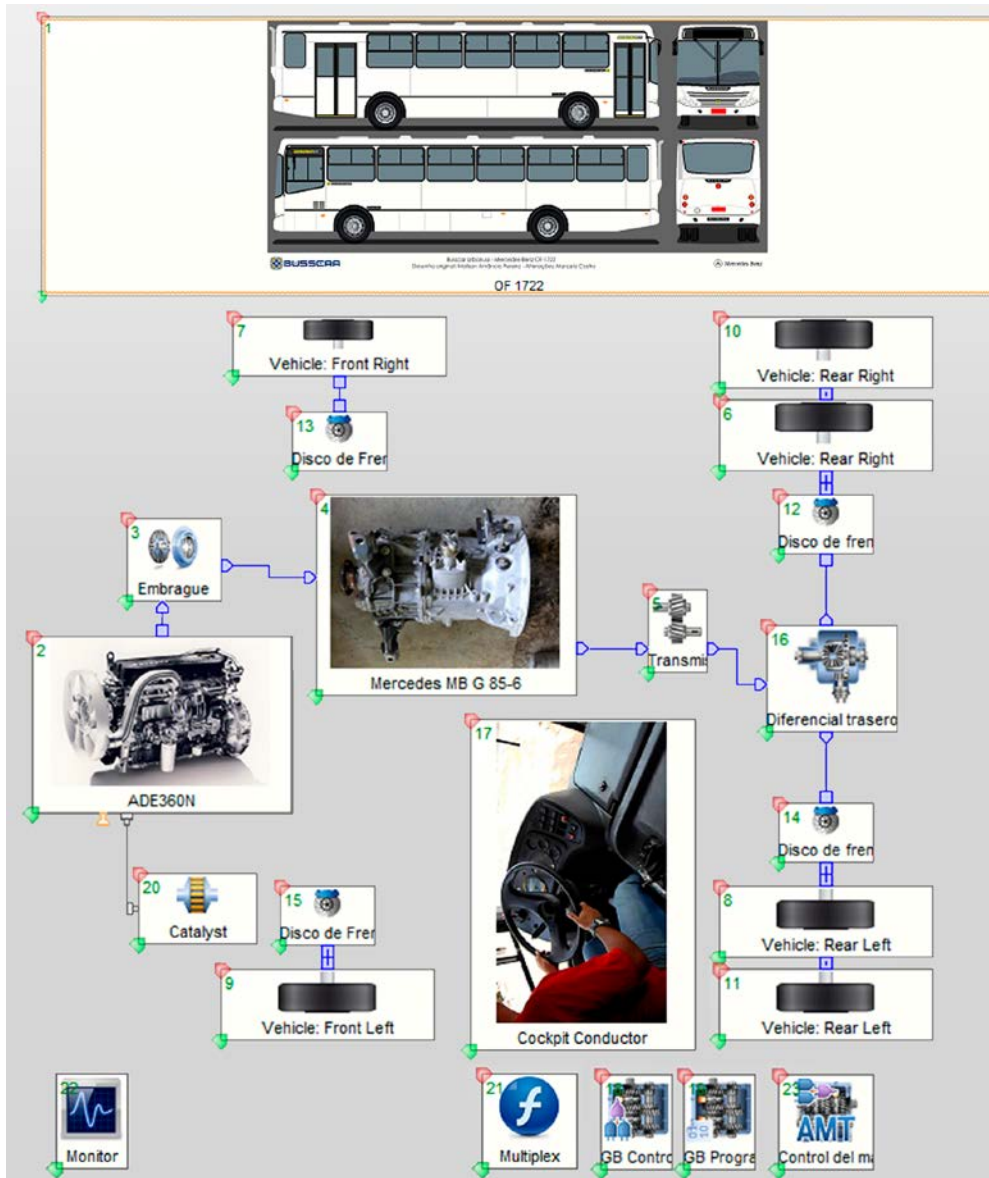


Fig. 5-1 Diseño del modelo en AVL CRUISE™ aplicado al vehículo BUSSCAR Mercedes Benz MB OF-1722

5.2. Configuración de las condiciones de simulación y del ciclo de conducción en AVL CRUISE™

Una de las principales dificultades expuestas, dentro de esta etapa del estudio investigativo, fue la conformación de términos idóneos que representen la variación de las condiciones atmosféricas (temperatura, presión atmosférica y humedad ambiental). Si bien es cierto que existía la posibilidad del estudio dentro del recorrido tanto en condiciones de aire seco, como con participación de la humedad relativa; con base al estudio paramétrico realizado en el Cap. 4, sección 4.3, donde se visualizó una mínima influencia de este parámetro en las estimaciones, se decidió que para simplificación del proceso de cálculo solamente se tomarían en cuenta condiciones de simulación sin participación de este último factor ambiental.

Previo a la presentación de la metodología de conformación de mapas característicos para distintas altitudes, es preciso establecer una serie de controladores lógicos generales que permitan la singularización de cada uno de los ejemplos tipo, teniendo como objetivo principal que el comportamiento del vehículo, así como de su conductor, no debería variar con respecto a la variación de las condiciones ambientales diferentes en cada caso.

5.2.1 Unidades lógicas de control de conducción

Dentro de AVL CRUISE™ están a disposición del usuario una serie de algoritmos de control que nos permitirían indicar una configuración de cambio de marchas, control del embrague, presión de frenado, y comportamiento del conductor en el momento exacto que se disponga.

En el campo del control del cambio de marchas, a efectos de la presente investigación se optó por la utilización del controlador Gear Box Control ya que, como se expondrá posteriormente, al tener definido un perfil de velocidad del vehículo (obtenido mediante registro por GPS en el propio autobús) sería aquel que nos permitiría mantener invariable el comportamiento del conductor. Las variables de control para el cambio de marcha, con respecto al régimen de giro, se presentan en la Tabla 5-2. En esta tabla, y en general en las siguientes, para una mejor especificación, se ha decidido mantener la denominación de variables en idioma inglés que usa el código AVL CRUISE™.

Tabla 5-2 Variables de control para Mercedes Benz MB G 85-6 (Gear Box Control) en condiciones de cambio con respecto al régimen de giro

Marcha	Upshifting	Downshifting
1	1500	1000
2	2000	1500
3	2000	1500
4	2000	1500

Para el control del embrague y presión de frenado, en el primer caso se utilizó un controlador AMT (Automated Manual Transmission Control), el mismo que por un lado funciona como actuador para establecer el funcionamiento del embrague, y además de eso realiza funciones de reducción de la señal de carga (respecto al torque deseado) durante el manejo y cambio de marchas de acuerdo al estado actual del vehículo dentro del recorrido (ralentí, arranque, cambio de marcha, modo de conducción, entre otros) mejorando la estabilidad de la estimación de prestaciones, consumo de combustible y emisiones de gases contaminantes. En el segundo caso se utiliza un multiplex para transmisión completa de la fuerza de frenado expresado por el conductor como dato de salida, conectado al valor de entrada de frenado del vehículo, debido mayormente a la no presencia de un bus de conexión dedicado.

Los valores de control del AMT, así como la curva característica de funcionamiento del embrague, se presentan en la Tabla 5-3 y en la respectivamente.

Tabla 5-3 Variables de control de AMT para control y manejo del embrague

Variable	Valor
Shifting Time	0.5 segundos
Clutch Disengagement Full	45 %
Zero-Load Start	28 %
Gear Change	50 %
Clutch Engagement Start	60 %
Zero-Load End	75 %

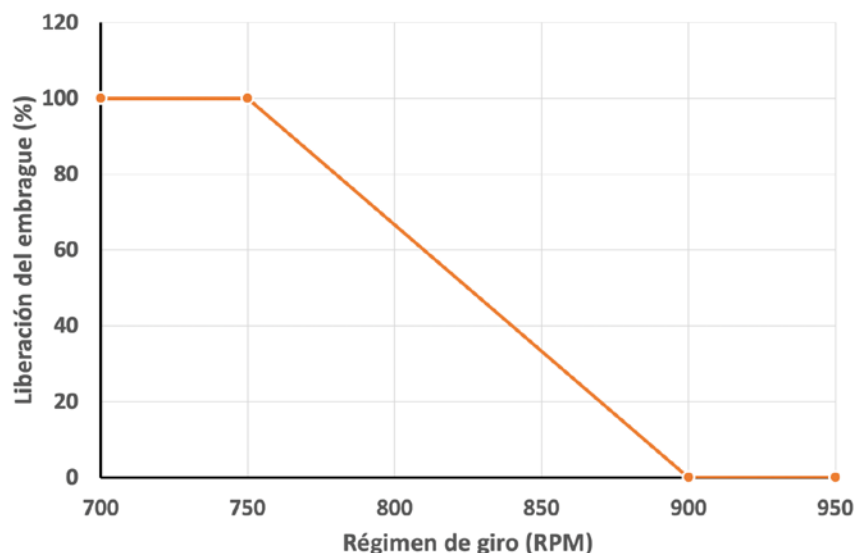


Fig. 5-2 Curva característica de funcionamiento del embrague – Control AMT

Finalmente, para las condiciones de comportamiento del conductor, dentro del software AVL CRUISE™ se selecciona el módulo Cockpit, siendo este módulo el de mayor importancia en el posterior estudio paramétrico de cambio de las condiciones ambientales, por cuanto es necesario que independiente de las variaciones anteriormente señaladas, el conductor efectúe el mismo comportamiento de conducción del vehículo en el recorrido propuesto.

Para proponer la mayor eficiencia en el proceso de cambio de marchas, con apoyo del controlador lógico Gear Box Control, dentro de su configuración inicial, se proponen condiciones de cambio automático (Automatic Shift Mode), con curvas de accionamiento del pedal del acelerador y del freno características según lo indicado en la Tabla 5-4.

Tabla 5-4 Variables de configuración inicial del Cockpit

Configuración	Variable	Valor
General Cockpit	Shift Mode	automatic
	Number of Gears	Forward: 5 Reverse: 1
	Maximun Brake Force	250 N
	Brake Light Switch Threshold	1 %
	Number of Retarder Steps	0
Acceleration Pedal Curve	Pedal Travel:	Load Signal:
	0% 100%	0% 100%

Brake Pedal Characteristic	Specific Brake Pedal Force:	Brake Pressure:
	0%	0 bar
	100%	180 bar

Si bien es cierto que esta configuración inicial general nos permite establecer un marco de referencia con respecto al comportamiento en la cabina de conducción, dentro de las condiciones de conducción (cycle run) se ingresan los valores del comportamiento del conductor, con respecto a otras variables de control (Tabla 5-5).

Tabla 5-5 Variables específicas del conductor dentro del cycle run

Variable	Valor
Maximum Brake Force	200 N
Brake Pedal at Standstill	50%
Starting	customerlike
Launch speed:	1200 RPM
Shifting Time	0.8 segundos
Acceleration Pedal Off	28%
Acceleration Pedal On	72%
Clutch Pedal On	45%
Clutch Pedal Off	60%
Gear Change	50%

5.2.2 Establecimiento de condiciones de conducción representativas

De forma paralela a la dificultad para establecer medios idóneos que representen correctamente el comportamiento del vehículo en diferentes configuraciones de condiciones ambientales (temperatura y presión atmosférica), se añade la dificultad para fijar medios comparativos dentro de las tres ciudades seleccionadas del Ecuador (Guayaquil (4 m.s.n.m. - 1.0128 bar_{patm}), Santa Isabel (1641 m.s.n.m. - 0.9332 bar_{patm}), y Ambato (2500 m.s.n.m. - 0.8132 bar_{patm}), debido en gran parte a la orografía de cada región, tal como se expresó en el apartado 3.2.

Es así que, tomando en cuenta la participación tanto del Centro de Desarrollo Carrocero de Tungurahua, así como el departamento de estudio de contaminación ambiental del GADMA Ciudad de Ambato, quienes hicieron factible el estudio in situ de una unidad tipo de transporte de pasajeros, con registro de velocidades, ubicación y tiempo recorrido

mediante medidores GPS, se ha decidido establecer unas condiciones de conducción representativas, bajo estas condiciones:

- Registrar el recorrido más extenso que se utilice en la ciudad para el transporte de pasajeros, mediante dispositivo GPS.
- Diferenciar este registro en sus dos partes correspondientes (ida y vuelta) con sus diferencias en altitud, y perfil de velocidad.
- Realizar la medición en un horario de funcionamiento intermedio, en condiciones promedio de velocidad y utilización de la unidad, considerando que en las ciudades del Ecuador no se hace uso de paradas establecidas de transporte, y la hora punta contiene muchos tiempos de parada que dificultarían el proceso de estimación y simulación.
- Realizar una comparación previa con recorridos tipo de flotas de vehículos de transporte de pasajeros de otras ciudades, tanto en grado de inclinación, porcentaje de recorrido urbano, perfil y limitaciones de velocidad, así como de consenso de comportamiento de conductores tipo.

De esta manera, para la estandarización de un recorrido tipo que pueda ser utilizado en todas las condiciones ambientales de las ciudades seleccionadas, se ha escogido un perfil real de conducción de la unidad Jerpazsol que recorre la ciudad de Ambato de norte a sur, partiendo desde el sector de Huachi El Belén hasta El Pisque, tanto en su recorrido de ida y vuelta, en conjunto con su perfil de velocidad, como se puede verificar en la Fig. 5-3 y Fig. 5-4.

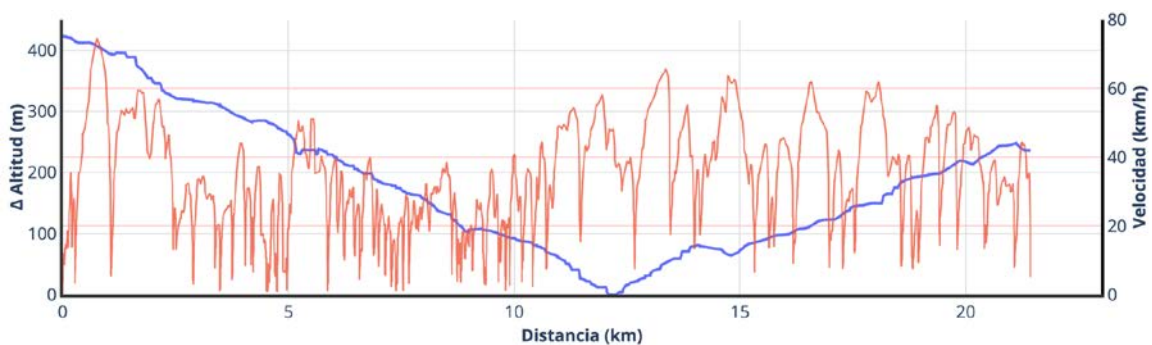


Fig. 5-3 Perfil de Velocidad y Altitud – Recorrido Estándar Ida

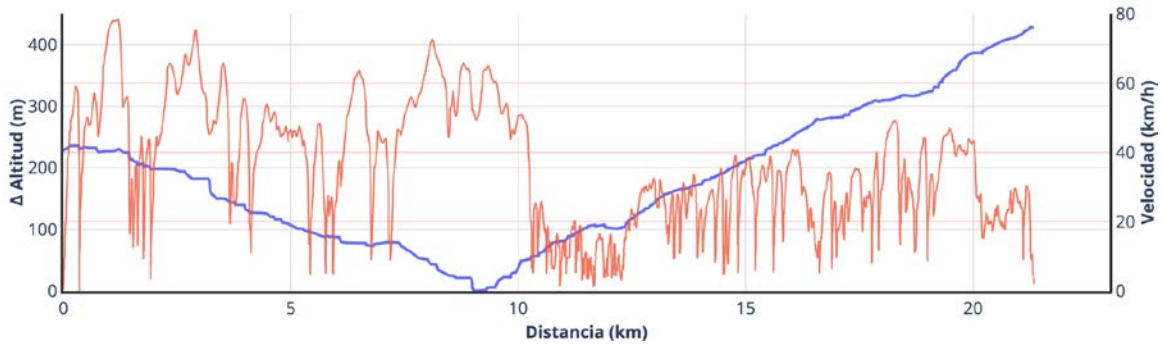


Fig. 5-4 Perfil de Velocidad y Altitud – Recorrido Estándar Vuelta

La diferencia entre el recorrido estándar de ida, con respecto al recorrido de vuelta en perfil de velocidad, principalmente en la zona central (distancia entre 10 – 15 km), se debe a regulaciones del transporte público en la mayoría de ciudades del Ecuador, donde por normativa de control de tráfico se establecen rutas circulares con acceso a la zona central solamente en uno de sus recorridos, en este caso en el recorrido de vuelta. Esta razón establece que la velocidad media durante este tramo no supere los 20 km/h. A continuación, en la Tabla 5-6 se indican otros datos característicos sobre el recorrido estándar de ida y vuelta.

Tabla 5-6 Datos característicos de recorrido estándar (ida y vuelta)

Variable	Recorrido ida	Recorrido vuelta
Distancia media	21.43 km	21.34 km
Tiempo de recorrido	49.31 min	51.43 min
Velocidad Media	26.92 km/h	26.17 km/h
Velocidad Máxima (distancia)	74.71 km/h (distancia = 2.88 km)	78.28 km/h (distancia = 2.70 km)
Fases de conducción	Aceleración: 61.60% Vel. Cte.: 1.70% Frenado: 36.70%	Aceleración: 59.34% Vel. Cte.: 1.54% Frenado: 39.12%
Aceleración media	0.04 m/s² (con desaceleraciones) 0.34 m/s² (sin desaceleraciones)	0.04 m/s² (con desaceleraciones) 0.35 m/s² (sin desaceleraciones)
Perfil de la carretera	Ascenso: 28.37% Horizontal: 30.21% Descenso: 41.41%	Ascenso: 46.36% Horizontal: 32.62% Descenso: 21.00%
Tipo de recorrido	Urbano: 83.47% Rural: 13.32% Autopista: 3.21%	Urbano: 88.21% Rural: 8.04% Autopista: 3.75%

5.2.3 Configuración del ciclo de conducción Cycle Run

Una vez especificadas las unidades lógicas de control, y propuesto el perfil de velocidad y altitud estándar para todos ambos recorridos a ser analizados en las tres ciudades seleccionadas, se requiere establecer una configuración del ciclo de conducción Cycle Run con respecto a una serie de valores iniciales requeridos para poder desarrollar el estudio paramétrico de variación de las condiciones ambientales.

En primer lugar, tenemos todos los factores que influyen en el recorrido (Course), siendo aquí donde se introducirían los datos de temperatura ambiente, densidad del aire o presión atmosférica, altitud, velocidad del viento, variación de coeficientes de fricción, límites de velocidad específicos, y medios de control predictivo de tipo crucero. En la presente investigación no se incluyen los valores de variación de coeficientes de fricción, ya que consideramos una uniformidad en el material del que está compuesto la carretera, ni se toman en cuenta valores de velocidad del viento, por su alta variabilidad entre cada una de las ciudades.

Debido a la necesidad de que el vehículo recorra en cualquiera de los casos expuestos el perfil de velocidad y altitud presentado, se utiliza el método de cálculo Quasi-Stationary S en el que, tal como se indica en (AVL List GmbH, 2017) y en (Varga et al., 2016), las variables características deseadas del modelo del vehículo son computadas gradualmente para cada velocidad, con la singularización de que la aceleración está determinada de manera exacta a través del cálculo del modelo de aceleración a partir del perfil de conducción (con base a las condiciones de comportamiento del conductor).

Otros valores de configuración requeridos dentro del modelo de simulación se presentan en la Tabla 5-7.

Tabla 5-7 Variables de configuración de Cycle Run con método de cálculo Quasi-Stationary

Variable	Valor
Driving Resistance	physical
Cornering	Without cornering
Slip	Without slip
Starting from rest	Customer Like
Gear Selection Strategy	According to Speed

Tiptronic	No
Kickdown	No
Gear Box Strategy	Gear Box Control
Start Configuration	Hot Start - steady state
Load State	Roadway: Full
Trailer	Empty
Weighting Factors	Deactivated

5.2.4 Integración de las curvas características del motor de AVL BOOST™ en el modelo del vehículo AVL CRUISE™

De forma similar a las tres secciones anteriormente señaladas, donde se busca una estandarización de cualidades y configuraciones en miras de conseguir la reproducción exacta del mismo perfil de altitud, velocidad, régimen de giro, y de comportamiento del conductor en relación al cambio de marchas, frenado, entre otros, en el caso del diseño y esquematización del proceso de simulación se busca una metodología que garantice, por un lado la correcta relación causa – efecto de la variación de las condiciones ambientales con el proceso de estimación dentro de un recorrido, y por otro lado que sirva de conexión entre los resultados obtenidos en el estudio paramétrico en AVL BOOST™ (Capítulo 4, secciones 4.1 y 4.2).

Centrándose en el primer punto anteriormente mencionado, todo el proceso de unificación se basa en la información de entrada sobre mapas de prestación, consumo de combustible y emisiones de gases contaminantes en el módulo del motor dentro del software AVL CRUISE™. De esta forma, las propiedades del modelo de simulación para el módulo motor tienen los siguientes valores seleccionados:

Tabla 5-8 Propiedades del módulo motor ADE360N en AVL CRUISE™

Propiedad	Valor
Intended for Calculation of:	Performance, Consumption & Emission
Consumption Model	Enrichment by Increasing Friction Mean Pressure
Friction Model	Standard
Consumption/Emission at Idle	From Overall Map

Motoring Curve Consumption / Emission	Determine from Consumption Map
Full Load Reduction	Off
Control Variable	Load Signal
Exhaust System Model	Standar Exhaust System Model

Para la conexión entre los valores obtenidos en el estudio paramétrico previamente realizado en AVL BOOST™, con el modelo de simulación en AVL CRUISE™ es primordial conformar un diagrama de procesos que pueda ser aplicado en cada uno de los casos específicos de temperatura y presión atmosférica.

A continuación se presenta esta esquematización centrándose, por un lado, en la utilización de una única curva característica de potencia a carga completa (curva de homologación - Fig. 3-3, Tabla 3-5) y, por otro lado, en la conformación de un conjunto de mapas característicos de consumo, y emisiones dentro de AVL BOOST™, con valores relacionados entre el régimen de giro del motor (RPM), la presión media efectiva (BMEP) y el volumen consumido o emitido (l/h) según corresponda el caso.

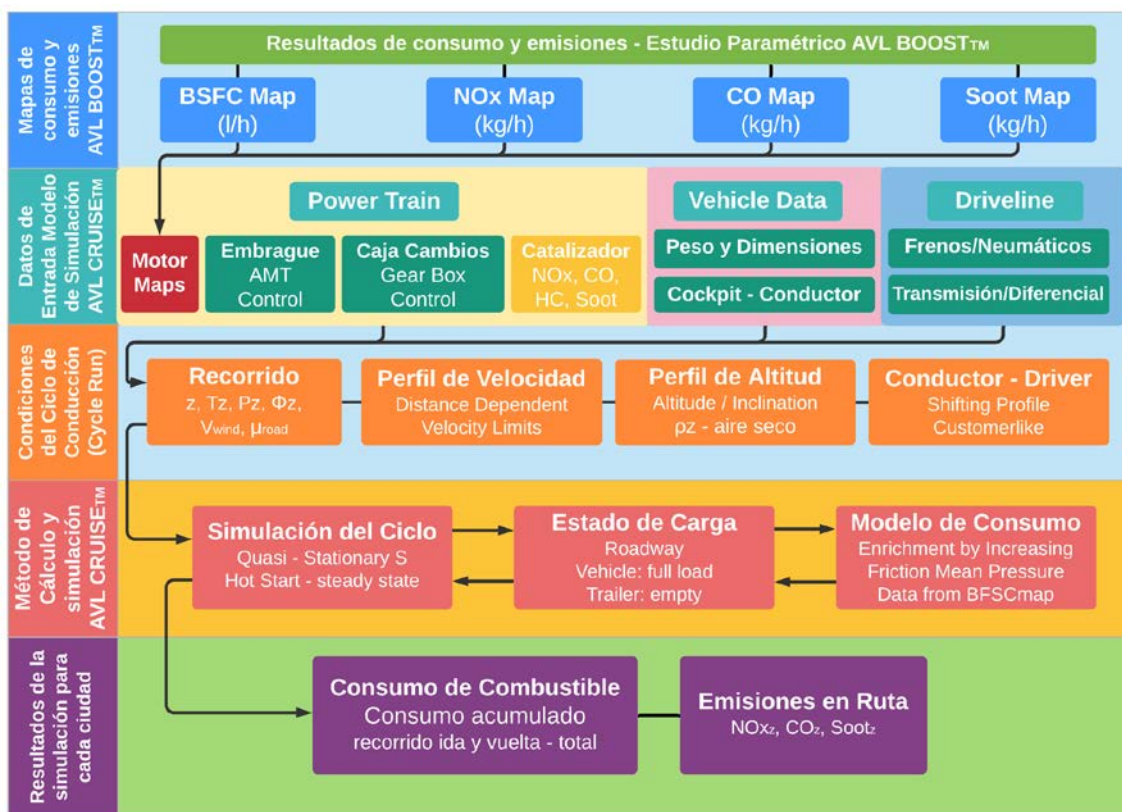


Fig. 5-5 Diagrama de procesos de simulación con AVL CRUISE™ para las condiciones características de cada ciudad seleccionada

Como se puede ver en el primer apartado de la Fig. 5-5, sobre mapas de consumo y emisiones en AVL BOOST™, a partir del diagrama de procesos para cada variable por separado (Fig. 4-1), con los resultados relacionado al estudio paramétrico indicado en el Capítulo 4, se conformarían una serie de mapas específicos (BSFC, NOx, CO y Soot) que permitirían ejemplificar correctamente cada uno de estos casos paramétricos, ahora desde una perspectiva de estimación en condiciones de conducción en ruta reales.

5.3. Conformación de mapas característicos del motor para distintas altitudes.

El análisis de prestaciones, consumo de combustible y emisiones de gases contaminantes (NOx, CO, Soot), dentro del software AVL CRUISE™, se realiza en base a una serie de mapas característicos, cuyos valores relacionados al régimen de giro (RPM), presión media efectiva (BMEP) y consumo/emisión (medidos en l/h o kg/h respectivamente), son ingresados en el módulo motor, dentro de la sección de Power Train. A continuación, se exponen el método de simulación con sus valores de entrada (Sección 5.3.1), así como los resultados obtenidos (Sección 5.3.2) a partir de los cuales se generan estos mapas.

5.3.1. Variables de entrada para distintas condiciones de temperatura y presión atmosférica

Tomando en cuenta que, a través de AVL BOOST™ se ingresaron los valores constructivos reales del motor provistos por el fabricante, entonces es requerido en este punto de la investigación establecer la conformación de estos mapas característicos para las diferentes condiciones de temperatura, y presión atmosférica, a las altitudes de cada una de las ciudades seleccionadas (Guayaquil (4 m.s.n.m. - 1.0128 bar_{Patm}), Santa Isabel (1641 m.s.n.m. - 0.9332 bar_{Patm}), y Ambato (2500 m.s.n.m. - 0.8132 bar_{Patm})). Para el cálculo de los valores que conforman cada uno de los mapas se utilizan varias de las fórmulas explicadas en el Capítulo 2, sección 2.2.

En términos generales, la conformación de mapas característicos se establece mediante estimación del consumo o emisiones (en l/h o kg/h respectivamente), con respecto a un rango de crecimiento de la presión media efectiva BMEP en un mismo régimen de giro, concretando este mismo análisis para varios regímenes de giro (Fig. 5-6), con lo cual por

medio de cálculos de interpolación y extrapolación, el software puede especificar en qué punto de cada mapa se encuentra el vehículo dentro del recorrido.

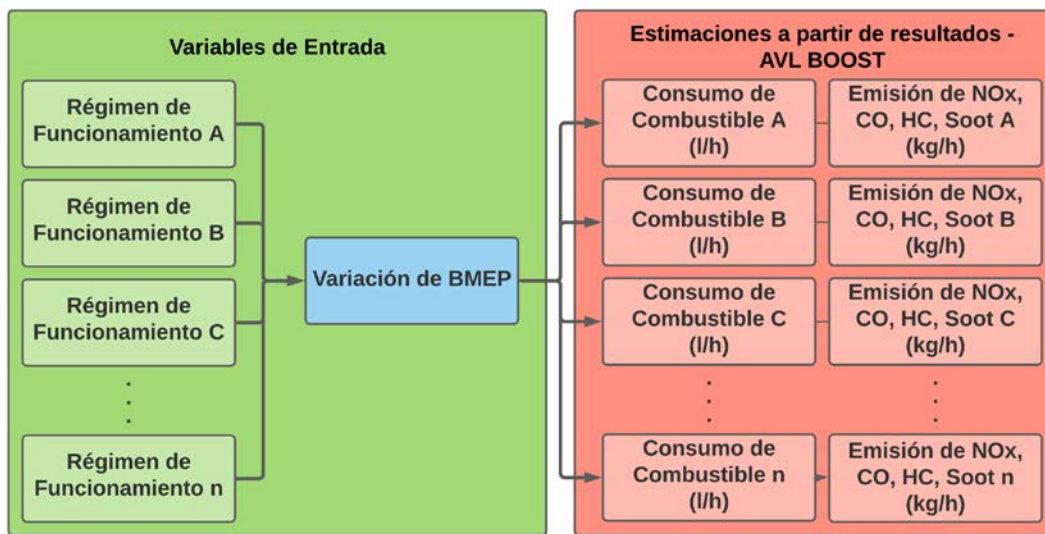


Fig. 5-6 Variables de entrada generales y estimaciones de salida de los mapas característicos desarrollados con AVL BOOST™

Ahora bien, como se parametrizó en los apartados 4.1.1 y 4.2.1, de afección de la presión media efectiva BMEP, según la variación de la temperatura y la presión atmosférica respectivamente, este valor sufre un cambio sobre todo con respecto a la segunda variabilidad expuesta. De esta forma, dentro de la Fig. 5-6, el apartado de variación de BMEP no sería constante en todos los casos, sino que mantendría una variación con respecto a las condiciones ambientales de referencia.

En este mismo contexto, la variación de BMEP debe mantener un rango amplio que considere en gran medida todos los puntos donde el dosado relativo indica condiciones operativas por debajo de un hipotético límite de formación de humos para motores diésel (MEC), tal como lo apunta (Lecuona Neumann & Rodríguez Aumente, 2014), que en el caso de las características del motor ADE360N estaría en rangos de dosado relativo por debajo de 0.8 (Fig. 5-7).

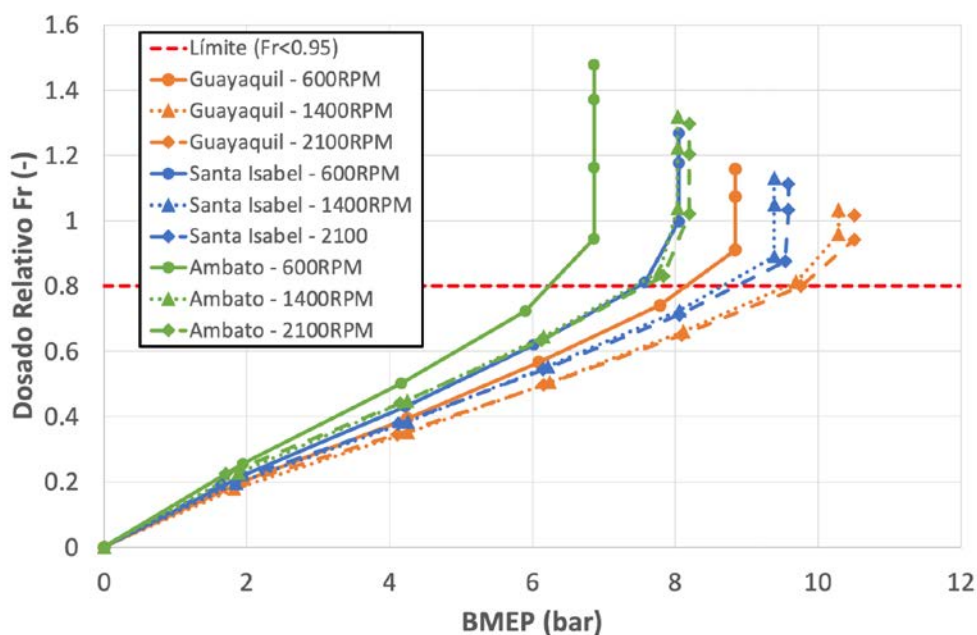


Fig. 5-7 Relación de BMEP con respecto al dosado relativo para el motor ADE360N a 0°C y el límite máximo de generación de humos

Como se puede ver en la Fig. 5-7, el comportamiento de la variación de BMEP, con respecto a la variación del dosado, en este caso presentado en forma de dosado relativo, sigue una tendencia similar en todos los regímenes de giro, a diferentes altitudes, para una misma temperatura, siempre y cuando se mantenga un dosado relativo menor que 0.80, punto a partir de la cual las tendencias tienen un claro cambio en su comportamiento, por lo que los valores de dosado correspondientes a estos puntos no se considerarían como datos de entrada al modelo.

A partir de estos resultados iniciales, considerando la Ec. (3-5) para la estimación del dosado absoluto, con respecto a una presión media efectiva de referencia (en este caso el rango de variación de BMEP en el punto inicial), con participación de la densidad del aire seco (función de la altitud), el rendimiento volumétrico (función de la variación de temperatura – Ec. (3-3)), el rendimiento efectivo ($\eta_e = \text{cte.}$ - Fig. 3-5) y el poder calorífico del combustible H_C , en un rango determinado de régimen de giro, entonces es posible la estimación de las tasas de consumo de combustible (l/h) de forma indirecta (a través de Ec. (5-1), con respecto a las estimaciones de BSFC y potencia, conociendo el valor de la densidad del diésel aplicado), así como de emisión de NOx, CO, y Soot (kg/h), como resultados directos del modelo en AVL BOOST™, para un punto n dentro del ciclo de funcionamiento del motor.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{f_n} &= BSFC_n \cdot N_{e_n} \\ \dot{V}_{f_n} &= \frac{\dot{m}_{f_n}}{\rho_{diesel}} \end{aligned} \quad (5-1)$$

Finalmente, aunque su influencia es menor en este ciclo, resulta conveniente conceptuar las condiciones en las cuales el motor diésel ADE360N se encuentre en un estado reducción de velocidad, o en proceso de frenado mecánico. En estos casos, la presión media efectiva tendría valores instantáneos negativos (contrafuerzas), los mismos que teóricamente no podrían calcularse, por lo que se mantienen como válidos en estos casos los indicados en los diagramas por defecto para AVL CRUISE™.

5.3.2. Mapas característicos de consumo de combustible y emisiones de NOx, CO y Soot del motor para distintas altitudes

Como resultado del método propuesto en el capítulo anterior, se han conformado una serie de mapas característicos que representan la variación de las condiciones ambientales, para las tres ciudades seleccionadas. Se considera este proceso intermedio como el vínculo del análisis paramétrico obtenido en AVL BOOST™ con respecto al próximo estudio de emisiones en condiciones de conducción reales, desarrollado en AVL CRUISE™ (primera fila Fig. 5-5).

En el caso de la tasa de consumo de combustible \dot{V}_f (Diesel Volume Flow), medido en l/h, se comprueba que la influencia de la variación de la presión atmosférica es mucho más influyente que el cambio de la temperatura. Por ejemplo, entre Guayaquil ($1.0128 \text{ bar}_{patm}$) y Ambato ($0.8132 \text{ bar}_{patm}$), se observa un incremento del 6.74% en relación a una BMEP obtenida de 8.11 bar (1400 RPM, $T = 20^\circ\text{C}$), mientras que, si solamente en la primera ciudad pasamos de 0°C a 40°C , en el mismo régimen de giro, obtenemos un 5.30% de incremento para el mismo BMEP. Todos los valores de \dot{V}_f estimados, para cinco regímenes de giro, para tres temperaturas distintas, se presentan en la Fig. 5-8.

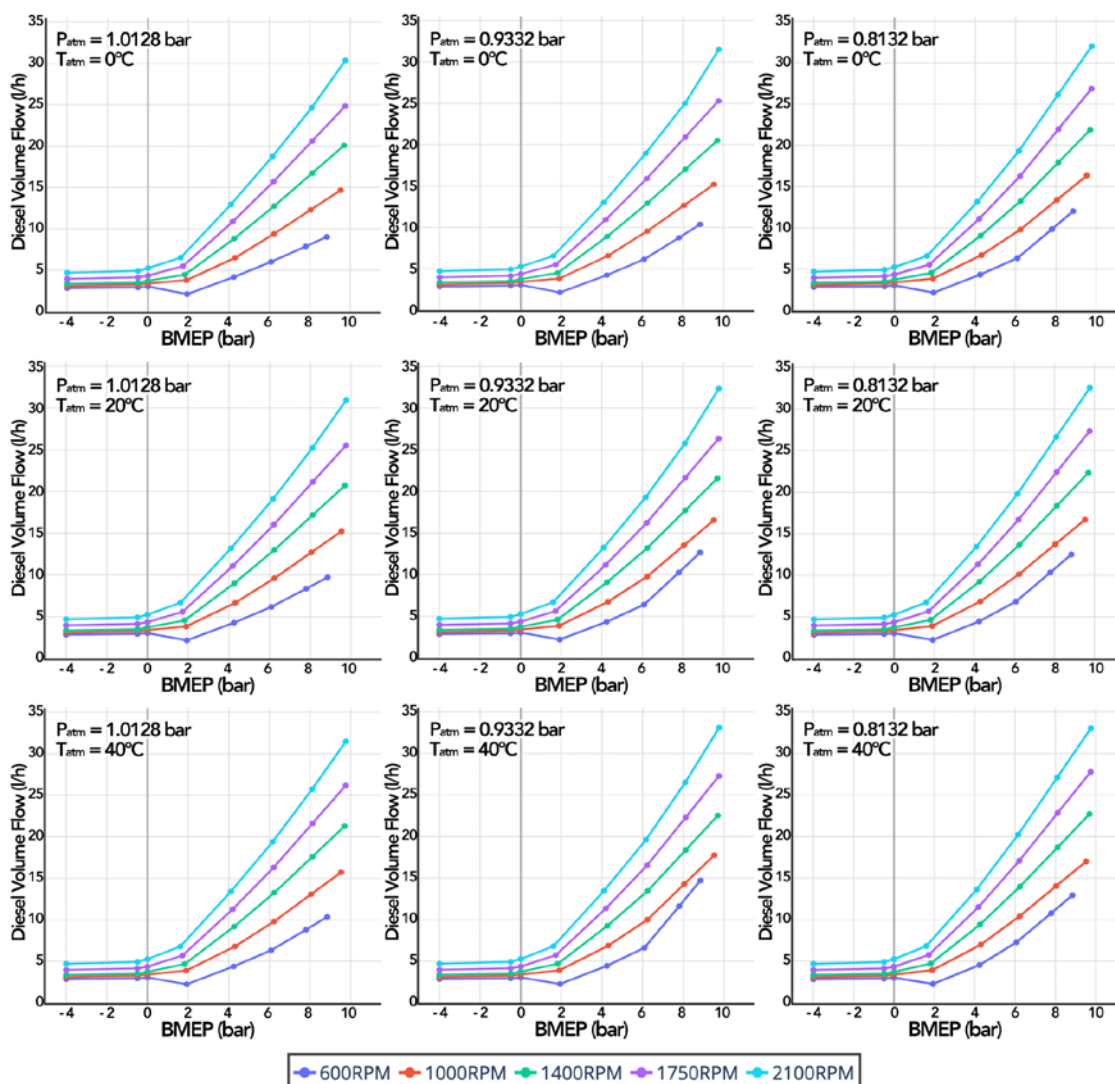


Fig. 5-8 Mapas característicos de \dot{V}_f , para las tres ciudades seleccionadas, a diferentes regímenes de giro, a temperaturas de 0°C, 20°C y 40°C

Como se verifica en la Fig. 5-8, existe una alta dependencia de la tasa de consumo de combustible con respecto al régimen de giro, ya que a regímenes bajos de funcionamiento el efecto de variación de las condiciones ambientales es mucho más influyente, disminuyendo ligeramente a medida que este régimen de funcionamiento aumenta. Ejemplificando este fenómeno, si comparamos la estimación entre Guayaquil (1.0128 bar_{atm}) y Ambato (0.8132 bar_{atm}), a 20°C, se observa un incremento del 5.47% a 1000 RPM, 4.76% a 1400 RPM, 4.18% a 1750 RPM y un 3.74% a 2100 RPM.

Los mapas de flujo másico de NOx, relacionados a la BMEP obtenida por el motor (Fig. 5-9), muestran unas tendencias diferentes a las expuestas para la tasa de consumo de combustible. Es así que, por ejemplo, si cotejamos los valores estimados, entre Guayaquil (1.0128 bar_{atm}) y Ambato (0.8132 bar_{atm}), se observa un descenso del -10.26% en

relación a una BMEP = 6.24 bar (1400 RPM, T = 20°C), mientras que, si pasamos de 0°C a 40°C en la última ciudad, en el mismo régimen de giro, obtenemos un incremento del 3.38% para el mismo BMEP.

Se comprueba así, en alto porcentaje de las tendencias obtenidas en los mapas característicos de NO_x, las relaciones de formación de este contaminante con respecto a la variación de las condiciones ambientales representadas en el estudio paramétrico del Capítulo 4, donde a una mayor temperatura la tasa de emisión incrementaba, así como, de forma análoga, se observaba un incremento de emisión a una mayor presión atmosférica.

Las líneas de tendencias tienen un claro cambio a medida que el dosado relativo alcanza, de forma teórica, valores cercanos al dosado estequiométrico (Fig. 5-7), sobre todo en el caso de las estimaciones para la ciudad de Ambato, en donde o bien su pendiente de crecimiento es menos pronunciada (altos regímenes de giro), o bien mantienen una tasa de emisión aproximadamente constante (regímenes de giro medios y bajos). Cabe recordar que, los motores diésel siempre funcionan en dosados relativos pobres, como medida para evitar la formación de humos negros, lograr una alta eficiencia en el ciclo, así como bajar la toxicidad de los gases de escape.

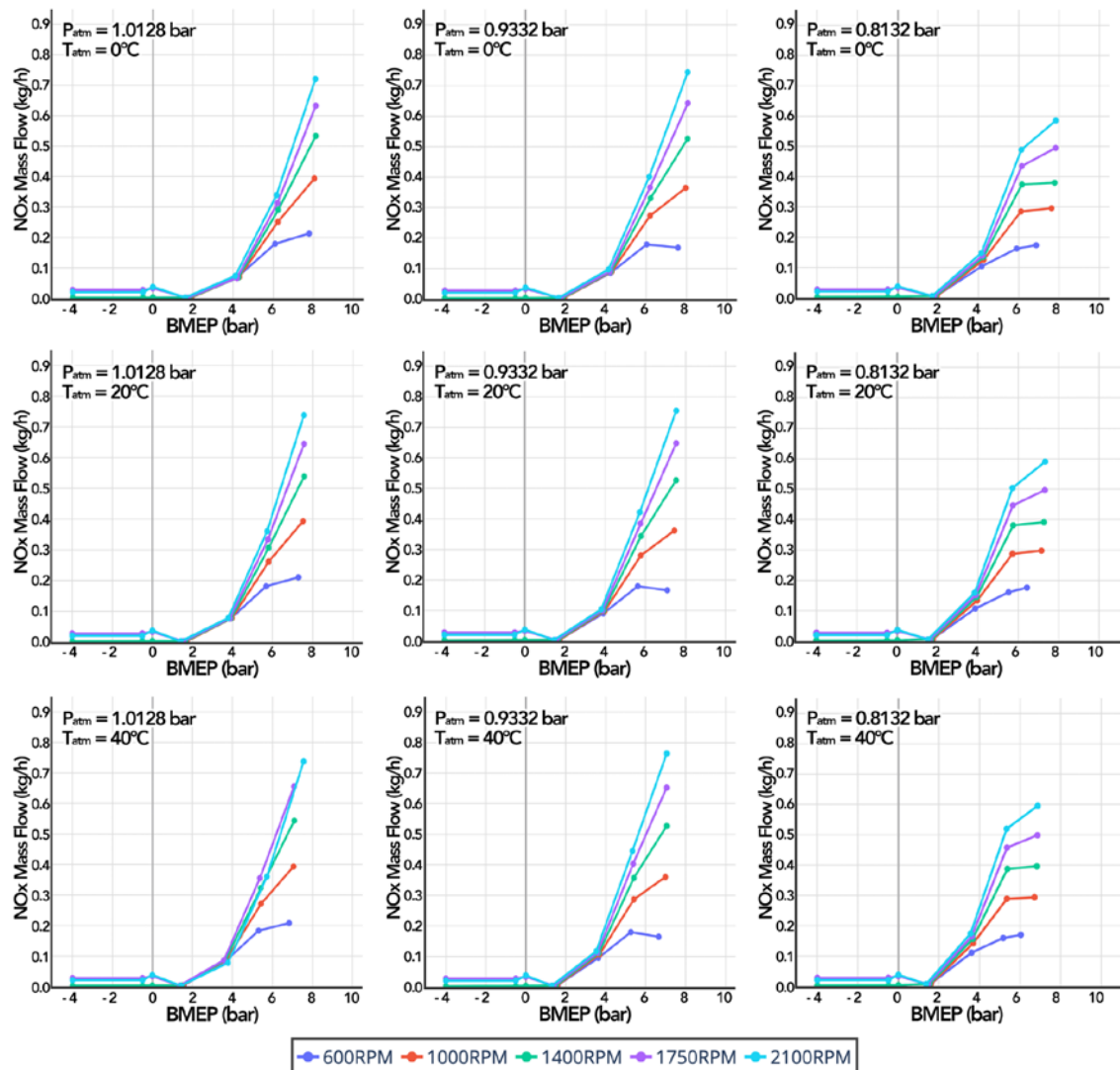


Fig. 5-9 Mapas característicos de NOx, para las tres ciudades seleccionadas, a diferentes regímenes de giro, a temperaturas de 0°C, 20°C y 40°C

En el caso de la emisión de CO, cabe recordar que, como se indicó en el apartado 4.1.4 y 4.2.4 sobre los efectos de la variación de la temperatura y la presión atmosférica en la emisión de CO respectivamente, ambos estudios paramétricos presentaban varios grados de fluctuación, donde se divisa un crecimiento con tendencias más claras de CO al aumentar la temperatura (Fig. 4-8) y, de forma menos estable un descenso de la emisión con respecto a una mayor presión atmosférica (Fig. 4-18). Estos grados de fluctuación, en los resultados del modelo, hacen que su utilización para la conformación de mapas característicos de CO fuera únicamente representativa en el caso de la variación de la temperatura, más no en el caso de la presión atmosférica.

La premisa anteriormente propuesta sería corroborada a partir de la Ec. (4-6), donde se puede visualizar que el valor del coeficiente utilizado en la relación de la presión

atmosférica, con respecto a la presión atmosférica de referencia, tiene el menor grado de participación dentro de todas las correlaciones estadísticas analizadas ($b = -0.06$), lo que indicaría la necesidad de ajustes de tratamiento de datos a ser considerados en próximas investigaciones.

Tomando en cuenta este marco inicial, en Fig. 5-10, se presentan los mapas característicos de CO, para las tres ciudades seleccionadas, a tres grados de temperatura (baja, media y alta).

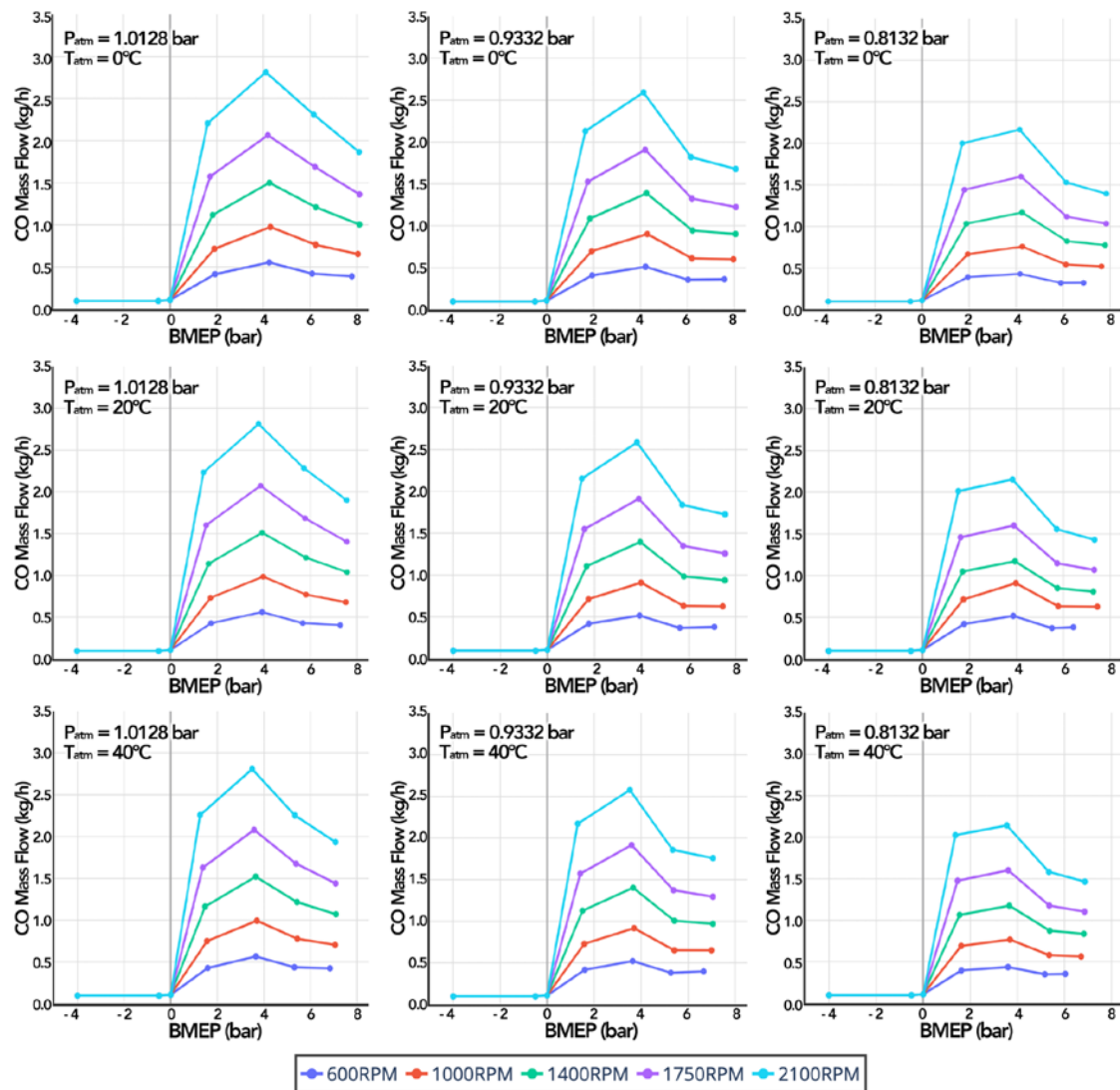


Fig. 5-10 Mapas característicos de CO, para las tres ciudades seleccionadas, a diferentes regímenes de giro, a temperaturas de 0°C, 20°C y 40°C

Como se observa en Fig. 5-10, la formación de CO tiene una dependencia importante con respecto al régimen de funcionamiento del motor donde, por ejemplo, a una BMEP = 4 bar, a $T = 20^{\circ}\text{C}$, tenemos un incremento del 187.43% si comparamos los resultados a 1000RPM y 2100RPM.

Otro punto importante a recalcar es el pico máximo de generación de CO obtenido para este motor, aproximadamente a BMEP = 4 bar, posterior a lo cual la conformación de CO sufre una disminución importante, debido principalmente a que superior a este valor de BMEP, el motor ADE360N no estaría trabajando en áreas con condiciones de funcionamiento adecuadas, considerando siempre que la formación de CO está ligada principalmente al dosado.

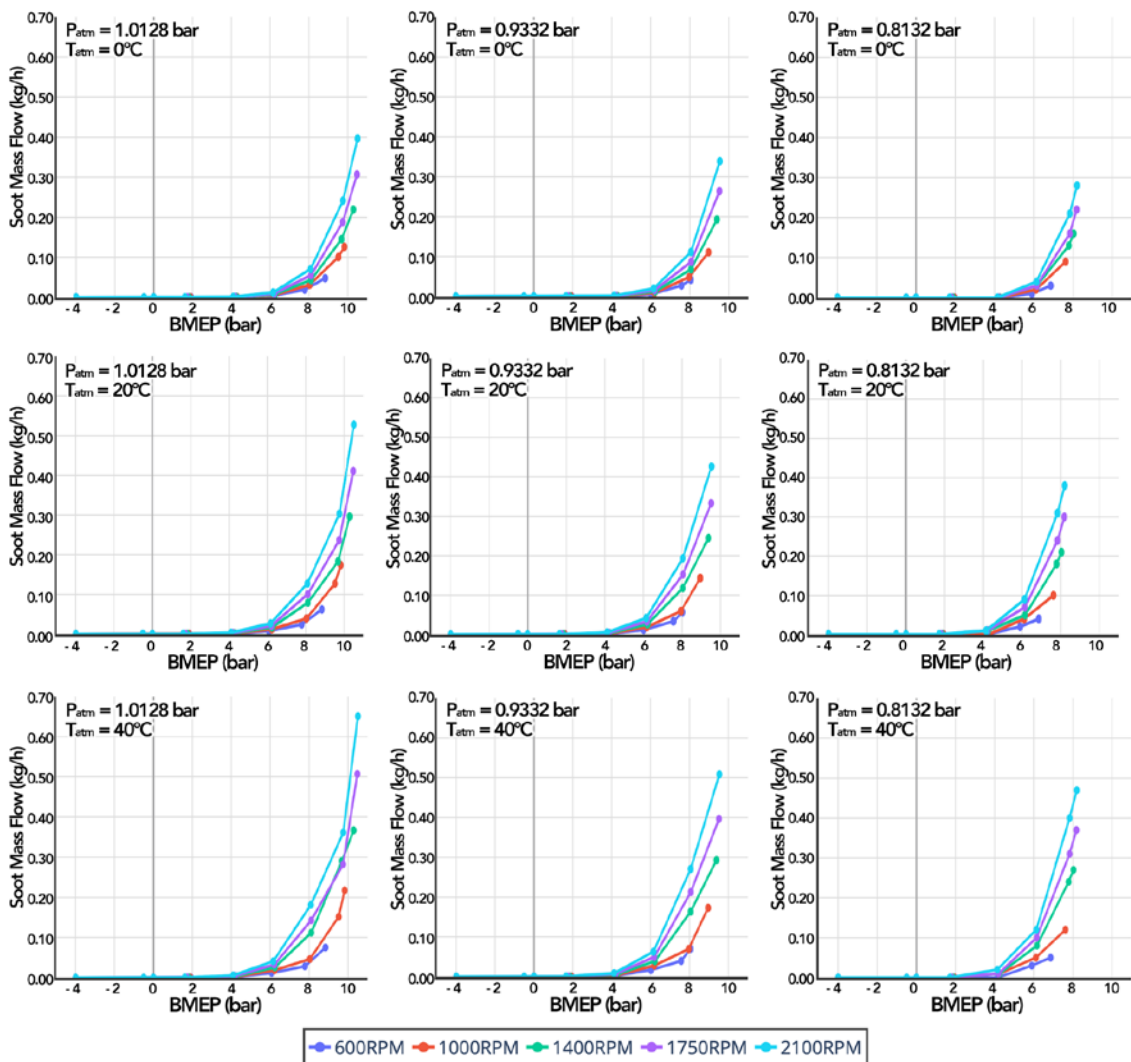


Fig. 5-11 Mapas característicos de Soot, para las tres ciudades seleccionadas, a diferentes regímenes de giro, a temperaturas de 0°C , 20°C y 40°C

Para finalizar, en cuestión del conjunto de mapas característicos obtenidos para la emisión de Soot, en relación a la variación de la BMEP, se evidencia una clara influencia de la temperatura sobre su tasa de generación (Fig. 5-11). Es así que, por ejemplo, para Guayaquil ($1.0128 \text{ bar}_{\text{atm}}$), a un régimen medio de 1400RPM, con una BMEP = 8.11 bar, a una $T = 20^{\circ}\text{C}$ la emisión se incrementa en un 80.14%, y a $T = 40^{\circ}\text{C}$ se evidencia tal crecimiento en un 155.19% con respecto a la medida estimada a 0°C . Estas tendencias positivas son menos pronunciadas en ciudades con una mayor altitud, ya que como se puede ver en la misma Fig. 5-11, si consideramos condiciones de régimen y de variación de BMEP similares, a una $T = 20^{\circ}\text{C}$ se observa un aumento en un 45.74%, mientras que a $T = 40^{\circ}\text{C}$ este incremento no supera el 87.87%.

Examinando complementariamente el fenómeno, ahora desde una variación de la presión atmosférica, se visibiliza claramente este efecto de aumento sobre la emisión, en concordancia con lo expuesto en el estudio paramétrico previo. Es así que, por ejemplo, si comparamos los valores de Guayaquil ($1.0128 \text{ bar}_{\text{atm}}$) a regímenes de funcionamiento medios altos, con respecto a los medidos con las otras dos ciudades, podemos denotar que, a 1400 RPM, para una BMEP entre 8.03 bar y 8.11 bar, a $T = 0^{\circ}\text{C}$, un incremento del 55.57% para Santa Isabel ($0.9332 \text{ bar}_{\text{atm}}$), y un 253.63% para Ambato ($0.8132 \text{ bar}_{\text{atm}}$). De los resultados obtenidos hay que subrayar, que a medida que la temperatura aumenta el efecto de la variación atmosférica es menor donde, si tomamos en cuenta el caso anterior, a 1400RPM, para una BMEP entre 8.03 bar y 8.11 bar, a $T = 40^{\circ}\text{C}$, ahora el incremento es de 46.12% para Santa Isabel ($0.9332 \text{ bar}_{\text{atm}}$), y un 137.47% para Ambato ($0.8132 \text{ bar}_{\text{atm}}$).

CAPÍTULO 6

Resultados de las condiciones de funcionamiento del vehículo BUSSCAR Bus 340 – Mercedes Benz MB OF-1722

6.	Resultados de las condiciones de funcionamiento del vehículo BUSSCAR Bus 340 – Mercedes Benz MB OF-1722.....	148
6.1.	Descripción de las condiciones de funcionamiento reales utilizadas en la simulación	148
6.2.	Variación de la temperatura ambiente para cada altitud	150
6.2.1.	Efecto sobre BMEP	150
6.2.2.	Efecto sobre el consumo de combustible	153
6.2.3.	Efecto sobre la emisión de NOx.....	157
6.2.4.	Efecto sobre la emisión de CO	159
6.2.5.	Efecto sobre la emisión de Soot	162
6.3.	Variación de la presión ambiente para cada altitud	164
6.3.1.	Efecto sobre BMEP	165
6.3.2.	Efecto sobre el consumo de combustible	167
6.3.3.	Efecto sobre la emisión de NOx.....	170
6.3.4.	Efecto sobre la emisión de Soot	173

6. Resultados de las condiciones de funcionamiento del vehículo BUSSCAR Bus 340 – Mercedes Benz MB OF-1722

6.1. Descripción de las condiciones de funcionamiento reales utilizadas en la simulación

De modo idéntico que con el estudio paramétrico sobre el funcionamiento del motor diésel ADE 360N (Cap. 4), y habiendo establecido una metodología de análisis que considere sus resultados para la conformación de mapas característicos en condiciones de variación de las condiciones ambientales (Cap. 5), es el momento adecuado para examinar, mediante análisis paramétrico, los efectos del aumento o disminución, tanto del perfil de temperatura ambiental y de la presión atmosférica, en esta ocasión del vehículo BUSSCAR Bus 340 – Mercedes Benz MB OF-1722, de acuerdo a perfiles de velocidad e inclinación (altitud) reales.

Se toman en cuenta los mismos dos niveles de análisis acatados en el estudio paramétrico del motor ADE 360N, los que indican que, en primer lugar, se desarrolla un estudio comparativo de características regionales mediante el cual se estiman las prestaciones del motor, el consumo de combustible y emisiones en condiciones de referencia, para posteriormente realizar una caracterización local del fenómeno.

Como se puede observar en la Fig. 6-1, en el primer nivel, la presión atmosférica desciende de 1012.8 hPa (Guayaquil) a 813.2 hPa (Ambato), mientras que se analiza en tres valores de temperatura (0°C, 20°C y 40°C). En un segundo nivel, sobre los valores de referencia, se establece el estudio paramétrico a nivel local, donde se modifican las condiciones de presión atmosférica en situaciones de anticiclón (aumento local de presión $P = P_{ref} + 2kPa$) y borrasca (reducción local de presión $P = P_{ref} - 2kPa$), a un solo valor de temperatura (20°C). El estudio de influencia de la humedad relativa no se considera, por cuanto en el primer estudio paramétrico realizado sobre el motor se verificó una influencia de este parámetro prácticamente despreciable, por lo que todo el estudio paramétrico se realiza en condiciones de aire seco.

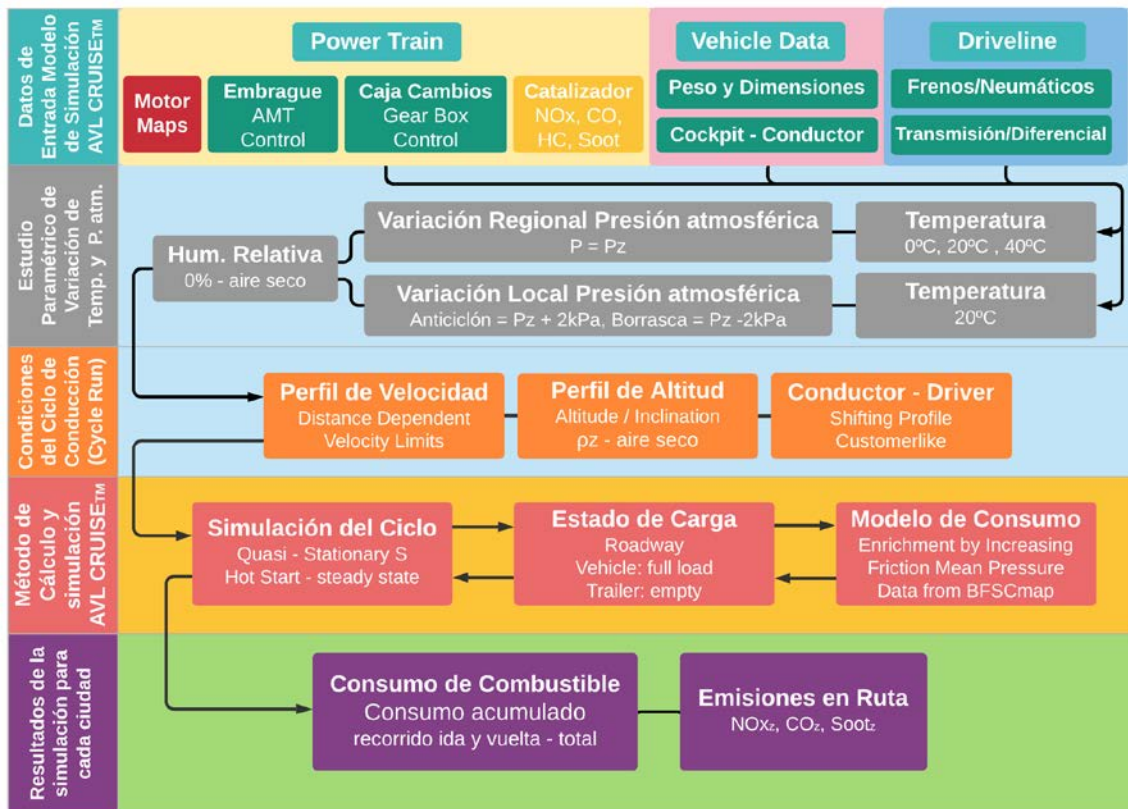


Fig. 6-1 Diagrama de procesos de simulación en AVL CRUISE™ para el estudio paramétrico de cada variable ambiental por separado.

Es primordial inicialmente verificar que, de todo el conjunto de resultados obtenidos en los recorridos de ida y vuelta, los perfiles de velocidad deseados sean los mismos que los perfiles de velocidad alcanzados en los procesos de simulación, con base a que el conductor debería mantener la premisa de un mismo comportamiento, independiente de la variación de las condiciones ambientales, como se puede observar en las Fig. 6-2 y Fig. 6-3.

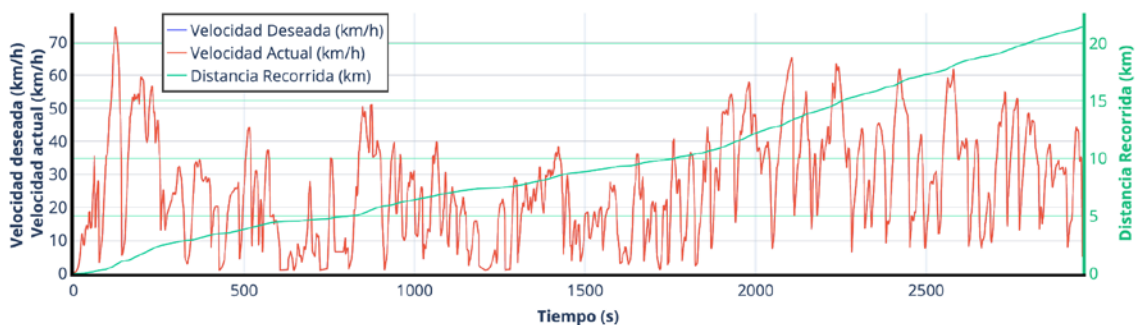


Fig. 6-2 Perfil de velocidad deseado, perfil de velocidad conseguido y distancia recorrida en el tramo de ida

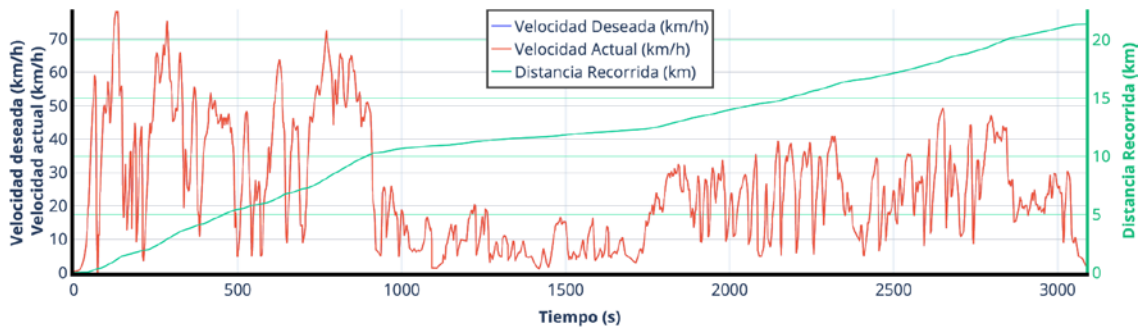


Fig. 6-3 Perfil de velocidad deseado, perfil de velocidad conseguido y distancia recorrida en el tramo de vuelta.

6.2. Variación de la temperatura ambiente para cada altitud

En esta primera parte del estudio paramétrico de influencia de la variación de las condiciones ambientales (temperatura y presión atmosférica), como se indicó anteriormente, se evalúan las prestaciones, consumo de combustible y emisiones en un rango de variación predeterminado que, en concordancia con el primer estudio paramétrico de funcionamiento del motor ADE360N, se mantienen solo los valores de 0°C, 20°C y 40°C, como mínimas, medias y máximas temperaturas registradas en el Anuario Meteorológico del Ecuador, todo para condiciones de conducción real.

Es importante recordar que, si bien es cierto los valores de temperatura ingresados como datos de entrada son aceptables, en muchos de los casos las ciudades seleccionadas, en su registro histórico en raras ocasiones alcanzan temperaturas elevadas (>30°C), así como en aquellas ciudades cercanas al nivel del mar, como lo es la ciudad de Guayaquil (1.0128 $bar_{p_{atm}}$), casi nunca experimentan temperaturas menores a los 10°C. Es por eso que, tal como se indicó en el primer estudio paramétrico de influencia, los casos simulados en condiciones de conducción real cubren valores extremos, cuya observación experimental tendría una mayor complejidad.

6.2.1. Efecto sobre BMEP

Comenzando el análisis desde la afección sobre las prestaciones en condiciones de conducción real, la BMEP obtenida aplicando los diferentes mapas característicos de cada una de las ciudades, tomando en cuenta que estos fueron desarrollados en condiciones de combustible constante, y que tanto el perfil de velocidad y comportamiento del conductor deben los mismos en todos los casos del estudio paramétrico, experimenta una ligera disminución con respecto al aumento de la temperatura local. Este efecto de disminución

de las prestaciones es menos pronunciado a medida que la presión atmosférica a la que se hace el estudio comparativo se reduce.

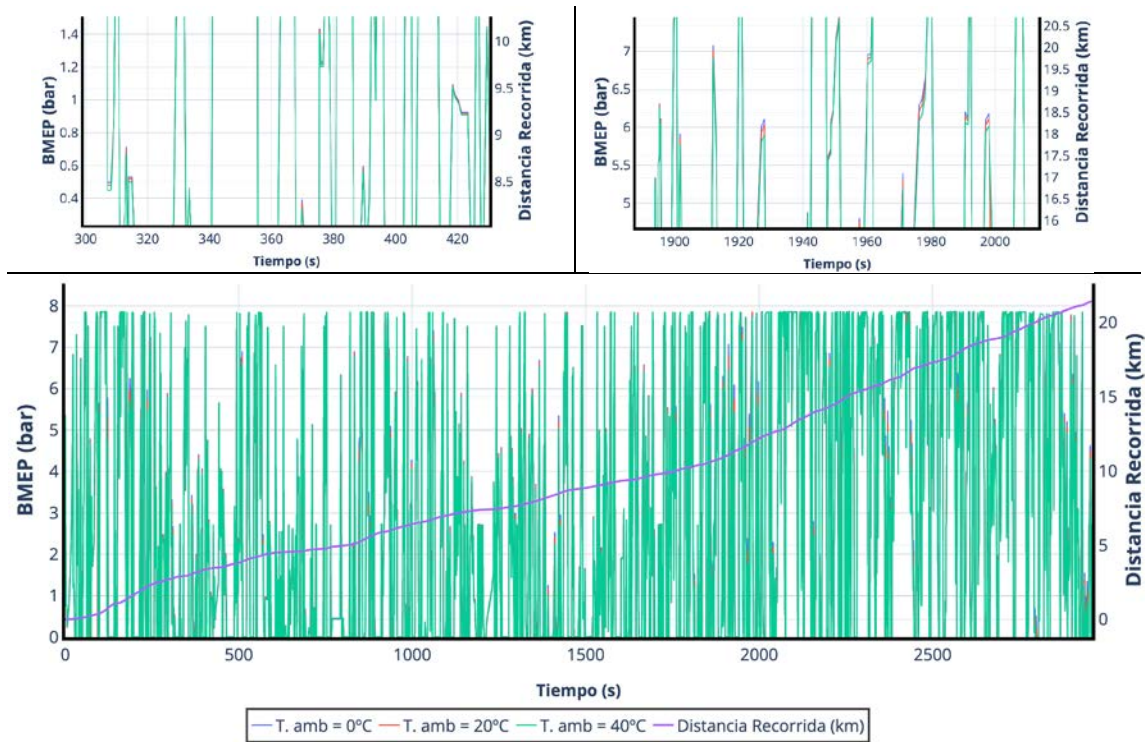
Para efectivizar medios de comparación de la BMEP, al existir una cantidad considerable de puntos estimados en el recorrido de conducción completo, se ha procedido a la obtención de una BMEP promedio ($BMEP_{avg}$), para cada una de las ciudades, en cada uno de los casos de variación de la temperatura ambiente (Tabla 6-1).

Tabla 6-1 Sensibilidad promedio de BMEP con la temperatura ambiente para tres presiones ambiente características en condiciones de conducción real

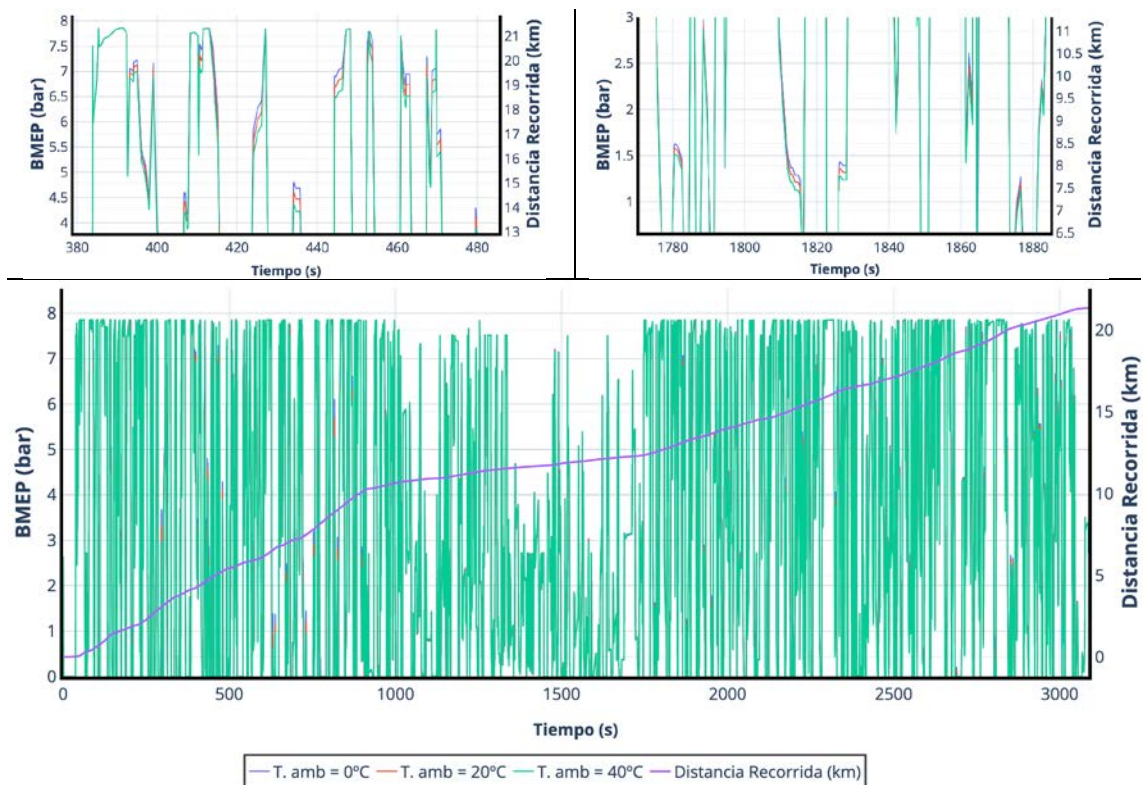
<i>BMEP_{avg}</i> (bar)– Recorrido ida y vuelta						
Temp. (°C)	Guayaquil (1.0128 <i>bar_{patm}</i>)		Santa Isabel (0.9332 <i>bar_{patm}</i>)		Ambato (0.8132 <i>bar_{patm}</i>)	
	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta
0	2.97	3.81	2.97	3.81	2.96	3.79
20	2.94	3.78	2.93	3.77	2.92	3.76
40	2.90	3.74	2.89	3.74	2.88	3.73
$\Delta BMEP/\Delta T$ <i>bar/°C</i> (%/°C)	$-1.801 \cdot 10^{-3}$ (-0.0531)		$-1.783 \cdot 10^{-3}$ (-0.0526)		$-1.755 \cdot 10^{-3}$ (-0.0520)	

De los resultados presentados destaca, de igual forma que en el estudio paramétrico del motor ADE360N, una mínima influencia de los factores ambientales en las prestaciones, no superando en ningún momento los 0.054%/°C. Por el contrario, con referencia al mismo estudio sobre el motor, en este caso el efecto de la temperatura se reduce a medida que la presión atmosférica aumenta, cuando los resultados iniciales demostraban un ligero aumento.

Es importante recordar que todos los resultados son calculados en base a condiciones de combustible constante. A continuación, se presenta la variación de BMEP en la ciudad de Guayaquil (1.0128 *bar_{patm}*), con respecto a la variación de la temperatura (0°C, 20°C y 40°C), para el recorrido de ida (Fig. 6-4) y el recorrido de vuelta (Fig. 6-5). Debido a la cantidad de datos estimados, para una mejor visualización, todas aquellas figuras relacionadas sobre el recorrido se presentan en conjunto con dos capturas de imagen con zoom ampliado, con los puntos más representativos del efecto en el caso que fuera necesario.



**Fig. 6-4 Variación de BMEP a tres temperaturas características (0°C, 20°C, 40°C).
Recorrido de ida.**



**Fig. 6-5 Variación de BMEP a tres temperaturas características (0°C, 20°C, 40°C). -
Recorrido de vuelta.**

6.2.2. Efecto sobre el consumo de combustible

Por otra parte, a diferencia de la estimación sobre la BMEP, con respecto a la variación de la temperatura ambiente el consumo de combustible aumenta de forma ligera, tal como se presentó en el estudio paramétrico de funcionamiento del motor. En este caso, el incremento del consumo es de alrededor del +0.06%/°C y el +0.08%/°C como se puede ver en la Tabla 6-2, todo medido con respecto a su recorrido completo (ida + vuelta).

Tabla 6-2 Sensibilidad de FC_{acum} con la variación de la temperatura para tres presiones ambiente características en condiciones de conducción real

FC_{acum} (g)- Recorrido ida y vuelta			
Temp. (°C)	Guayaquil (1.0128 bar _{patm})	Santa Isabel (0.9332 bar _{patm})	Ambato (0.8132 bar _{patm})
	Recorrido ida + vuelta	Recorrido ida + vuelta	Recorrido ida + vuelta
0	12970.39	13100.84	13461.68
20	13138.91	13342.25	13630.06
40	13265.28	13534.94	13756.91
$\Delta FC_{acum}/\Delta T$ g/°C (%/°C)	7.37 (0.057)	10.85 (0.083)	7.38 (0.055)

Una ventaja que nos presenta el código de simulación es la posibilidad de examinar la influencia del perfil de velocidad real, en el recorrido de ida como de vuelta, por lo que la medida del consumo de combustible se puede dividir en grupos de aceleración, velocidad constante y desaceleración del vehículo (Tabla 6-3). La medida de consumo en ralentí no se incluye por cuanto el porcentaje de conducción en la que el vehículo se encuentra en este estado es mínima.

Tabla 6-3 Consumo de combustible FC_{acum} en aceleración, velocidad constante y desaceleración con respecto a la variación de la temperatura para tres presiones ambiente características

FC_{acum} (kg)- Recorrido ida y vuelta												
Temp. (°C)	Guayaquil (1.0128 bar _{patm})				Santa Isabel (0.9332 bar _{patm})				Ambato (0.8132 bar _{patm})			
	CD	AC	DAC	Total	CD	AC	DAC	Total	CD	AC	DAC	Total
0	1.75	8.87	2.35	12.98	1.77	8.98	2.36	13.11	1.79	9.27	2.39	13.45
20	1.77	9.02	2.36	13.14	1.79	9.18	2.38	13.35	1.82	9.41	2.40	13.63
40	1.77	9.12	2.37	13.27	1.80	9.34	2.40	13.54	1.82	9.53	2.41	13.76

De los valores registrados en la Tabla 6-3, queda claro que los momentos de mayor influencia de la temperatura son aquellos de aceleración del vehículo, cuya lógica se desprende de la mayor necesidad de aire para cumplimentar tales requerimientos de aumento de velocidad, y por ende de potencia entregada por el motor, recordando nuevamente que se mantiene condiciones de combustible constante.

A continuación, en la Fig. 6-6, se presenta el crecimiento del consumo de combustible con respecto al perfil de velocidad del vehículo, para los recorridos de ida y vuelta.

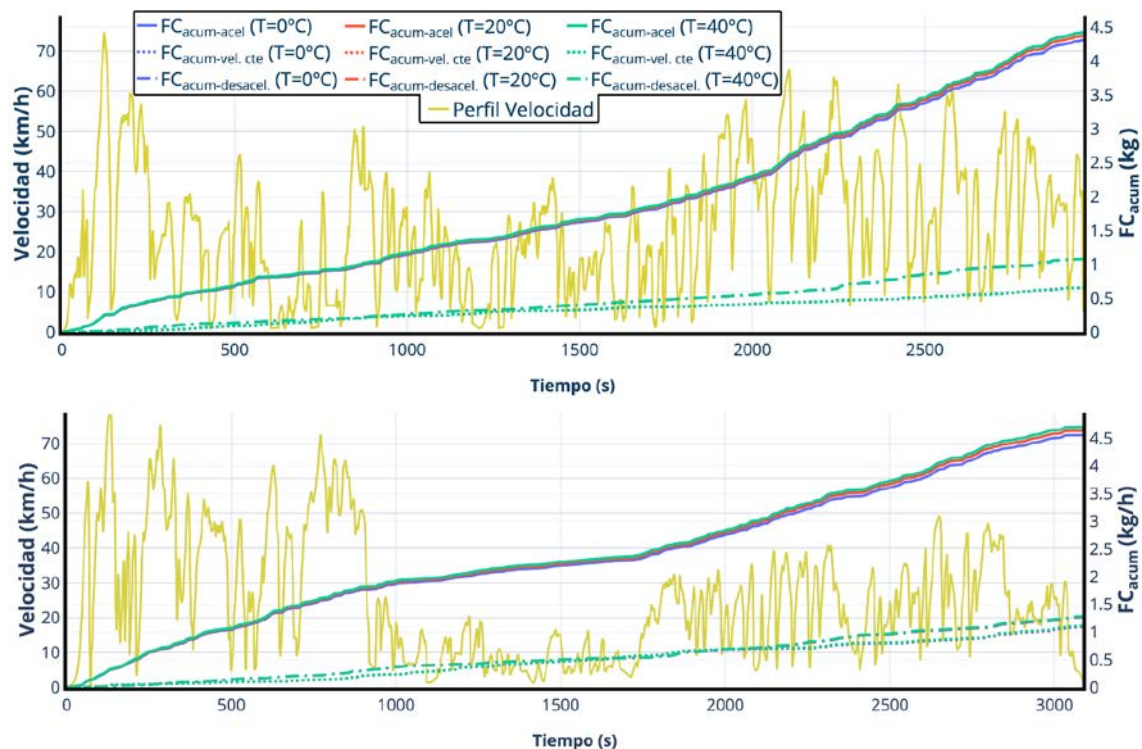


Fig. 6-6 Perfil de velocidad y consumo de combustible acumulado en aceleración, velocidad constante y desaceleración a tres temperaturas ambiente para las tres presiones atmosféricas características. Recorrido de ida y vuelta.

Desde una perspectiva visual del consumo en el recorrido, en la Fig. 6-7 se presenta por un lado la estimación del consumo acumulado de combustible FC_{acum} (en kg), y del otro lado el flujo másico de combustible (en kg/h) con respecto al tiempo, primero para el recorrido de ida, y posteriormente para el de vuelta. Las diferencias porcentuales de BSFC son tan pequeñas, que en gran porcentaje de recorrido solamente se visualizan pocos picos de diferente color, que representarían los momentos exactos de influencia de la variación de la temperatura.

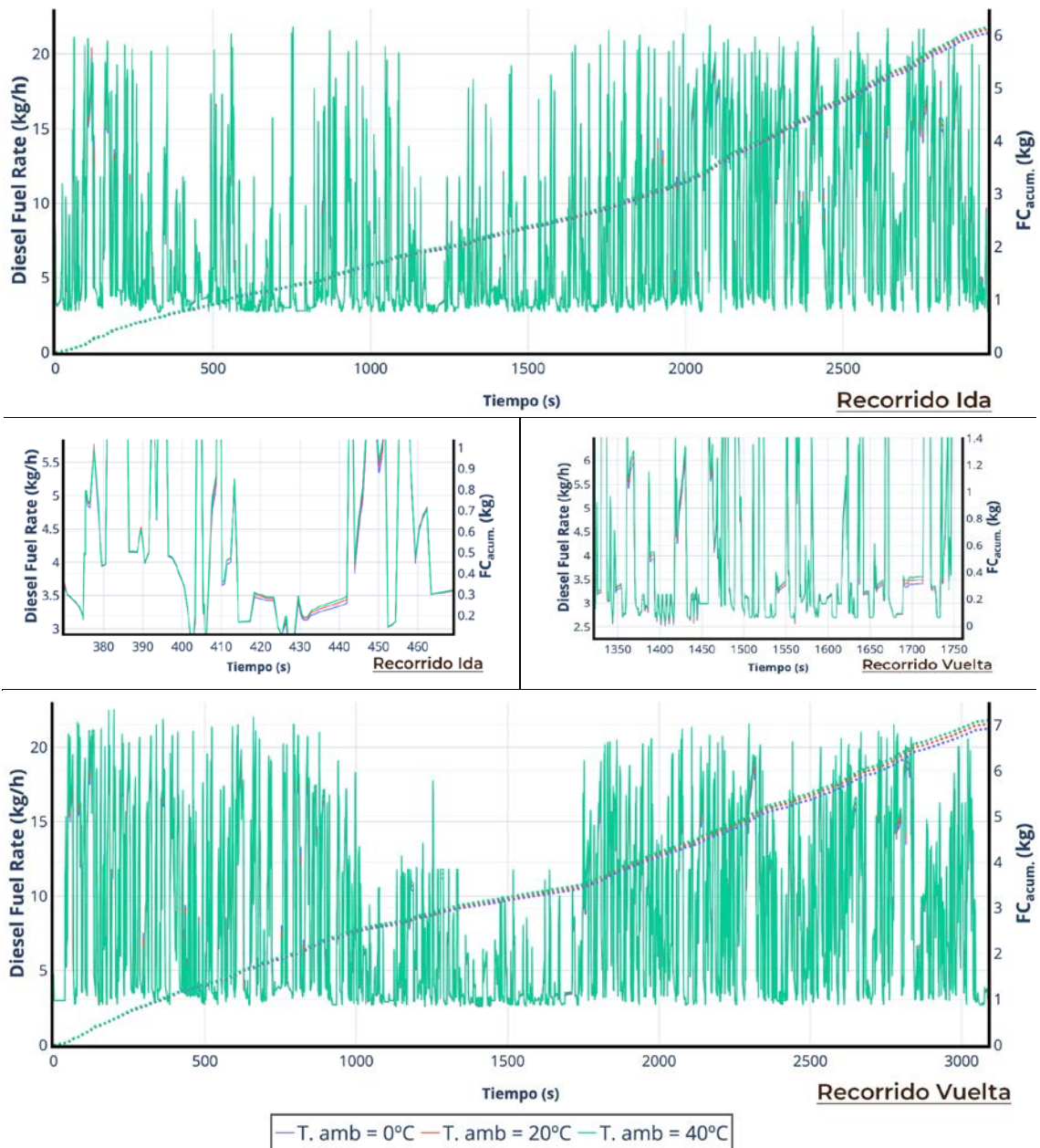


Fig. 6-7 Flujo másico de combustible y consumo de combustible acumulado a tres temperaturas ambiente para las tres presiones atmosféricas características. - Recorrido de ida y vuelta.

De forma complementaria, para una comprensión general del fenómeno, siguiendo unidades de medida comúnmente utilizadas en el estudio de consumo y emisiones de vehículos de transporte, en la Fig. 6-8 se presenta por un lado el consumo en g/km, y por otro lado dicho consumo en unidades volumétricas por 100 kilómetros recorridos (ambos diferenciados por colores claros para recorrido de ida y colores oscuros para recorridos de vuelta).

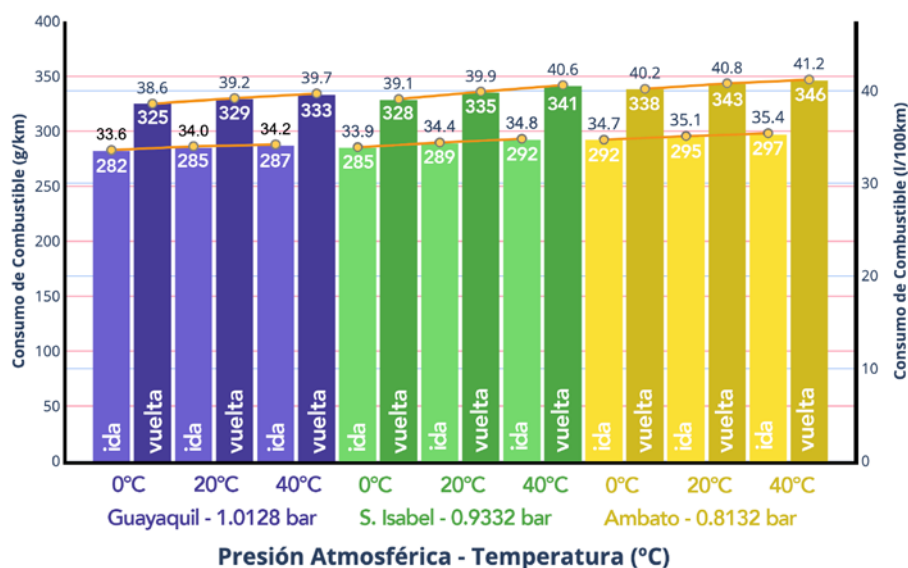


Fig. 6-8 Consumo de combustible FC con respecto a la variación de la temperatura para tres presiones ambiente características en perfil real de conducción

Al considerarse el estudio presentado por (Ceballos Marcillo & Tinaut Fluixá, 2016) el punto de partida hacia una investigación mucho más profunda sobre el consumo y emisiones de flotas de vehículos de transporte urbano en Ecuador, se extrae de esta anterior aproximación que para un vehículo Euro III, no sobrealimentado, con las mismas características del actualmente analizado, el consumo de combustible era de 47.32 l/100km, por lo que la diferencia actual es de -9.29 l/100km (-20.39%) si lo comparamos con la estimación para la ciudad de Ambato ($0.8132 \text{ bar}_{p_{atm}}$), a una temperatura de 20°C.

Esta diferencia se debe en gran medida a que, en contraparte al funcionamiento de COPERT4 (considerada una herramienta de estimación estadística basada en factores de emisión), en AVL CRUISE™ se toman en cuenta las características constructivas reales del vehículo, perfiles reales de velocidad y altitud, comportamiento del conductor, además de no considerarse medios de desgaste por años de funcionamiento, donde estos y otros factores harían que medida estimada del consumo se incrementen considerablemente.

Otro valor de referencia importante es el indicado por (Ntziachristos et al., 2020), el mismo que indica un estimado de consumo de combustible $EC = 424.9 \text{ g/km}$ para un autobús bajo estándar Euro III, del cual en este caso se desprende una diferencia de -111.22 g/km, que equivale a un 25% menos de consumo. Los valores de influencia de la temperatura, diferenciados tanto para el recorrido de ida como de vuelta, para las tres ciudades seleccionadas, con respecto a la distancia recorrida, se presentan en la Fig. 6-9.

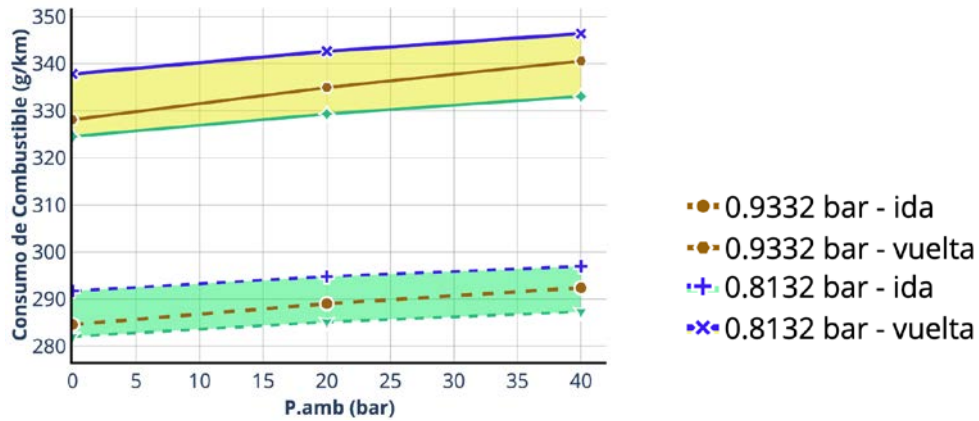


Fig. 6-9 Efecto de la variación de la temperatura sobre valores absolutos de la FC_{acum} (g/km) para tres presiones ambiente características.

6.2.3. Efecto sobre la emisión de NOx

El grado de emisión de NOx por el vehículo, con respecto a la variación de la temperatura, tiene un aumento considerable, con coeficientes de sensibilidad de $0.55\%/^{\circ}\text{C}$ para la ciudad de Guayaquil ($1.0128 \text{ bar}_{patm}$), reduciéndose este efecto a medida que se aumenta la presión atmosférica, obteniendo de esta forma coeficientes de sensibilidad de $0.39\%/^{\circ}\text{C}$ para Santa Isabel ($0.9332 \text{ bar}_{patm}$) y de $0.35\%/^{\circ}\text{C}$ para Ambato ($0.8132 \text{ bar}_{patm}$).

Los valores estimados para las tres temperaturas ambiente se presentan en la Tabla 6-4, donde esta diferencia de emisión es mucho más clara en los casos ambientales de temperatura medias (20°C) y temperaturas altas (40°C), visualizándose una ligera fluctuación a temperatura bajas (0°C) con un único caso donde Santa Isabel tiene una mayor emisión con respecto a Guayaquil ($+3.89\%$).

Tabla 6-4 Sensibilidad de NOx_{acum} con la variación de la temperatura para tres presiones ambiente características en condiciones de conducción real

Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	NOx_{acum} (g)- Recorrido ida y vuelta		
	Guayaquil ($1.0128 \text{ bar}_{patm}$)	Santa Isabel ($0.9332 \text{ bar}_{patm}$)	Ambato ($0.8132 \text{ bar}_{patm}$)
	Recorrido ida + vuelta	Recorrido ida + vuelta	Recorrido ida + vuelta
0	294.16	305.59	278.85
20	332.11	331.87	302.50
40	358.48	353.04	317.94
$\Delta NOx_{acum}/\Delta T$ $\text{g}/^{\circ}\text{C}$ ($\%/^{\circ}\text{C}$)	1.61 (0.55)	1.19 (0.39)	0.98 (0.35)

De forma análoga a estimaciones previas, resulta de gran utilidad visualizar la curva estimada de emisión acumulada de NOx_{acum} con respecto al perfil de velocidad real para los recorridos de ida y vuelta, para poder identificar los puntos exactos de mantenimiento y mayor conformación de NOx en el recorrido.

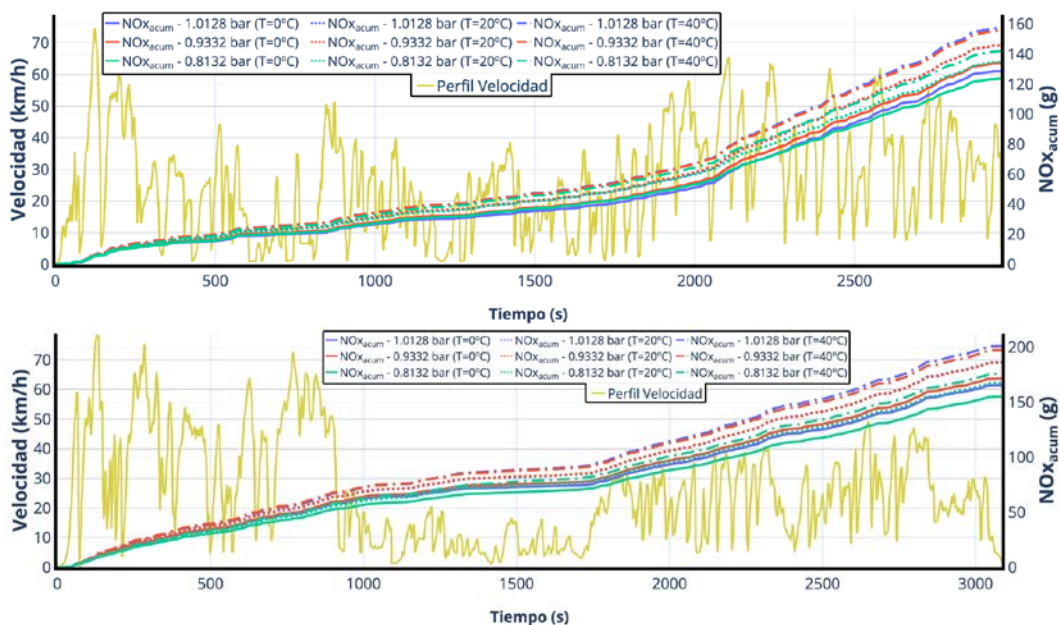


Fig. 6-10 Perfil de Velocidad y emisión de NOx_{acum} a tres temperaturas ambiente para tres presiones atmosféricas- recorrido de ida y vuelta.

Un valor primordial para verificar el nivel de emisión del vehículo, con variación de las condiciones ambientales, es la presentación de un factor de emisión (en g/km), tal como se indica en la Fig. 6-11 y Fig. 6-12. Considerando que, según (Ntziachristos et al., 2020), en el inventario de emisiones de la EMEP/EEA el factor de emisión de un autobús con norma HD Euro III - 2000 es de 14.21 g/km, se puede deducir que los valores obtenidos de estimación de NOx en AVL CRUISE™ estarían dentro de un rango aceptable.

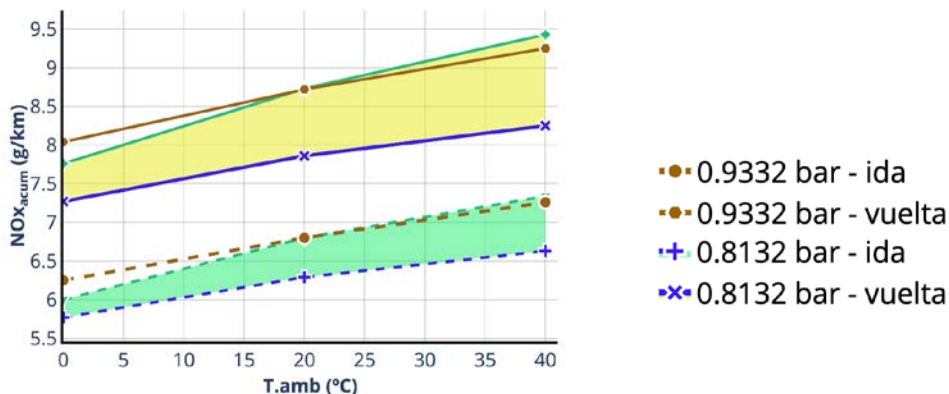


Fig. 6-11 Efecto de la variación de la temperatura sobre valores absolutos de NOx_{acum} (g/km) para tres presiones ambiente características.

Además que, comparándolo con los valores obtenidos por (Ceballos Marcillo & Tinaut Fluixá, 2016), existe una diferencia de -40.64% (con base a una estimación de 11.91 g/km obtenido mediante COPERT 4), recordando que, como en la variación de BSFC y el consumo de combustible, no se toman en cuenta características constructivas reales del vehículo, perfiles reales de velocidad y altitud, comportamiento del conductor y la no inclusión de medios de desgaste por años de funcionamiento del vehículo.

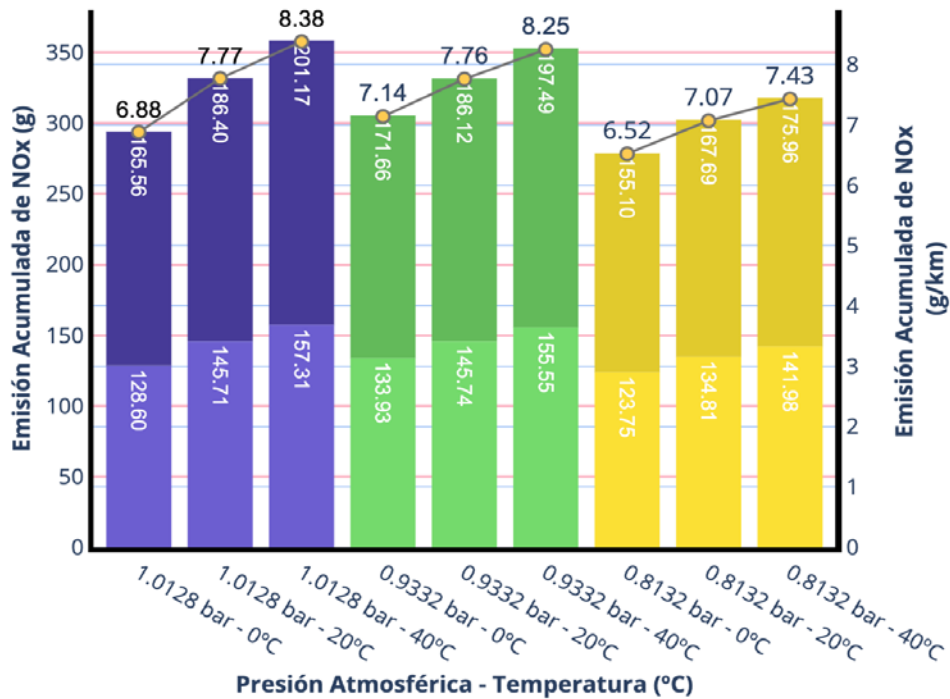


Fig. 6-12 Emisión de NOx_{acum} con respecto a la variación de la temperatura para tres presiones ambiente características en conducción real

6.2.4. Efecto sobre la emisión de CO

En el marco de estimación sobre la emisión de CO, en este único caso representativo con respecto a la variación de la temperatura, si bien es cierto la tendencia presenta un cierto grado de fluctuación en sus estimaciones (valores de estimación para la ciudad de Guayaquil (1.0128 bar_{atm}) entre 20°C y 40°C), se puede establecer un coeficiente de sensibilidad con un muy ligero crecimiento (aproximadamente del 0.09%/°C), siendo este efecto prácticamente el mismo independiente de la presión atmosférica a la que se ha realizado el estudio.

Tabla 6-5 Sensibilidad de CO_{acum} con la variación de la temperatura para tres presiones ambiente características en condiciones de conducción real

CO_{acum} (g)- Recorrido ida y vuelta			
Temp. (°C)	Guayaquil (1.0128 bar_{patm})	Santa Isabel (0.9332 bar_{patm})	Ambato (0.8132 bar_{patm})
	Recorrido ida + vuelta	Recorrido ida + vuelta	Recorrido ida + vuelta
0	169.01	151.11	132.03
20	169.81	153.89	134.66
40	167.70	155.97	136.87
$\Delta CO_{acum}/\Delta T$ g/°C (%/°C)	-0.03 (-0.02)	0.12 (0.08)	0.12 (0.09)

Es importante recordar que, como se explicó en el apartado 5.3.2, la conformación de resultados permite el análisis para la variación de la temperatura, mas no de la variación de la presión atmosférica, por lo que la comparativa de valores por cambio de esta última condición ambiental, a nivel regional, dibujaría en menor medida el fenómeno real producido, considerando además las condiciones de aire seco en las que se realiza la estimación.

El comportamiento de la formación acumulada de CO, con respecto al perfil real de velocidad (recorridos de ida y vuelta), se presentan en la Fig. 6-13 y Fig. 6-14 para que, de igual forma que con la emisión de NOx_{acum} , exista mayor facilidad de identificación de los puntos exactos de mayor conformación en cada distancia alcanzada.

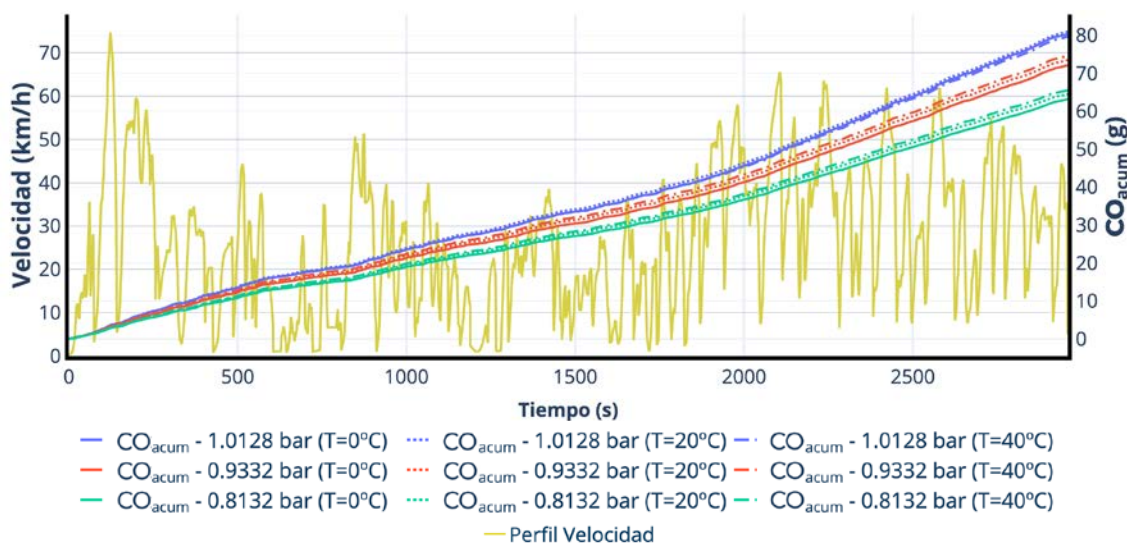


Fig. 6-13 Perfil de Velocidad y emisión de CO acumulada CO_{acum} a tres temperaturas ambiente para tres presiones atmosféricas características - Recorrido de ida.

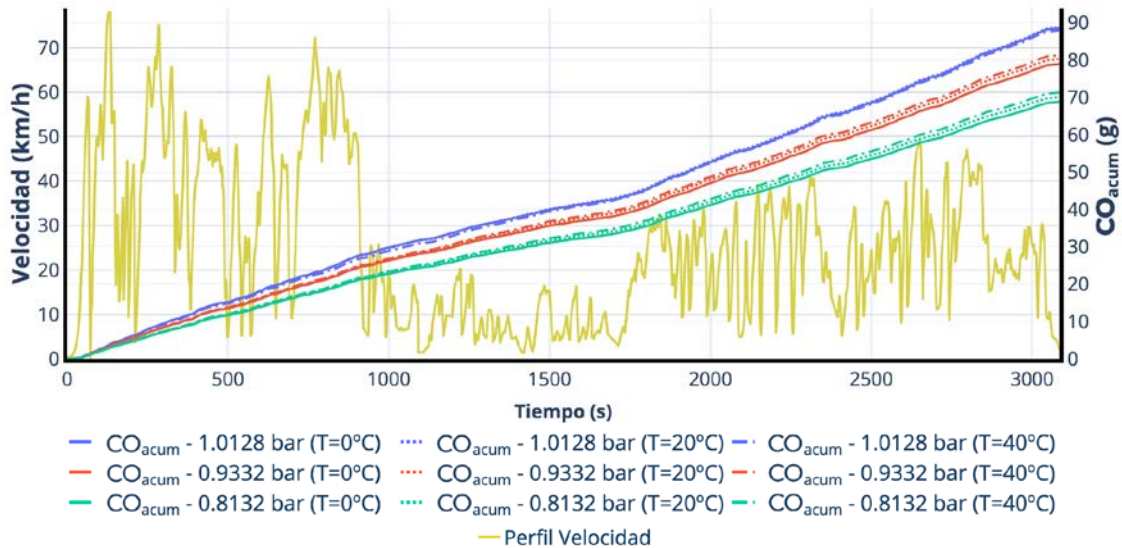


Fig. 6-14 Perfil de Velocidad y emisión de CO acumulada CO_{acum} a tres temperaturas ambiente para tres presiones atmosféricas características - Recorrido de vuelta.

Si bien hasta el momento se han apuntado valores de emisión estimada acumulada de CO CO_{acum} , medida en gramos para el recorrido total de ida y vuelta, es recomendable, al igual que sucedió con la estimación de NOx, la presentación de un factor de emisión (en g/km), tal como se indica en la Fig. 6-15 y Fig. 6-16. Tomando en cuenta que, según (Ntziachristos et al., 2020), dentro del inventario de emisiones de la EMEP/EEA indica un factor de emisión de CO para un autobús con norma HD Euro III – 2000 es de 3.70 g/km, tendríamos una diferencia de -14.86%, si lo comparamos con el valor obtenido para la ciudad de Ambato ($0.8132 \text{ bar}_{patm}$) a $T = 20^\circ\text{C}$, y de un 7.30% si lo cotejamos con lo estimado para la ciudad de Guayaquil ($1.0128 \text{ bar}_{patm}$) a la misma temperatura.

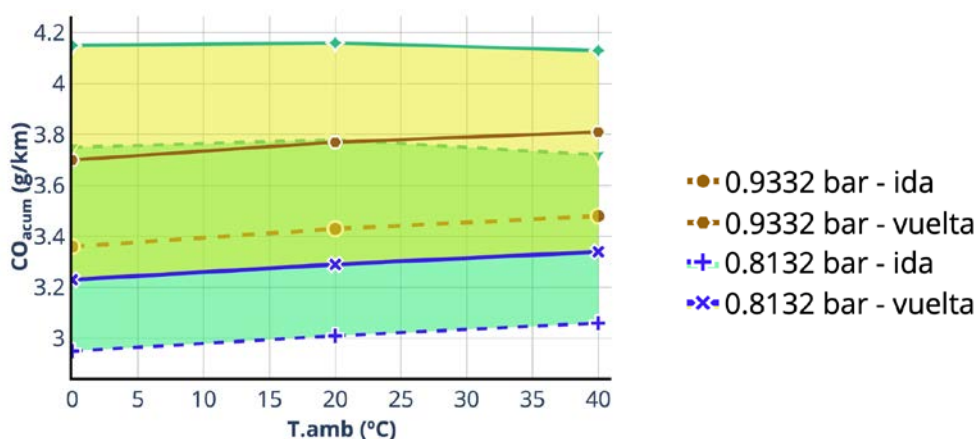


Fig. 6-15 Efecto de la variación de temperatura sobre valores absolutos de CO_{acum} (g/km) para tres presiones ambiente características

Comparando los valores obtenidos ahora con respecto a aquellos indicados por (Ceballos Marcillo & Tinaut Fluixá, 2016) (con un factor de emisión medio de CO = 3.94 g/km), a

una temperatura media de 20°C, para la ciudad de Ambato (0.8132 bar_{patm}), tenemos una diferencia porcentual de -20.05%. A continuación, en la Fig. 6-16, se presentan los valores de estimación medidos (g/km), comparados con respecto a la distancia recorrida total, identificando el recorrido en ida en colores claros, y el de vuelta en colores oscuros.

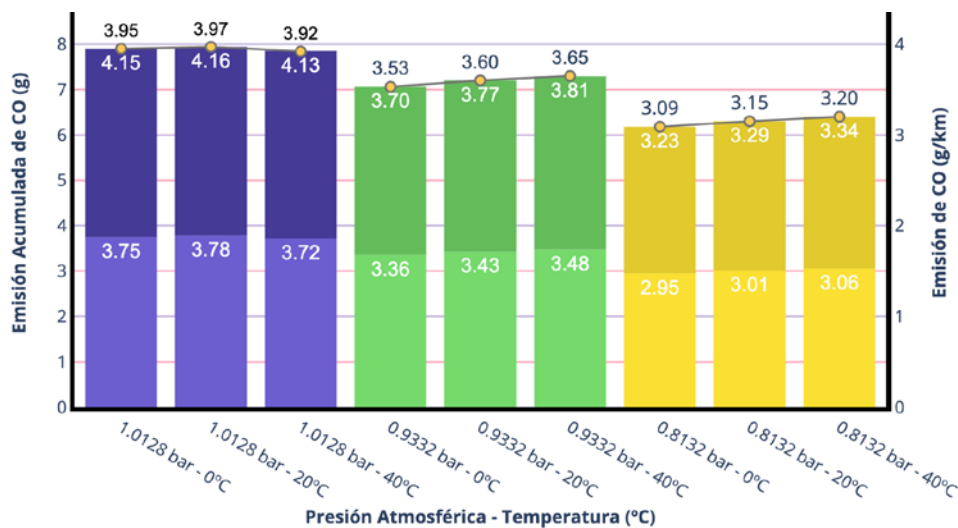


Fig. 6-16 Emisión de CO acumulada CO_{acum} con respecto a la variación de la temperatura para tres presiones ambiente características en conducción real

6.2.5. Efecto sobre la emisión de Soot

En el caso de la emisión de Soot, el coeficiente de sensibilidad estimado es aquel que tiene el mayor rango de variación con respecto a la variación de la temperatura, con valores entre los 3.48%/°C en el punto más cercano al nivel del mar, Guayaquil (1.0128 bar_{patm}) y un 2.26%/°C en el punto más alto de las ciudades seleccionadas, Ambato (0.8132 bar_{patm}) (Tabla 6-6).

Tabla 6-6 Sensibilidad de $Soot_{acum}$ con la variación de la temperatura para tres presiones ambiente características en condiciones de conducción real

Temp. (°C)	$Soot_{acum}$ (g)– Recorrido ida y vuelta		
	Guayaquil (1.0128 bar_{patm})	Santa Isabel (0.9332 bar_{patm})	Ambato (0.8132 bar_{patm})
	Recorrido ida + vuelta	Recorrido ida + vuelta	Recorrido ida + vuelta
0	3.10	4.98	9.84
20	5.37	8.23	14.56
40	7.40	11.35	18.71
$\Delta Soot_{acum}/\Delta T$ g/°C	0.10	0.15	0.22
(%/°C)	(3.48)	(3.19)	(2.26)

Al igual que con la emisión de NOx, resulta de gran utilidad la visualización de la emisión acumulada de Soot (g) con respecto al perfil de velocidad actual del vehículo, tanto para los recorridos de ida como de vuelta (Fig. 6-17).

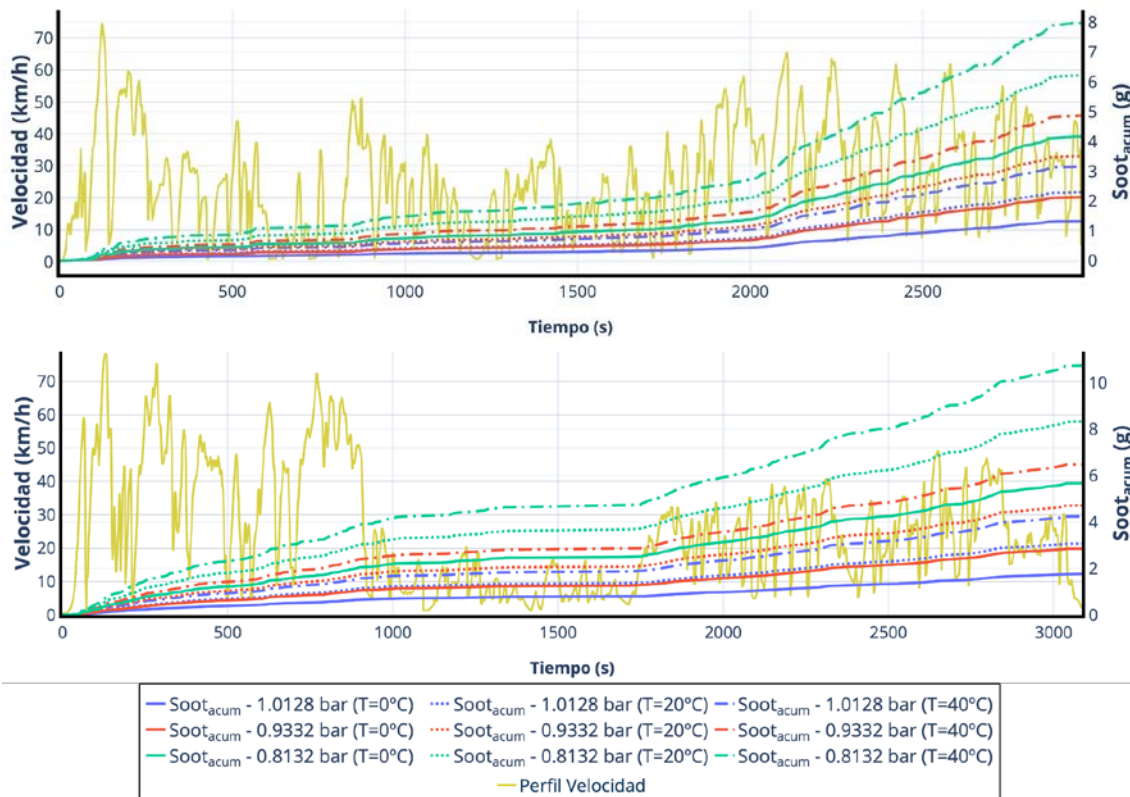


Fig. 6-17 Perfil de Velocidad y emisión de Soot acumulada $Soot_{acum}$ a tres temperaturas ambiente para tres presiones atmosféricas características - Recorrido de ida y vuelta.

Comparando las estimaciones realizadas, con los valores de (Ntziachristos et al., 2012) y (Cooper, 2013) (con un factor de emisión de $PM_{2.5} = PM_{10} = TSP = 0.2745$ g/km para autobuses de tecnología HD Euro II - 2000), se puede verificar que tales valores se cumplen en las ciudades de Guayaquil (1.0128 bar_{atm}) en todos los rangos de temperatura, y en Santa Isabel (0.9332 bar_{atm}) solamente en temperaturas bajas (0°C) y medias (20°C).

En la ciudad de Ambato (0.8332 bar_{atm}) los factores de emisión no se cumplen, con diferencias porcentuales del 11.11% a temperaturas bajas (0°C) y del 112% a altas temperaturas (40°C), siendo este último caso considerado de mínima probabilidad de ocurrencia en la realidad.

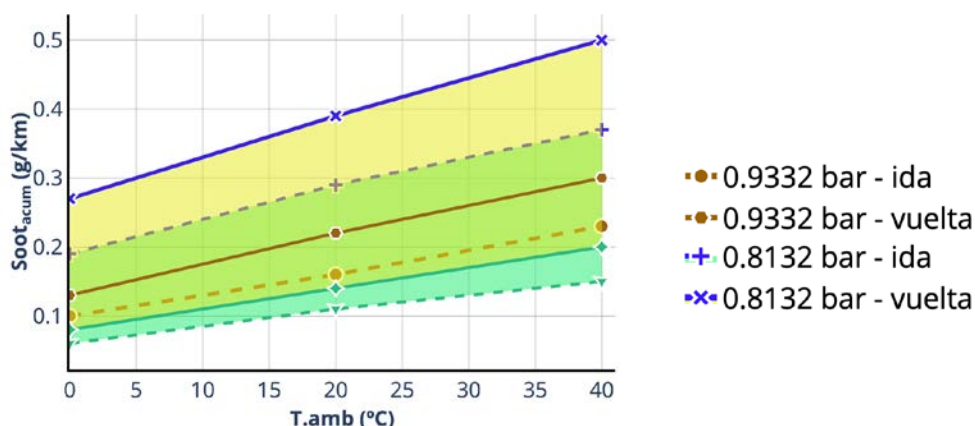


Fig. 6-18 Efecto de la variación de temperatura sobre valores absolutos de $Soot_{acum}$ (g/km) para tres presiones ambiente características

Si a su vez, realizamos una comparación entre los resultados presentados en la Fig. 6-19, con aquellos indicados por (Ceballos Marcillo & Tinaut Fluixá, 2016) (con un factor de emisión de Soot = 0.29 g/km), a una temperatura media de 20°C, existe una diferencia porcentual de +17.24%, lo que se considera aceptable.

Otros valores de influencia de la temperatura sobre la formación de Soot, diferenciados tanto para el recorrido de ida como de vuelta, para las tres ciudades seleccionadas, con respecto a la distancia recorrida, se presentan en la Fig. 6-19.

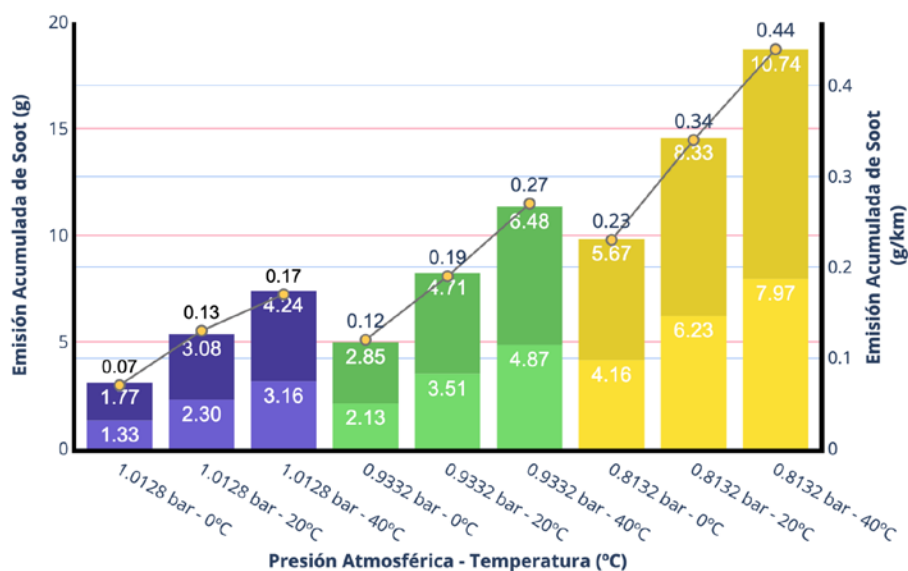


Fig. 6-19 Emisión de Soot acumulada $Soot_{acum}$ con respecto a la variación de la temperatura para tres presiones ambiente características en conducción real

6.3. Variación de la presión ambiente para cada altitud

En el caso de la variación de la presión ambiental, al igual que con la temperatura, el estudio de influencia se realiza desde dos niveles: una primera indagación a grado

regional, en la cual se estimarán tanto las prestaciones, como la emisión de gases contaminantes, a tres valores de temperatura (0°C, 20°C y 40°C), para el recorrido completo. Posteriormente, a nivel local, se considera un único valor de temperatura media (20°C), con variaciones en la presión atmosférica de ± 2 kPa (± 20 hPa = ± 20 mbar), como medio de representación del aumento y disminución de la presión asociada con un anticiclón y una borrasca respectivamente.

6.3.1. Efecto sobre BMEP

Empezando por el estudio de comparación regional, el coeficiente de sensibilidad entre la ciudad de Guayaquil ($1.0128 \text{ bar}_{Patm}$) y Ambato ($0.8132 \text{ bar}_{Patm}$) prácticamente no sufren alteraciones significantes, de igual forma que se verificó en el apartado 6.2.1 para la variación de la temperatura ambiente, como se puede ver en Tabla 6-7. En este punto es importante recordar que el proceso de simulación se realizó bajo condiciones de combustible constante (dentro del modelo de conformación de mapas característicos), y que tanto el perfil de velocidad y de comportamiento del conductor deben ser el mismo en todos los casos de estudio.

Tabla 6-7 Sensibilidad de BMEP en tres rangos de temperatura (baja, media y alta) para dos presiones ambiente características cuando esta varía de forma regional debido a la altitud en condiciones de conducción real

<i>BMEP_{avg} (bar)– Recorrido Ida y Vuelta</i>									
Presión Atmosférica [<i>bar_{Patm}</i>]	Baja Temperatura (0°C)			Media Temperatura (20°C)			Alta Temperatura (40°C)		
	Ida	Vuelta	Total	Ida	Vuelta	Total	Ida	Vuelta	Total
Guayaquil (1.0128 <i>bar_{Patm}</i>)	2.97	3.81	3.39	2.94	3.78	3.36	2.90	3.74	3.32
Ambato (0.8132 <i>bar_{Patm}</i>)	2.96	3.79	3.38	2.92	3.76	3.34	2.88	3.73	3.31
$\Delta BMEP_{avg}/\Delta Patm$ (<i>bar/kPa</i>)	$5.01 \cdot 10^{-4}$			$1.00 \cdot 10^{-3}$			$5.01 \cdot 10^{-4}$		

A nivel local, diferenciando por un lado la BMEP promedio para los recorridos de ida, como de vuelta, con presencia de anticiclón y borrasca, se evidencia una diferencia mucho más ligera que su análisis paramétrico únicamente del motor, con diferencias porcentuales de $\pm 1.13\%/kPa$ para las tres ciudades seleccionadas.

Tabla 6-8 Sensibilidad local de la BMEP en presencia de anticiclón y borrasca ($\pm 2 \text{ kPa}_{patm}$) para tres presiones ambiente características a 20°C en recorrido de conducción real (ida y vuelta).

<i>BMEP_{avg}</i> (bar) - Recorrido ida y vuelta				
Presión Atmosférica	Recorrido ida	Recorrido vuelta	<i>BMEP_{avg}</i>	$\Delta BMEP$ (%/kPa)
<i>Guayaquil</i> (1.0128 bar _{patm})	2.938	3.780	3.359	-0.03
	2.940	3.782	3.361	-
	2.942	3.784	3.363	+0.03
<i>Santa Isabel</i> (0.9332 bar _{patm})	2.933	3.775	3.354	0.00
	2.933	3.775	3.354	-
	2.935	3.777	3.356	+0.03
<i>Ambato</i> (0.8132 bar _{patm})	2.921	3.762	3.342	-0.03
	2.923	3.764	3.343	-
	2.925	3.766	3.345	+0.03

Anticiclón (+2 kPa)
 Borrasca (-2 kPa)

Como se expone en la Fig. 6-24, la presencia de cualidades meteorológicas de anticiclón ($+2 \text{ kPa}_{patm}$) producirían un incremento de prestaciones, con mayor o menor diferencia en otras condiciones de simulación a las propuestas actualmente, mientras que en presencia de borascas (-2 kPa_{patm}) estas prestaciones disminuyen en la misma proporción. Las líneas de tendencias de crecimiento o disminución de las prestaciones entre ciudades son prácticamente lineales.

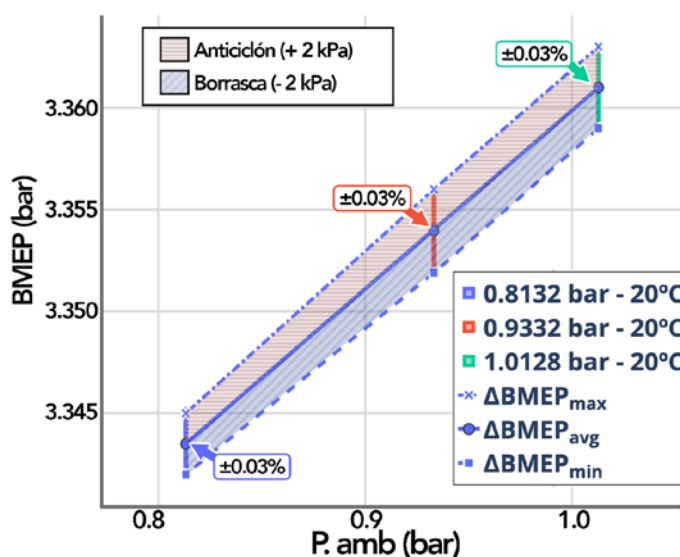


Fig. 6-20 Efecto de la variación local de la presión atmosférica sobre la BMEP en situaciones de anticiclón y borrasca para los recorridos conducción real

6.3.2. Efecto sobre el consumo de combustible

A diferencia del efecto de la variación de la presión atmosférica sobre la BMEP promedio, en el caso del consumo de combustible se verifica un incremento promedio similar en todos los casos, independiente de la temperatura a la que se realice cada caso (0°C, 20°C y 40°C), presentando así un comportamiento con tendencia de crecimiento lineal entre ciudades, con un valor de 12.31 g/kPa aproximadamente (Tabla 6-9).

Otros valores estimados para diferencias de FC_{acum} entre Guayaquil (1.0128 bar_{patm}) y Ambato (0.8132 bar_{patm}), para los recorridos de ida y vuelta, a las tres temperaturas de análisis (0°C, 20°C y 40°C) son:

Tabla 6-9 Sensibilidad de FC_{acum} en tres rangos de temperatura (baja, media y alta) para dos presiones ambiente características cuando esta varía de forma regional debido a la altitud en condiciones de conducción real

FC_{acum} (g)- Recorrido Ida y Vuelta						
Presión Atmosférica [bar_{patm}]	Baja Temperatura (0°C)		Media Temperatura (20°C)		Alta Temperatura (40°C)	
	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta
Guayaquil (1.0128 bar_{patm})	6044.59	6925.80	6110.86	7028.05	6157.25	7108.03
Ambato (0.8132 bar_{patm})	6252.23	7209.45	6318.00	7312.07	6364.20	7392.71
$\Delta FC_{acum}/\Delta Patm$ (g/kPa)	-10.40	-14.21	-10.38	-14.23	-10.37	-14.26
$\Delta FC_{acum_{avg}}/\Delta Patm$ (g/kPa)	-12.31		-12.31		-12.32	

Como se indicó anteriormente, en este caso el coeficiente de sensibilidad promedio es independiente de la temperatura, por lo que el factor de consumo de combustible (estimado en l/100 km), mantiene una pendiente de crecimiento con una ligera diferencia porcentual (aproximadamente 0.03%) en todos los grados de temperatura propuestos para el estudio regional de variación de presión ambiente (Fig. 6-25).

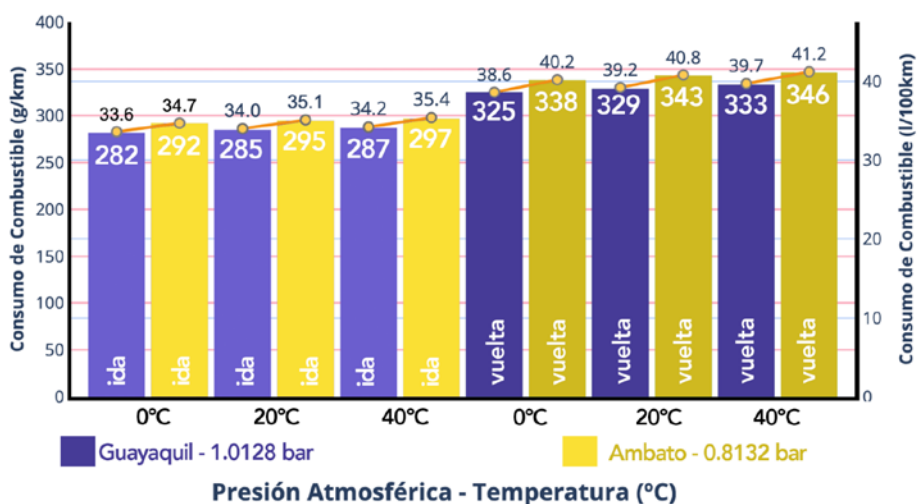


Fig. 6-21 Consumo de combustible FC_{acum} con respecto a la variación de la presión atmosférica para tres temperaturas ambiente características en condiciones de conducción real

Si se separa el grado de influencia de la variación de la presión atmosférica, de acuerdo al perfil de velocidad y altitud para los recorridos de ida y vuelta, entonces se observa que en el recorrido de vuelta hubo un incremento del 4.05% promedio, ligeramente mayor que el estimado para el recorrido de ida (3.4% promedio), tal como se apunta en la Fig. 6-22, área de color amarillo para el primero, y área de color verde claro para el segundo respectivamente.

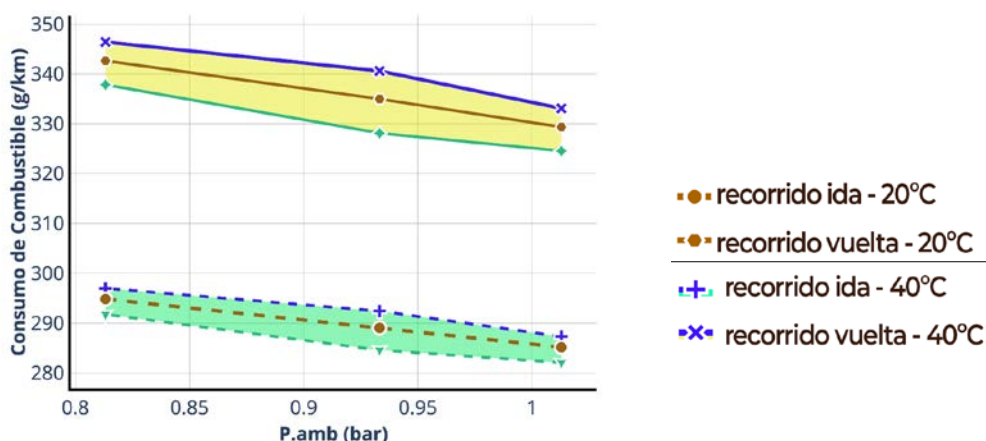


Fig. 6-22 Efecto de la variación de la presión ambiente sobre valores absolutos de FC_{acum} (g/km) a 0°C, 20°C y 40°C.

Dentro de la evaluación de la influencia a nivel local, sobre la afección de condiciones de anticiclón y borrasca, las tendencias de crecimiento se mantienen en todo momento lineales donde, por ejemplo, en presencia de anticiclón (+2 kPa_{Patm}) el valor de FC_{avg} se reduce un 0.19%/kPa, mientras que en borrasca (-2 kPa_{Patm}) aumenta el consumo en la misma proporción. (Tabla 6-10).

Tabla 6-10 Sensibilidad local de FC_{avg} en presencia de anticiclón y borrasca ($\pm 2 \text{ kPa}_{patm}$) para tres presiones ambiente características a 20°C en recorrido de conducción real (ida y vuelta).

$FC_{avg} \text{ (g/km)} - \text{Recorrido ida y vuelta}$				
Presión Atmosférica	Recorrido ida	Recorrido vuelta	FC_{avg}	ΔFC_{avg} (%/kPa)
Guayaquil (1.0128 bar _{patm})	286.09	330.73	308.41	+0.19
	285.15	329.34	307.25	-
	284.13	328.06	306.09	-0.19
Santa Isabel (0.9332 bar _{patm})	290.11	336.19	313.15	+0.18
	289.04	337.97	312.00	-
	288.04	333.41	310.72	-0.21
Ambato (0.8132 bar _{patm})	295.78	344.04	319.91	+0.19
	294.82	342.65	318.73	-
	293.84	341.38	317.61	-0.18

Anticiclón (+2 kPa)
 Borrasca (-2 kPa)

Es importante recalcar que, tal como se indicó anteriormente, a diferencia de lo ocurrido con la variación de las prestaciones del motor a nivel local, en presencia de condiciones de anticiclón ($+2 \text{ kPa}_{patm}$) se produce una disminución del consumo de combustible FC_{avg} , mientras que en presencia de condiciones de borrasca (-2 kPa_{patm}) el consumo aumenta en la misma proporción. Para el resto de ciudades seleccionadas, la influencia de la variación local de la presión atmosférica estaría indicada en la Fig. 6-23.

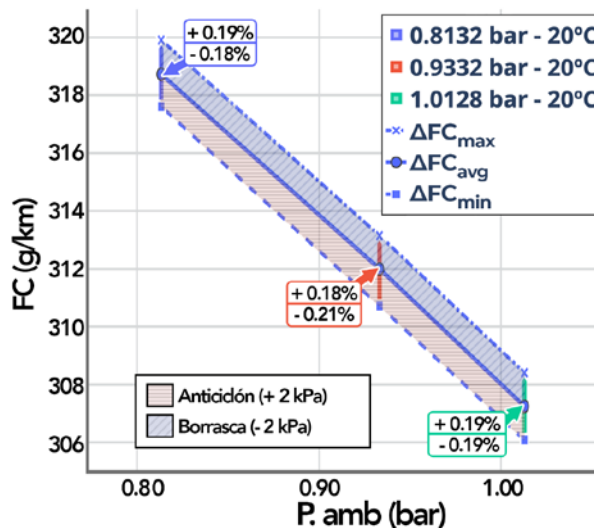


Fig. 6-23 Efecto de la variación local de la presión atmosférica sobre FC_{avg} con características de anticiclón y borrasca en condiciones de conducción real

6.3.3. Efecto sobre la emisión de NOx

Dentro de una aproximación inicial de estudio de la variación de la presión atmosférica, a nivel regional, si tomamos como referencia una diferencia de $\Delta P_{amb_{GYE-AMB}} = 19.96 \text{ kPa}_{patm}$, se presenta diferentes grados de disminución de acuerdo a la temperatura a la que se realiza la estimación. Así, para el recorrido de ida, se obtiene una reducción de -3.77% a $T = 0^\circ\text{C}$, -7.48% a $T = 20^\circ\text{C}$, -9.74% a $T = 40^\circ\text{C}$; mientras que para el recorrido de vuelta la disminución porcentual es de -6.31% a $T = 0^\circ\text{C}$, -10.04% a $T = 20^\circ\text{C}$ y -12.53% a $T = 40^\circ\text{C}$.

A continuación, en la Tabla 6-11, se presentan los valores de variación de NOx, con relación a la diferencia en kPa, primero separadas para el recorrido de ida, y de vuelta, para posteriormente anotarlos en su valor medio para el recorrido total.

Tabla 6-11 Sensibilidad de NOx_{acum} en tres rangos de temperatura (baja, media y alta) para dos presiones ambiente características cuando esta varía de forma regional debido a la altitud en condiciones de conducción real

$NOx_{acum} \text{ (g)- Recorrido Ida y Vuelta}$						
Presión Atmosférica [bar_{patm}]	Baja Temperatura (0°C)		Media Temperatura (20°C)		Alta Temperatura (40°C)	
	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta
Guayaquil ($1.0128 \text{ bar}_{patm}$)	128.60	165.56	145.71	186.40	157.31	201.17
Ambato ($0.8132 \text{ bar}_{patm}$)	123.75	155.10	134.81	167.69	141.98	175.96
$\Delta NOx_{acum}/\Delta Patm$ (g/kPa)	0.24	0.52	0.55	0.94	0.77	1.26
$\Delta NOx_{acum_{avg}}/\Delta Patm$ (g/kPa)	0.38		0.75		1.02	

Tal como se observa en Tabla 6-11, si lo comparamos por recorrido para temperaturas altas (40°C), con respecto a temperaturas bajas (0°C), se establece que en el tramo de ida se incrementa la emisión por unidad de presión atmosférica (medida en kPa) en un 220.83%, mientras que en el de vuelta aumentó en un 142.31%.

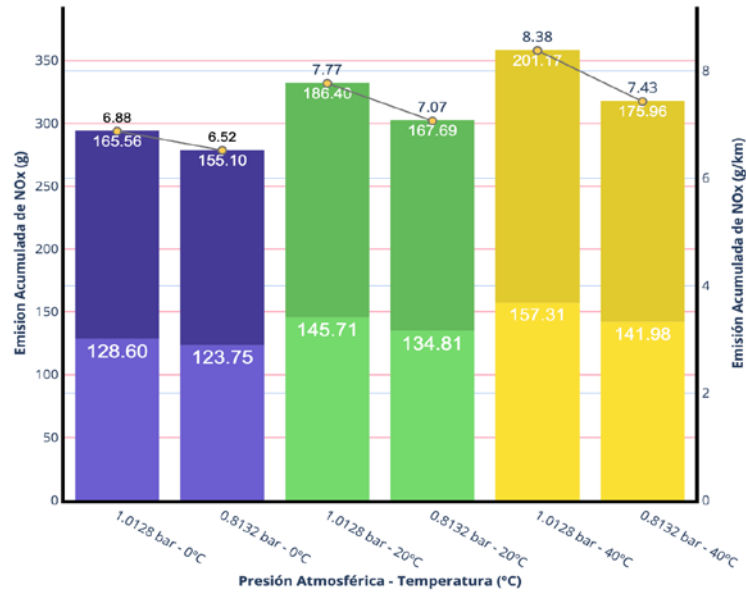


Fig. 6-24 Consumo de combustible NOx_{acum} con respecto a la variación de la presión atmosférica para tres temperaturas ambiente características en condiciones de conducción real

Para el recorrido completo (Fig. 6-24), la reducción promedio de la emisión de NOx en el vehículo es mucho mayor a temperaturas elevadas (40°C) con un -0.57%/kPa, si lo comparamos con la estimación para temperaturas más bajas (0°C) con un -0.26%/kPa.

Además, es de especial interés las tendencias de emisión de NOx entre la ciudad de Guayaquil (1.0128 bar_{atm}) y la ciudad de Santa Isabel (0.9332 bar_{atm}), entre 0°C y 20°C (Fig. 6-25), los mismo que no siguen una pendiente descendente, debido en gran medida a que, como se indicó en el apartado 3.2, es en este punto donde se establece un punto de inflexión en las condiciones ambientales de un perfil real según la orografía propia del Ecuador.

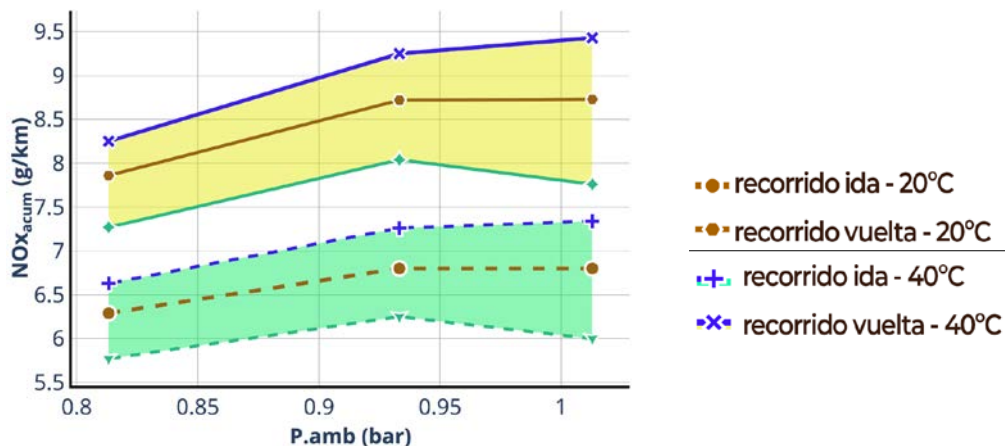


Fig. 6-25 Efecto de la variación de la presión ambiente sobre valores absolutos de NOx_{acum} (g/km) a 0°C, 20°C y 40°C.

Localmente, los resultados demuestran la misma propensión hacia una mayor influencia en la emisión de NOx a una mayor presión atmosférica, con diferencias de 13.33% en condiciones de borrasca (-2 kPa_{patm}), y de 10.64% en anticiclón ($+2 \text{ kPa}_{patm}$), para $\Delta P_{amb_{GYE-AMB}} = 19.96 \text{ kPa}_{patm}$.

Los resultados obtenidos para las tres ciudades seleccionadas, tanto para el análisis en presencia de anticiclón, como de borrasca, se presentan en forma de factores de emisión (g/km) en la Tabla 6-12.

Tabla 6-12 Sensibilidad local de NOx_{avg} en presencia de anticiclón y borrasca ($\pm 2 \text{ kPa}_{patm}$) para tres presiones ambiente características a 20°C en recorrido de conducción real (ida y vuelta).

NOx_{avg} (g/km) - Recorrido ida y vuelta				
Presión Atmosférica	Recorrido ida	Recorrido vuelta	NOx_{avg}	ΔNOx_{avg} (%/kPa)
Guayaquil (1.0128 bar_{patm})	6.75	8.64	7.70	-0.45
	6.80	8.73	7.77	-
	6.85	8.83	7.84	+0.47
Santa Isabel (0.9332 bar_{patm})	6.75	8.62	7.68	-0.49
	6.80	8.72	7.76	-
	6.86	8.82	7.84	+0.50
Ambato (0.8132 bar_{patm})	6.24	7.77	7.00	-0.51
	6.29	7.86	7.07	-
	6.34	7.95	7.15	+0.52

Anticiclón (+2 kPa)
 Borrasca (-2 kPa)

De igual forma que con el estudio regional, en la Fig. 6-26 a una $T = 20^\circ\text{C}$, existen dos zonas de tendencia definidas, con punto de inflexión en la ciudad de Santa Isabel (0.9332 bar_{patm}), donde la presencia de anticiclón y borrasca mantiene una diferencia porcentual de +0.50% para el primero y un -0.48% para el segundo respectivamente.

De esto se desprende que, en términos generales, a presencia de anticiclón ($+2 \text{ kPa}_{patm}$), la emisión de NOx estimada aumenta con un valor porcentual ligeramente mayor, con respecto a la existencia de borrasca (-2 kPa_{patm}).

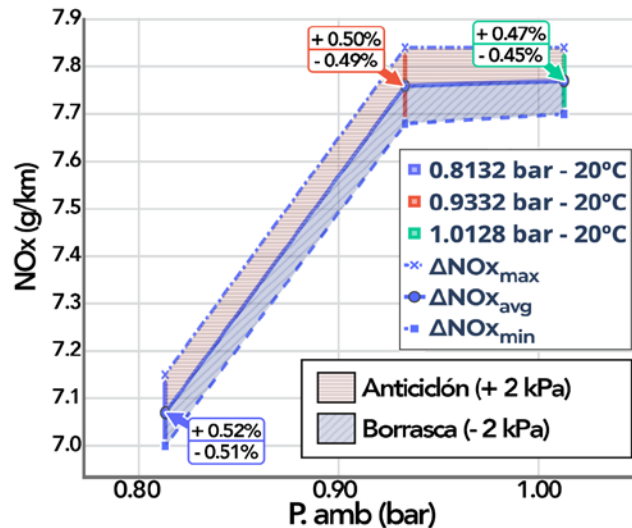


Fig. 6-26 Efecto de la variación local de la presión atmosférica sobre NOx_{avg} con características de anticición y borrasca en recorrido de conducción real

6.3.4. Efecto sobre la emisión de Soot

A diferencia de lo observado para la emisión de NOx , en el caso de la emisión de Soot es donde se experimenta una mayor diferencia porcentual, en este caso de incremento, para una $\Delta P_{amb_{GYE-AMB}} = 19.96 \text{ kPa}_{Patm}$, siguiendo esta influencia un crecimiento porcentual menor a medida que se incrementa la temperatura a la que se realiza la estimación. De esta forma, para el recorrido de ida se evidencia un incremento de +212.78% a $T = 0^\circ\text{C}$, +170.87% a $T = 20^\circ\text{C}$, +152.22% a $T = 40^\circ\text{C}$; entre tanto que para el recorrido de vuelta el incremento porcentual es de +220.34% a $T = 0^\circ\text{C}$, +170.45% a $T = 20^\circ\text{C}$ y 153.30% a $T = 40^\circ\text{C}$.

En la Tabla 6-13 se registran todos los valores de variación de Soot, con respecto a la variación de presión atmosférica medida en kPa, separadas tanto para el recorrido de ida, recorrido de vuelta y finalmente para la totalidad del mismo.

Tabla 6-13 Sensibilidad de $Soot_{acum}$ en tres rangos de temperatura (baja, media y alta) para dos presiones ambiente características cuando esta varía de forma regional debido a la altitud en condiciones de conducción real

$Soot_{acum} (g)$ - Recorrido Ida y Vuelta						
Presión Atmosférica [bar_{Patm}]	Baja Temperatura (0°C)		Media Temperatura (20°C)		Alta Temperatura (40°C)	
	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta
Guayaquil ($1.0128 \text{ bar}_{Patm}$)	1.33	1.77	2.30	3.08	3.16	4.24

Ambato (0.8132 bar_{patm})	4.16	5.67	6.23	8.33	7.97	10.74
$\Delta Soot_{acum}/\Delta Patm$ (g/kPa)	-0.14	-0.20	-0.20	-0.26	-0.24	-0.32
$\Delta Soot_{acum_{avg}}/\Delta Patm$ (g/kPa)	-0.17		-0.23		-0.28	

De acuerdo a los datos registrados en la Tabla 6-13, si lo comparamos por recorrido entre las temperaturas altas (40°C), con respecto a temperaturas bajas (0°C), para el tramo de ida la emisión de Soot aumenta en un 71.43%, mientras que al aumento en su recorrido complementario es de un 60%.

Si ahora se considera el recorrido completo (Fig. 6-27), el incremento promedio de la emisión de Soot en el vehículo tiene una pendiente de crecimiento porcentual mucho más pronunciado a mayores temperaturas (40°C) con un 64.76%, equivalente a una diferencia de 0.11g/kPa, para una diferencia de presión atmosférica de $\Delta P_{amb_{GYE-AMB}} = 19.96 kPa_{patm}$.

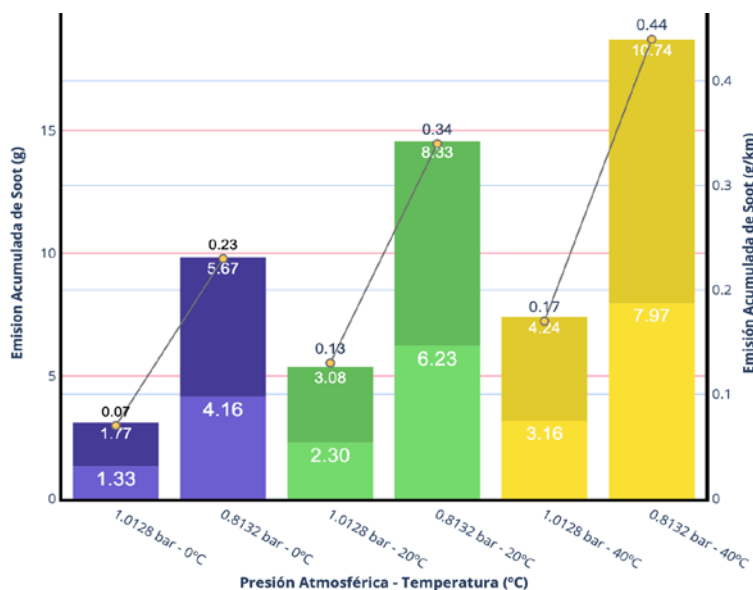


Fig. 6-27 Consumo de combustible $Soot_{acum}$ con respecto a la variación de la presión atmosférica para tres temperaturas ambiente características en condiciones de conducción real

Contrario a lo contemplado en la emisión de NOx, en la emisión de Soot las pendientes de crecimiento siguen tendencias con una mayor regularidad, comparándolas unas con respecto a otras (Fig. 6-28), además que la diferencia de tasa de formación de estos contaminantes, por kilómetros recorridos, no difiere significativamente entre el recorrido de ida comparándolo con el recorrido de vuelta.

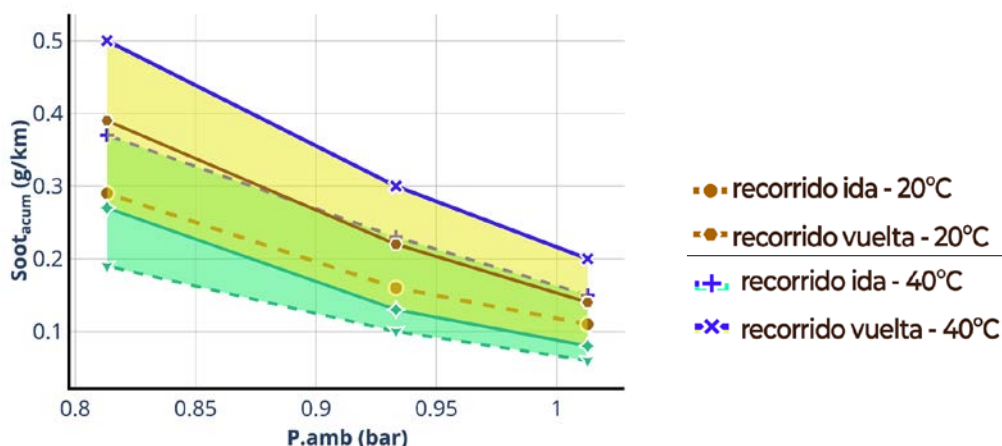


Fig. 6-28 Efecto de la variación de la presión ambiente sobre valores absolutos de $Soot_{acum}$ (g/km) a 0°C, 20°C y 40°C.

Finalmente, de forma local, los resultados obtenidos confirman una mayor influencia de la presencia de anticiclón (+2 kPa_{patm}) y borrasca (-2 kPa_{patm}) en ciudades con una menor presión atmosférica, como es en el caso de Ambato (0.8132 bar_{patm}), con un incremento de 27.08% en el primer caso, y un 30.61% en el segundo. Otros resultados registrados para las tres ciudades seleccionadas, en presencia de ambos fenómenos de variación local de la presión atmosférica, se presentan en forma de factores de emisión (g/km) en la Tabla 6-14 y en la Fig. 6-29.

Tabla 6-14 Sensibilidad local de $Soot_{avg}$ en presencia de anticiclón y borrasca ($\pm 2 kPa_{patm}$) para tres presiones ambiente características a 20°C en recorrido de conducción real (ida y vuelta).

$Soot_{avg}$ (g/km) - Recorrido ida y vuelta				
Presión Atmosférica	Recorrido ida	Recorrido vuelta	$Soot_{avg}$	$\Delta Soot_{avg}$ (%/kPa)
Guayaquil (1.0128 bar_{patm})	0.13	0.17	0.15	+9.18
	0.11	0.14	0.13	-
	0.09	0.12	0.10	-9.12
Santa Isabel (0.9332 bar_{patm})	0.20	0.27	0.23	+10.12
	0.16	0.22	0.19	-
	0.13	0.17	0.15	-10.23
Ambato (0.8132 bar_{patm})	0.36	0.49	0.42	+11.99
	0.29	0.39	0.34	-
	0.23	0.29	0.23	-11.59

Anticiclón (+2 kPa)
 Borrasca (-2 kPa)

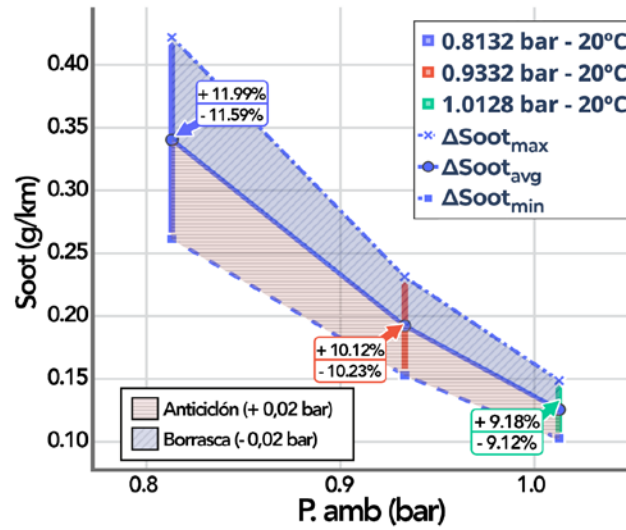


Fig. 6-29 Efecto de la variación local de la presión atmosférica sobre $Soot_{avg}$ con características de anticiclón y borrasca en recorrido de conducción real

CAPÍTULO 6

Conclusiones y Trabajo Futuro

7. Conclusiones y sugerencias para trabajos futuros	178
7.1. Conclusiones.	178
7.1.1. Conclusiones Generales	178
7.1.2. Conclusiones Específicas	180
7.2. Principales aportaciones de la Tesis Doctoral.....	187
7.3. Sugerencias para trabajos futuros.....	188

7. Conclusiones y sugerencias para trabajos futuros

7.1. Conclusiones.

En la presente tesis doctoral se ha realizado un estudio de estimación de prestaciones, consumo de combustible y emisiones de vehículos de transporte de pasajeros con un motor diésel de aspiración natural, considerando principalmente la variación de las condiciones ambientales de presión atmosférica, temperatura y humedad en las regiones del Ecuador, con la finalidad de estimar las características productivas de las unidades, su proyección de emisión, tanto desde la perspectiva del motor propiamente dicho, como desde el funcionamiento del vehículo en su totalidad.

Para abordar este trabajo se han utilizado herramientas de simulación (AVL BOOST™ para caracterización del motor y AVL CRUISE™ para estimación dentro de recorridos de conducción reales). Los datos de entrada se obtuvieron a partir de registros nacionales de meteorología del Ecuador, información de los fabricantes del motor ADE360N y del autobús BUSSCAR Bus 340 – Mercedes Benz MB OF-1722, además de una serie de expresiones matemáticas y premisas de actuación de acuerdo a resultados y conclusiones recolectados dentro del estado de la técnica. Se han vinculado ambos procesos de estudio mediante la conformación de mapas característicos de consumo de combustible y emisiones, de acuerdo a la variación de las mencionadas características ambientales. Con todo ello, se han alcanzado los objetivos planteados en el apartado 1.2 al inicio de esta Tesis.

7.1.1. Conclusiones Generales

Las **conclusiones generales** obtenidas del presente trabajo de investigación son:

- Se ha realizado una completa revisión bibliográfica, que ha incluido en su primera parte fundamentos conceptuales de influencia de la altitud sobre la composición del aire (seco y húmedo), fundamentos de operación y funcionamiento de motores diésel de aspiración natural, operación y prestaciones de autobuses con esta tecnología, modelos de estimación de emisiones, en conjunto con un repaso del estado de la técnica e investigaciones previas aplicadas al fenómeno estudiado. Esta revisión ha permitido conocer y comprender los conceptos primordiales en los que se basa la

influencia de la variación de las condiciones ambientales, tanto en el proceso de combustión diésel, como su influencia aplicada a recorridos de conducción reales tipo aplicados en la República del Ecuador. Los resultados obtenidos han sido cotejados con respecto a los obtenidos en investigaciones previas, así como con resultados registrados por otros autores de la bibliografía.

- Se han establecido dos procesos individuales de estimación de las prestaciones, consumo de combustible y emisiones: un primero de influencia de la variación de las condiciones ambientales únicamente sobre el motor diésel (ADE360N), y un segundo sobre la influencia aplicado en vehículos de transporte de pasajeros, en conjunto con perfiles de velocidad, altitud y comportamiento del conductor. Los datos de entrada son calculados mediante una serie de expresiones matemáticas y con base a información obtenida del fabricante del motor y del vehículo.
- Se ha establecido la dependencia de las variables de potencia del motor con respecto a las condiciones ambientales, como la presión, temperatura y humedad ambiental. Para ello, primero se ha escrito una expresión general para la reacción de combustión de combustible y aire, con composición cambiante debido a la altitud. A partir de esta expresión, la relación estequiométrica aire-combustible se expresa como el producto de tres términos, uno según la composición del combustible (en general independiente de la altitud), el segundo según la composición del aire (según la altitud) y el tercero según la humedad específica del aire.
- Se han utilizados dos códigos de simulación para este estudio, el software AVL BOOST™ para caracterización del motor de combustión, con creación de estudios paramétricos de influencia individual de cada factor ambiental a estudiarse, y el software AVL CRUISE™ para introducción de la caracterización previa del motor, en conjunto con otros componentes del sistema de propulsión del vehículo en su conjunto.
- Se ha desarrollado una metodología que permite simular el comportamiento de un motor diésel atmosférico de seis litros de cilindrada y 100 kW de potencia, representativo de motores utilizados para vehículos de transporte público en Ecuador y otros países de la zona. Para ello, se ha utilizado un modelo de simulación en AVL BOOST™, que ha sido ajustado para reproducir las curvas proporcionadas por el fabricante en condiciones de referencia estándar. Luego, el modelo se ha ampliado para predecir el rendimiento del motor y las emisiones para las condiciones de

funcionamiento asociadas a diferentes altitudes. En aras de la concreción, se han considerado tres ciudades del Ecuador, que van desde el nivel del mar hasta los 2500 m.s.n.m., con los valores asociados de presión atmosférica, temperatura y humedad del aire.

- Al utilizar el modelo de simulación del motor, se ha considerado por separado el efecto de cada una de las variables ambientales: presión, temperatura y humedad relativa. Estas variables dependen de una base regional a través de la altitud, que establece los valores de presión y temperatura, y también la relación entre la humedad relativa y específica del aire. Estas variables ambientales también pueden depender localmente de las condiciones meteorológicas, a través de un aumento o disminución de la temperatura, aumento o disminución de la presión debido a un anticiclón o borrasca. En general, existe una mayor influencia de la variación de la presión atmosférica, en comparación con la temperatura y la humedad relativa, siendo este último parámetro ambiental de mínima influencia en los resultados del cálculo.
- Se han obtenido una serie de expresiones analíticas en forma de correlaciones de las prestaciones y las emisiones para diferentes grados de temperatura y presión ambiente. Se ha evaluado la bondad de estas correlaciones estadísticas mediante estudio de R^2 ajustado y el error típico obtenido en cada caso.
- Se ha vinculado la simulación del motor con la simulación del vehículo de transporte de pasajeros, a partir de los mapas característicos de consumo de combustible y emisiones obtenidos previamente, detallados con respecto al régimen de giro, la presión media efectiva, y sus valores de consumo o emisión en tales condiciones. Esta forma de trabajar ha sido necesaria ante la imposibilidad de obtener las curvas características detalladas mediante ensayos experimentales del motor o del vehículo completo.

7.1.2. Conclusiones Específicas

En relación con la caracterización del efecto de las variables ambientales sobre las **prestaciones y emisiones del motor diésel de aspiración natural**, destacan las siguientes conclusiones específicas:

- Los efectos cuantitativos de las variables ambientales sobre las variables de potencia del motor (BMEP, BSFC, emisiones contaminantes) se han evaluado mediante

coeficientes de sensibilidad de varios tipos. El **primer tipo** estudia solo el cambio porcentual de una variable específica del motor con respecto a determinados valores de referencia cuando cambian las condiciones ambientales. Por ejemplo, se ha demostrado que, debido a la **variación de la temperatura ambiente** entre 0°C y 40°C, los valores calculados para BSFC, NOx, CO y Soot tienen un ligero crecimiento de entre 0.1%/°C y 1.6%/°C, y solo la BMEP experimenta una disminución de 0.2%/°C aproximadamente.

- En relación a la **presión atmosférica**, en el análisis regional, con amplios rangos de variación de presión atmosférica (entre 1.0128 hPa - 4 m.s.n.m., y 0.8132 hPa - 2500 m.s.n.m.), cuando ésta se reduce, hay un aumento en los valores de BSFC (+0.17%/kPa), CO (+0.06%/kPa) y Soot (+0.56%/kPa), mientras que BMEP y NOx experimentan el efecto contrario: -0.98%/kPa para BMEP y -0.20%/kPa para emisión de NOx. A nivel local, asumiendo que un anticiclón aumenta la presión atmosférica +2 kPa, esto conduce a una ligera reducción de BSFC (-0.17%/kPa), acompañada de crecimientos en BMEP (+1.27%/kPa) y emisión de NOx (+0.33%/kPa). Por otro lado, asumiendo que una borrasca representa una reducción de -2 kPa, se obtiene un aumento de BSFC cuya variación porcentual es la misma que en la reducción por anticiclón. Además, las emisiones de CO y Soot también aumentan en condiciones de borrasca, donde esta última emisión contaminante es la que experimenta mayor variación (+0.42%/kPa).
- En cuanto a la **humedad relativa**, su influencia se ha introducido en los datos de entrada del modelo de motor como una reducción de la densidad del aire seco, resultando en efectos prácticamente despreciables sobre las variables de salida (inferiores al 0.1% por cada punto porcentual de humedad relativa).
- Un **segundo tipo de coeficiente de sensibilidad** evalúa el cambio en el valor absoluto de las prestaciones del motor y las emisiones como $\Delta\varphi/\Delta P_{atm}$ y $\Delta\varphi/\Delta T_{amb}$, que representan las pendientes locales dentro de los diagramas de superficie de cada variable de salida (BMEP, BSFC, emisiones específicas) cuando la presión (o la temperatura) cambia a temperatura (o presión) constante. Los valores de estos coeficientes de dependencia son ligeramente diferentes dependiendo de la presión ambiental y la temperatura, tal como se recoge en el apartado 4.4.
- Finalmente, el **tercer tipo de relaciones de dependencia** obtenidas son las correlaciones estadísticas, en forma de **expresiones potenciales**, que permiten

estimar los valores de la **presión media efectiva** (BMEP), **consumo específico de combustible** (BSFC) y **emisiones** (CO₂, NO_x, CO y Soot), teniendo en cuenta la variación de presión y temperatura ambiente asociada a la altitud, en base a un valor de referencia para cada variable. Estas correlaciones, dadas por la Ec. (4-1) a la Ec. (4-7), se han obtenido mediante ajustes de regresión multilínea a los resultados del modelo AVL BOOST™ aplicado al motor en las distintas condiciones de trabajo, presentando coeficientes de determinación ajustados R^2 muy altos, así como errores típicos inferiores a 0.75%. Debido a las limitaciones de los modelos de emisiones, estas correlaciones no consideran internamente el efecto de la humedad del aire, pero son aplicables en condiciones de aire seco, lo que permite extrapolar el rendimiento del motor y las emisiones en condiciones de referencia a otras condiciones ambientales.

Con respecto a la conformación de **mapas característicos del motor** para distintas altitudes, con determinados valores de presión atmosférica y temperatura ambiental, sobresale:

- Mediante la aplicación de las fórmulas explicadas en el Capítulo 2, sección 2.2, se ha creado un método de obtención de mapas característicos del motor, como resultado de las simulaciones con AVL BOOST™, que constituyen datos de entrada para la simulación del vehículo con AVL CRUISE™. Los mapas permiten estimar el consumo o las emisiones (en l/h o kg/h respectivamente) del motor, dependiendo de la presión media efectiva BMEP a un cierto régimen de giro. Con ello, a través de cálculos de interpolación y extrapolación, el software AVL CRUISE™ pueda obtener el valor correspondiente al punto de funcionamiento exacto en el que se encuentra el vehículo dentro de un recorrido real.
- Con la finalidad de cubrir todos los rangos de operación en los que el dosado relativo indica condiciones operativas por debajo de un hipotético límite de formación de humos para motores diésel, se puede establecer un rango de variación límite de BMEP, el mismo que se reduce a medida que la presión atmosférica también disminuye. Es así como, por ejemplo, a un régimen de giro de 1400 RPM, para la ciudad de Guayaquil ($1.0128 \text{ hPa}_{p_{atm}}$) el rango de BMEP

(bar) tiene como valor máximo aproximado 9.72 bar, mientras que para la ciudad de Ambato ($0.8132 \text{ hPa}_{\text{atm}}$) se tiene como valor máximo 7.79 bar.

- Respecto a los mapas característicos de consumo de combustible, se evidencia una moderada dependencia con el régimen de giro del motor, ya que a regímenes de funcionamiento bajos el efecto de variación de las condiciones ambientales es más influyente, disminuyendo este a medida que el régimen aumenta. Ejemplo de ello es que, a 20°C , hay un incremento de entre el 5.47% (1000 RPM) y el 3.74% (2100 RPM), cuando la presión atmosférica cambia entre Guayaquil ($1.0128 \text{ hPa}_{\text{atm}}$) y Ambato ($0.8132 \text{ hPa}_{\text{atm}}$).
- Se comprueban por este método las tendencias de formación de NO_x con respecto a la variación de las condiciones ambientales, donde si se compara, por ejemplo, entre los mapas característicos de Guayaquil ($1.0128 \text{ hPa}_{\text{atm}}$) y Ambato ($0.8132 \text{ hPa}_{\text{atm}}$), a una mayor temperatura la tasa de emisión se incrementa ($\Delta \text{NO}_x = 3.38\%$ para $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$) y, de forma análoga, se reduce la emisión a una menor presión atmosférica ($\Delta \text{NO}_x = -10.26\%$ para $\Delta P_{\text{amb}_{\text{GYE-AMB}}} = 199.6 \text{ hPa}_{\text{atm}}$).
- Las diferentes fluctuaciones visualizadas en los resultados de estimación de CO en la primera parte de esta investigación ocasionan que los mapas característicos de este contaminante sean únicamente representativos en el caso de la variación de la temperatura, ya que las tendencias de crecimiento son más claras para este factor ambiental (Fig. 4-8). Este inconveniente ocasionó la no inclusión de estos mapas en el posterior estudio con perfiles de recorrido reales, en AVL CRUISE™, por cuanto sus estimaciones no estarían dentro del rango, ni tendrían el comportamiento esperado, de acuerdo a los resultados revisados dentro del estado de la técnica inicial.
- Finalmente, sobre los mapas característicos obtenidos para la emisión de Soot, con respecto a la variación de la BMEP, se evidencia una clara influencia de la temperatura, ya que por ejemplo a un régimen de funcionamiento de 1400 RPM, con una BMEP = 8.11 bar, para la ciudad de Guayaquil ($1.0128 \text{ hPa}_{\text{atm}}$), existe un incremento del 80.14% ($T = 20^{\circ}\text{C}$), y del 155.19% ($T = 40^{\circ}\text{C}$) con respecto a 0°C . Estas tendencias de crecimiento se reducen sustancialmente a medida que la presión atmosférica disminuye, donde por ejemplo para la ciudad de Ambato ($0.8132 \text{ hPa}_{\text{atm}}$) los aumentos son del 45.74% ($T = 20^{\circ}\text{C}$) y del 87.87% ($T=40^{\circ}\text{C}$)

respecto a 0°C respectivamente. Para la variación de la presión atmosférica el efecto es aún más evidente, con tasas de crecimiento de 12.70%/kPa a una temperatura $T = 0^{\circ}\text{C}$ y, un crecimiento de 6.89%/kPa a una temperatura $T = 40^{\circ}\text{C}$.

De la caracterización del efecto de las variables ambientales sobre las **prestaciones y emisiones de un autobús diésel** con perfiles de conducción reales, se destaca:

- Con base a los mapas característicos del motor y el estudio paramétrico de evaluación de la influencia de los factores ambientales (temperatura ambiental, presión atmosférica y humedad relativa), obtenidos mediante el software AVL BOOST™, en esta tercera parte del estudio se utilizó esta información para estimar el **comportamiento del vehículo** mediante AVL CRUISE™, aplicado a recorridos con perfiles reales de velocidad, altitud y comportamiento del conductor. De esta forma, se han obtenido resultados cuyas tendencias estarían enmarcadas dentro del comportamiento y magnitud establecidos en diversas publicaciones del estado de la técnica (apartado 2.5.2), sobre el efecto de las condiciones ambientales y patrones de conducción en autobuses de transporte público de pasajeros con motor diésel de norma Euro III.
- A partir de mediciones reales tomadas segundo a segundo a bordo de autobuses de la ciudad Ambato para registrar los valores típicos de recorridos de los vehículos, velocidades, altitudes de la vía, paradas, etc., se ha confeccionado un **recorrido tipo** que estandariza las condiciones de velocidad, altitud y comportamiento del conductor, con un trayecto de ida y otro de vuelta de aproximadamente 21 km cada uno. Este recorrido tipo ha resultado válido para las tres ciudades del análisis, ya que cumple tres condiciones. En primer lugar, que la longitud del recorrido cubre alguna de las rutas de conexión entre paradas de servicio, paradas de recolección de pasajeros y zonas urbanas interurbanas, y de autopista en cada ciudad. En segundo lugar, que se diferencien los recorridos por etapas de ida y vuelta, principalmente para perfiles de velocidad y altitud. Finalmente, que la simulación en el recorrido tipo se realice en horarios intermedios de operación en cuanto a complejidad de tráfico y nivel de ocupación. Previamente a las simulaciones en los recorridos tipo, se han realizado simulaciones del comportamiento del autobús en **recorridos simplificados**, comparando los resultados con respecto a grados de inclinación de la carretera,

porcentaje de tipos de conducción (urbano, interurbano, autopista), perfil y limitaciones de velocidad, así como comportamiento del conductor.

- De igual forma que con el motor, se ha considerado por separado la **influencia** de cada uno de estos factores: **presión atmosférica y temperatura ambiente** sobre el **comportamiento del vehículo**. La humedad relativa no se considera por cuanto su influencia en el estudio paramétrico inicial demostraba una muy ligera variación, a diferencia de los otros dos factores ambientales. Estas variables dependen, de forma análoga al primer estudio paramétrico, a nivel regional a través de la altitud, o de forma local según las condiciones atmosféricas con aumento o disminución de la temperatura, y aumento o disminución de la presión debido a anticiclón o borrasca.
- Los efectos cuantitativos de las variables ambientales sobre las variables de prestación, consumo del vehículo y emisiones contaminantes (BMEP, FC, NO_x, Soot) se evaluaron primero mediante **coeficientes de sensibilidad** de cambio porcentual de la variable específica con respecto a valores de referencia, debido al cambio de la respectiva variable ambiental. Es así que, en el caso de la temperatura, para un cambio de valores entre 0°C y 40°C, el valor estimado de BMEP se reduce en un -0.05%/°C, el consumo de combustible acumulado FC_{acum} reporta un muy ligero incremento entre +0.06%/°C y +0.08%/°C, la emisión de NO_x tiene un incremento de entre +0.35%/°C y +0.55%/°C, la emisión de CO registra valores entre -0.02%/°C y +0.09%/°C, siendo la emisión de Soot la de mayor influencia bajo este parámetro, con porcentajes de crecimiento entre +2.26%/°C y +3.48%/°C.
- En el caso de la variación de la **presión atmosférica**, desde un **ámbito regional**, con una importante reducción de la presión atmosférica (entre 1.0128 hPa - 4 m.s.n.m., y 0.8132 hPa - 2500 m.s.n.m.), existe una muy ligera reducción promedio de BMEP expresada en forma de coeficiente de valor -0.03%/kPa. Para el consumo acumulado de combustible FC_{acum} se evidencia un crecimiento promedio de +0.20%/kPa. En cuestión de emisiones se registra una reducción promedio de NO_x de -0.44%/kPa y un incremento promedio de emisión de Soot bastante considerable de +8.54%/kPa, confirmándose el alto nivel de influencia de este parámetro también acorde a la variación de la presión atmosférica. A **nivel local**, si un anticiclón aumenta la presión atmosférica en +2 kPa, la BMEP se

incrementa en promedio en un $+0.03\%/kPa$, acompañado de una reducción promedio de $-0.19\%/kPa$ de FC_{acum} , un incremento promedio de NO_x de $+0.50\%/kPa$ y una reducción de Soot de $-10.31\%/kPa$. En situación de borrasca se mantienen aproximadamente los valores de los coeficientes de sensibilidad, si bien con signos contrarios.

- Una segunda forma de análisis de los resultados, y la más utilizada para representación de las prestaciones, consumo de combustible y emisiones, es la determinación del **consumo (l/100km) y de factores de emisiones (g/km)**. En cuestión del consumo de combustible (en unidades de l/100km) se tiene un consumo de combustible en Guayaquil ($1.0128 hPa_{patm}$) de 36.55 l/100km, en Santa Isabel ($0.9332 hPa_{patm}$) de 37.11 l/100km (+1.53% con respecto a Guayaquil), y en Ambato ($0.8132 hPa_{patm}$) de 37.9 l/100km (+3.69% con respecto a Guayaquil). Para la emisión de NO_x se han estimado factores de emisión promedio en Guayaquil ($1.0128 hPa_{patm}$) de 7.68 g/km, en Santa Isabel ($0.9332 hPa_{patm}$) de 7.72 g/km (+0.52% con respecto a Guayaquil), y en Ambato ($0.8132 hPa_{patm}$) de 7.01 g/km (-8.72% con respecto a Guayaquil). Finalmente, para Soot los factores de emisión promedio en Guayaquil ($1.0128 hPa_{patm}$) son de 0.12 g/km, en Santa Isabel ($0.9332 hPa_{patm}$) de 0.19 g/km (+58.33% con respecto a Guayaquil), y en Ambato ($0.8132 hPa_{patm}$) de 0.34 g/km (+183.33% con respecto a Guayaquil). Los factores de emisión de CO no se indican por cuanto el comportamiento del modelo es correcto únicamente en uno de los parámetros ambientales, la temperatura ambiental, más el grado de fluctuación en el estudio paramétrico con respecto a la presión atmosférica demuestra alto grado de fluctuación en los resultados.
- Los valores de consumo de combustible y factores de emisiones obtenidos, han sido comparados con resultados obtenidos, por un lado, en estudios previos realizados por los investigadores (Ceballos Marcillo & Tinaut Fluixá, 2016) y por otro por los propuestos en el Inventario Europeo de Emisiones (Ntziachristos et al., 2012) para esta tecnología de vehículos, enmarcándose dentro del comportamiento esperado para vehículos diésel con motor de aspiración natural.

7.2. Principales aportaciones de la Tesis Doctoral

La realización de esta Tesis doctoral ha permitido realizar un estudio profundo de la influencia individual de la variación de las condiciones ambientales, tanto dentro del proceso de combustión en el motor de forma independiente, como aplicado en recorridos de conducción reales, centrándose en el efecto desde perspectivas de la composición del aire (seco y húmedo), el dosado estequiométrico, parámetros efectivos e indicados del motor, y comportamiento del vehículo en su totalidad para diferentes perfiles de velocidad, altitud, y proceder del conductor.

Además, se han implementado métodos de vinculación del comportamiento del motor para la creación de base de datos específicas para mapas característicos de consumo y emisiones de gases contaminantes, con respecto a parámetros constructivos y de funcionamiento del motor a diferentes regímenes de giro. Estos mapas característicos del motor se ajustan en mejor medida al fenómeno, por cuanto la utilización de los mapas estándar dentro de AVL CRUISE™, en las primeras fases de estudio, indicaban resultados con tendencias de incongruencia respecto a las esperadas según el estado de la técnica, en el caso de este motor y este vehículo en específico.

Finalmente, uno de los principales resultados es la creación de un conjunto de correlaciones estadísticas de efecto combinado que permitan establecer una relación analítica con respecto a las condiciones ambiente, tanto de las prestaciones del motor (BMEP), como del combustible (BSFC) y las emisiones (CO₂, NO_x, CO y Soot). Cabe apuntar que, en el caso de que se utilice un combustible diferente, también se ha agregado un factor de emisión e_{CO_2x} , con inclusión de un coeficiente que representa el grado de renovabilidad del combustible ε_{ren} , con valor 0 para combustibles fósiles y 1 para combustibles completamente renovables, asumiendo en primera aproximación que la eficiencia de la combustión sigue siendo similar.

Para avalar el trabajo de investigación y resultados obtenidos en la presente Tesis Doctoral, se ha publicado un artículo científico en Journals indexados, además de la exposición de abstract científico en la Conferencia Internacional de Contaminación del Aire y Transporte TAP Conference en conjunto con la App de Realidad Virtual Uva

Posters, desarrollada en conjunto con la empresa ecuatoriana BOOST-EC App Development Studio, como se indica a continuación:

Publicación científica indexada:

- Ceballos, J.J.; Melgar, A.; Tinaut, F.V. Influence of Environmental Changes Due to Altitude on Performance, Fuel Consumption and Emissions of a Naturally Aspirated Diesel Engine. *Energies* 2021, *14*, 5346.

<https://doi.org/10.3390/en14175346>

Indicadores de calidad: Energy and Fuels. Journal impact factor 3.004. Editorial MDPI. Lugar de publicación: Basilea, Suiza.

Trabajos enviados a conferencias internacionales:

- Ceballos, J.J.; Melgar, A.; Tinaut, F.V. Fuel consumption and pollutant emissions analysis of a Diesel engine for interurban buses depending on ambient and operative conditions. 23rd International Transport and Air Pollution Conference “2020 – 2030: Transport in critical transition”. Thessaloniki, Greece. 15-17 May 2019. Abstract + poster + poster exposition + app Android UVa Posters

7.3. Sugerencias para trabajos futuros

Como trabajos futuros se sugiere por un lado la continuación con la presente línea de investigación, con introducción de un modelo con un mayor número de componentes en AVL BOOST™, tomando en cuenta las características del sistema de inyección, además de la utilización de otros combustibles diferentes del diésel, como pueden ser los biocombustibles, o combustibles como el gas o el hidrógeno, para verificar como influye la variación de las condiciones ambientales en estos casos.

Además, se recomienda ampliar a un mayor número de condiciones ambientales a estudiar, por cuanto la orografía del Ecuador es muy variada, y contiene tres regiones principales, existiendo diferencias considerables aún dentro de las mismas regiones (diferencias entre zonas norte y sur entre regiones), con diferentes características de temperatura, presión atmosférica y humedad, con comunicación por vías de transporte terrestre de muy pocas horas una de otra.

Se recomienda también ampliar el conocimiento sobre la conformación de mapas característicos de consumo de combustible y emisiones del motor, su puesta a punto con características del sistema de inyección, incluyendo otros factores de influencia que ocurren dentro de la cámara de combustión, individualizados para aire seco, como para aire húmedo.

En cuestión del campo de aplicación en recorridos reales, agregando análisis sobre diferentes comportamientos del conductor en cuanto al perfil de velocidad, estudios en estado de carga parcial, y verificar la influencia sobre la carga de pasajeros, tomando en cuenta que, en Ecuador, en muchas ocasiones, la cantidad límite de personas por unidad y por recorrido, sentadas y de pie, se supera en proporciones bastante considerables.

Bibliografía

- AEADE, A. de E. A. del E. (2020a). *El diésel en Ecuador contamina cinco veces más que el combustible de otros países*. Boletín Informativo. <https://www.motorterra.com/el-diesel-en-ecuador-contamina-cinco-veces-mas-que-el-combustible-de-otros-paises/>
- AEADE, A. de E. A. del E. (2020b). *Mejores Combustibles, mejores vehículos*. Boletín Informativo. <https://www.motorterra.com/mejores-combustibles-mejores-vehiculos/>
- Agudelo, J., Agudelo, A., & Pérez, J. (2009). Análisis energético y exergético de un motor diesel de automoción operando en diferentes altitudes. *Revista Facultad de Ingeniería*, 48, 45–54.
- Akasyah, M. K., Mamat, R., Abdullah, A., Aziz, A., & Yassin, H. M. (2015). Effect of ambient temperature on diesel-engine combustion characteristics operating with alcohol fuel. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 11(1), 2373–2382. <https://doi.org/10.15282/ijame.11.2015.18.0199>
- Armijos Pineda, F., & Cueva Cueva, M. (2017). Determinación de los factores de emisión de los buses urbanos de la ciudad de Loja en la hora de mayor tráfico vehicular, mediante una metodología indirecta. [*Tesis de Grado*]. <https://bit.ly/3mY4fvV>
- AVL List GmbH. (2013). *Theory AVL BOOST VERSION 2013.2* (AVL List GmbH (ed.); 01.0114.20, Issue 11). AVL List GmbH.
- AVL List GmbH. (2017). *AVL Cruise - Version 2017 Primer* (Vol. 1, p. 44).
- Bermúdez, V., Serrano, J. R., Piqueras, P., Gómez, J., & Bender, S. (2017). Analysis of the role of altitude on diesel engine performance and emissions using an atmosphere simulator. *International Journal of Engine Research*, 18(1–2), 105–117. <https://doi.org/10.1177/1468087416679569>
- Bishop, G. A., Morris, J. A., Stedman, D. H., Cohen, L. H., Countess, R. J., Countess, S. J., Maly, P., & Scherer, S. (2001). The effects of altitude on heavy-duty diesel truck

- on-road emissions. *Environmental Science and Technology*, 35(8), 1574–1578.
<https://doi.org/10.1021/es001533a>
- Bouzada Outeda, P., Martinelli, G., & Cillero Hernández, A. (2009). *Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por autobús y autocar Energy consumption and emissions associated with transportation by bus*.
- Carmona Aparicio, L. G., Rincón Pérez, M. A., Castillo Robles, A. M., Galvis Remolina, B. R., Sáenz Pulido, H. E., Manrique Forero, R. A., & Pachón Quinche, J. E. (2016). Conciliación de inventarios top-down y bottom-up de emisiones de fuentes móviles en Bogotá, Colombia. *Revista Tecnura*, 20(49), 59.
<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a04>
- Ceballos Marcillo, J. J., & Tinaut Fluixá, F. V. (2016). *Simulación de consumo de combustible y emisiones de vehículos de transporte público de la ciudad de Ambato (Ecuador) mediante Copert 4* [Universidad de Valladolid].
<http://uvadoc.uva.es/handle/10324/16380>
- Chaffin, C. A., & Ullman, T. L. (1994). *Effects of Increased Altitude on Heavy-Duty Diesel Engine Emissions Reprinted from: Diesel Combustion Processes and Emission Control (SP-1028)*. 412, 1–9.
<https://doi.org/https://doi.org/10.4271/940669>
- Chen, P., Chen, P., & Virginia, W. (2010). *Optimization of a Heavy-Duty Hybrid Transit Bus Operated over Transient Cycles Optimization of a Heavy-Duty Hybrid Transit Bus Operated over Transient Cycles Department of Mechanical and Aerospace Engineering*.
- Comercio, D. El. (2016). *Seis urbes en Ecuador se exceden en contaminación ambiental, según OMS*. Revista Planeta. Seis urbes en Ecuador se exceden en contaminación ambiental, según OMS
- Cooper, E. (2013). Emisiones de escape de autobuses de transporte público. *Creative Commons*, 1–31.
- Delphi. (2018). *Delphi-Emissions for Heavy Duty and Off-Highway Vehicles 2018-2019*.

- Franco, V., Delgado, O., & Muncrief, R. (2015). Heavy Duty Vehicle Fuel Efficiency Simulation: A Comparison of US and EU Tools. *Icct, April*.
- Galindo, J., Serrano, J. R., Piqueras, P., & Gómez, J. (2014). Description and Performance Analysis of a Flow Test Rig to Simulate Altitude Pressure Variation for Internal Combustion Engines Testing. *SAE International Journal of Engines*, 7(4), 1686–1696. <https://doi.org/10.4271/2014-01-2582>
- García, F. V. (2014). *Diseño y Análisis del Sistema de Admisión de un Motor de Encendido Provocado para su Implantación en un Vehículo de Formula SAE*.
- Ghazikhani, M., Ebrahim Feyz, M., Mahian, O., & Sabazadeh, A. (2013). Effects of altitude on the soot emission and fuel consumption of a light-duty diesel engine. *Transport*, 28(2), 130–139. <https://doi.org/10.3846/16484142.2013.798743>
- Gil, E. (2010). *Maquinaria agrícola Tractor, preparación del suelo y siembra*. 49. <https://ocw.upc.edu/sites/all/modules/ocw/estadistiques/download.php?file=63082/2010/1/53476/28064-3822.pdf>
- Gil, J. G., & Cruz, J. R. S. (2018). *Development of an altitude simulator and analysis of the performance and emissions of turbocharged Diesel engines at different altitudes* [Universidad Politécnica de Valencia]. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/101284>
- Giraldo, M., & Huertas, J. I. (2019). Real emissions, driving patterns and fuel consumption of in-use diesel buses operating at high altitude. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 77(October), 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.10.004>
- Gómez-Acebo, T. (2004). Tema 9 - Mezclas de Gases Ideales. Aire Húmedo. In C. T. de la Universidad de Navarra (Ed.), *Apuntes de Termodinámica* (Vol. 1, pp. 9.2-9.27). Tecnun.
- He, C., Ge, Y., Ma, C., Tan, J., Liu, Z., Wang, C., Yu, L., & Ding, Y. (2011). Emission characteristics of a heavy-duty diesel engine at simulated high altitudes. *Science of the Total Environment*, 409(17), 3138–3143.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.01.029>

Hernández, M., Encalada, M., & Molina, S. (2010). Plan Nacional de Calidad del Aire. *Ministerio Del Medio Ambiente, 1*(Reintegración Comunitaria), 5–90.

Heywood, J. B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill.

Hiroyasu, H., Kadota, T., & Arai, M. (1983). Development and use of a spray combustion modeling to predict diesel engine efficiency and pollutant emissions Part 1: Combustion Modeling. *Bulletin of the JSME, 26*(214), 569–575. https://www.jstage.jst.go.jp/article/bpb1993/17/11/17_11_1460/_pdf/-char/ja

Hu, S., Yang, J., Jiang, Z., Ma, M., & Cai, W. (2021). CO2 emission and energy consumption from automobile industry in China: Decomposition and analyses of driving forces. *Processes, 9*(5). <https://doi.org/10.3390/pr9050810>

Human, D. M., Ullman, T. L., & Baines, T. M. (1990). *Simulation of High Altitude Effects on Heavy-Duty Diesel Emissions* (pp. 0–10). <https://doi.org/https://doi.org/10.4271/900883>

IDAE, I. para la D. y ahorro de la energía. (2005). *Manual de Conducción de vehículos*. 80.

INEN. (2012). *Clasificación vehicular. 1*, 1–15. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2656.pdf>

INEN. (2015). Normativa NTE INEN 1489 - Productos derivados del Petróleo. Diésel. Requisitos. In *Libro Anual de Normalización - Octava revisión*.

Interamericano, B. (2007). *Ecuador Análisis Ambiental País Informe Final*.

ISSRC. (2008). *Manual del Usuario del Modelo IVE Mayo*, 2008. 55.

Lapuerta, M., Armas, O., Agudelo, J. R., & Agudelo, A. F. (2006). Estudio del Efecto de la Altitud sobre el Comportamiento de Motores de Combustión Interna. Parte 2: Motores Diesel. *Información Tecnológica, 17*(5). <https://doi.org/10.4067/S0718-07642006000500006>

- Lapuerta, M., Armas, O., Agudelo, J. R., & Sánchez, C. A. (2006). Estudio del Efecto de la Altitud sobre el Comportamiento de Motores de Combustión Interna. Parte 1: Funcionamiento. *Información Tecnológica*, 17(5). <https://doi.org/10.4067/S0718-07642006000500005>
- Lapuerta, M., & Ballesteros, R. (2014). Emisiones contaminantes. In *Motores de Combustión Interna Alternativos* (4ta edición, pp. 416–443). Editorial Reverté, S.A., Editorial UPV.
- Lapuerta, M., & Hernández, J. J. (2014). Combustibles. In F. Payri & M. Desantes (Eds.), *Motores de Combustión Interna Alternativos* (Cuarta edición, pp. 390–413). Editorial Reverté, S.A., Editorial UPV.
- Lecuona Neumann, A., & Rodríguez Aumente, P. (2014). Capítulo 3: Parámetros Básicos. In F. P. González & J. M. D. Fernández (Eds.), *Motores de Combustión Interna Alternativos* (Cuarta edición, pp. 44–69). Editorial Reverté, S.A.
- Liu, D., Lou, D., Liu, J., Fang, L., & Huang, W. (2018). Evaluating nitrogen oxides and ultrafine particulate matter emission features of urban bus based on real-world driving conditions in the Yangtze River Delta Area, China. *Sustainability (Switzerland)*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/su10062051>
- Liu, Z., Ge, Y., Johnson, K. C., Shah, A. N., Tan, J., Wang, C., & Yu, L. (2011). Real-world operation conditions and on-road emissions of Beijing diesel buses measured by using portable emission measurement system and electric low-pressure impactor. *Science of the Total Environment*, 409(8), 1476–1480. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.12.042>
- Lizhong, S., Yungang, S., Wensheng, Y., & Junding, X. (1995). Combustion process of diesel engines at regions with different altitude. *SAE Technical Papers*, 950857(412), 249–253. <https://doi.org/10.4271/950857>
- Llamazares, M., Jos, P. E. Z., & Acad, P. E. Z. C. (2015). *Análisis y validación de varios mecanismos de cinética química por comparación con datos experimentales de un motor 2T de automoción y propuesta de un nuevo combustible de sustitución para la gasolina de 98 octanos*. Universitat Politècnica de Valencia.

- Mamat, R., Abdullah, N. R., Xu, H., Wyszynski, M. L., & Tsolakis, A. (2010). *Effect of Air Intake Pressure Drop on Performance and Emissions of a Diesel Engine Operating with Biodiesel and Ultra Low Sulphur Diesel (ULSD)* Key words. 1(7).
- Mayorga, C., Ruiz, M., & Aldas, D. (2020). Percepciones acerca de la contaminación del aire generada por el transporte urbano en Ambato, Ecuador. *Revista Espacios*, 41(17), 11. <http://ww.revistaespacios.com/a20v41n17/a20v41n17p11.pdf>
- Mccormick, R. L., Graboski, M. S., Newlin, A. W., Ross, J. D., Graboski, M. S., Newlin, A. W., Effect, J. D. R., Mccormick, R. L., Graboski, M. S., Newlin, A. W., & Ross, J. D. (2012). *Effect of Humidity on Heavy-Duty Transient Emissions from Diesel and Natural Gas Engines at High Altitude Effect of Humidity on Heavy-Duty Transient Emissions from Diesel and Natural Gas Engines at High Altitude*. 2247. <https://doi.org/10.1080/10473289.1997.10463937>
- Melgarejo, J. (2015). *Preparación De Un Modelo Termodinámico De Un Motor Generador Diésel Rápido* .
- Morales, M. Y. R., & Guzmán, A. H. (2012). *Manual de Conducción Técnica de Vehículos Automotores Diesel*. 360. <http://www.inegi.inifap.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt360.pdf>
- NTE INEN 1323. (2009). *Vehiculos Automotores. Carrocerias De Buses. Requisitos*. 6–8. <http://www.tungurahua.gob.ec/carrocero/wp-content/uploads/2016/09/NTE-1323.pdf>
- Ntziachristos, L., Samaras, Z., Kouridis, C., Hassel, D., Mccrae, I., Hickman, J., Zierock, K., Andre, M., Winther, M., Gorissen, N., Boulter, P., Joumard, R., Rijkeboer, R., Geivanidis, S., & Hausberger, S. (2012). *EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009, updated May 2012 1. May*.
- Ntziachristos, L., Samaras, Z., Kouridis, C., Hassel, D., Mccrae, I., Hickman, J., Zierock, K., Andre, M., Winther, M., Gorissen, N., Boulter, P., Joumard, R., Rijkeboer, R., Geivanidis, S., & Hausberger, S. (2020). EEA Road transport 2019. *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019 – Update Oct. 2020*, 53(9), 1689–

- 1699.
- Och, S. H., Moura, L. M., Mariani, V. C., Coelho, L. dos S., Velásquez, J. A., & Domingues, E. (2016). Volumetric efficiency optimization of a single-cylinder D.I. diesel engine using differential evolution algorithm. *Applied Thermal Engineering*, *108*, 660–669. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.042>
- Olivo Barragán, F. F. (2018). *Trucaje mecánico y volumetrico del motor Volkswagen 1,6 del año 1998*. Universidad Tecnológica Equinoccial.
- Onorati, A., Ferrari, G., & D'Enrrico, G. (2001). 1D Unsteady Flows with Chemical Reactions in the Exhaust Duct-System of S.I. Engines: Predictions and Experiments. *SAE Paper*, 2001-01-0939.
- Páez, C. (2012). Gestión de la contaminación atmosférica urbana: El caso de Quito. *Flacso*, 1–17. <http://www.flacsoandes.edu.ec/web/imagesFTP/10088.ContaminacionQuito.pdf>
- Parlamento Europeo. (1999). *Directiva 1999/96/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de Diciembre de 1999* (Issue 3).
- Parlamento Europeo. (2001). *Directiva 2001/27/CE de la Comisión y el Consejo Europeo*. 2001(2), 210–230.
- Pattas, K., & Häfner, G. (1973). Stickoxidbildung bei der ottomotorischen Verbrennung. *MTZ*, *12*, 397–404.
- PBMC. (2016). *Mudanças Climáticas e Cidades: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas*. <http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/pt/publicacoes/relatorios-especiais-pbmc/item/relatorio-especial-mudancas-climaticas-e-cidades>
- Puentestar Bedón, J. S., & Santiago, J. (2019). *Grupos estacionarios diésel y la contaminación ambiental en la florícola Piganflor de la comunidad de Piganta*. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/17988>
- Ríos Bedoya, V., Marquet Sardà, O., & Miralles i Guasch, C. (2016). Estimación de las emisiones de CO₂ desde la perspectiva de la demanda de transporte en Medellín.

- Revista Transporte y Territorio*, 0(15), 302–322.
<https://doi.org/10.34096/rtt.i15.2862>
- Rojas, N. Y. (2004). Revisión de las emisiones de material particulado por la combustión de diesel y biodiesel. *Revista de Ingeniería*, 20, 58–68.
<https://doi.org/10.16924/revinge.20.7>
- Sánchez, L. G., Fabela, M. de J., Flores, O., Hernández, J. R., Vázquez, D., & Cruz, M. E. (2019). *Revisión de la Normativa Internacional sobre Límites de Emisiones Contaminantes de Vehículos de Carretera*. 562, 83.
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt562.pdf>
- Sáenz Acebes, S. (2017). Características de los Motores. In *Motores* (Primera ed, p. 408). Editorial Editex, S.A. <https://books.google.es/books?id=cVwpDwAAQBAJ>
- Schubiger, R. A., Boulouchos, K., & M.K., E. (2002). Rußbildung und Oxidation bei der dieselmotorischen Verbrennung. *MTZ*, 5/2002, 342–353.
- Sebastian, D., & Vargas, C. (2018). *transporte Transmilenio en la ciudad de Bogotá*. 53.
- SECTRA, P. de vialidad y transporte urbano. (2014). *Encuesta origen y destino de viajes 2012*. 84.
- Serrano, J. R., Piqueras, P., Sanchis, E. J., & Diesel, B. (2019). A modelling tool for engine and exhaust aftertreatment performance analysis in altitude operation. *Results in Engineering*, 4(August), 100054.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100054>
- Szedlmayer, M., & Kweon, C. B. M. (2016). Effect of Altitude Conditions on Combustion and Performance of a Multi-Cylinder Turbocharged Direct-Injection Diesel Engine. *SAE Technical Papers*, 2016-April(April).
<https://doi.org/10.4271/2016-01-0742>
- Tapia, L., Soria, J. C., Samaniego, C., Molina Chávez, R., & Gordillo Cueva, V. (2010). *Proyecto Calidad del Aire Fase III Año Base 2010 Gobierno Nacional del Ecuador*.
<http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/05/Libro-Resumen-Inventario-13-02-2014-prensa.pdf>

- Tibaquirá, J. E., & Burbano, J. C. (2003). Técnicas para controlar las emisiones de NOx en turbinas de gas. *SCIENTIA ET TECHNICA* N° 21, 1, 95–99. <https://doi.org/https://doi.org/10.22517/23447214.7503>
- Toback, A. T., Hearne, J. S., Kuritz, B., Marchese, A. J., & Hesketh, R. P. (2004). The Effect of Ambient Temperature and Humidity School Buses. *SAE Technical Paper*, 2004(724).
- Varga, B. O., Iclodean, C., & Mariasiu, F. (2016). *Electric and Hybrid Buses for Urban Transport Energy Efficiency Strategies*.
- Velasco Hurtado, C., & Velasco Villarroel, J. (2014). Efectos de la altitud sobre la combustión Effects of altitude in the combustion. *Revista Metalúrgica No. 35*, 35, 20–29.
- Wang, X., Ge, Y., Yu, L., & Feng, X. (2013). Effects of altitude on the thermal efficiency of a heavy-duty diesel engine. *Energy*, 59, 543–548. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.050>
- Yang, M., Gu, Y., Deng, K., Yang, Z., & Zhang, Y. (2018). Analysis on altitude adaptability of turbocharging systems for a heavy-duty diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 128, 1196–1207. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.065>
- York, L., & Products, F. P. (2016). *Making Sense of Diesel Engine Specs*.
- Yu, K., Song, C. Q., Fan, L. Y., & Qin, H. (2013). Simulation and analysis of the hybrid bus performance based on AVL-cruise. *Advanced Materials Research*, 712–715, 1221–1225. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.712-715.1221>
- Yu, L., Ge, Y., Tan, J., He, C., Wang, X., Liu, H., Zhao, W., Guo, J., Fu, G., Feng, X., & Wang, X. (2014). Experimental investigation of the impact of biodiesel on the combustion and emission characteristics of a heavy duty diesel engine at various altitudes. *Fuel*, 115(X), 220–226. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.06.056>
- Yu, Q., Li, T., & Li, H. (2016). Improving urban bus emission and fuel consumption modeling by incorporating passenger load factor for real world driving. *Applied*

Energy, 161, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.096>

Zambrano Mantilla, R. A., & Núñez Prada, C. M. (2013). *Obtención de las curvas de desempeño de un motor de combustión interna alternativo en un banco de pruebas* [Universidad Politécnica Bolivariana]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/imre.12028/abstract>

Zhu, Z. X., Zhang, F. J., Li, C. J., & Han, K. (2014). Calibration for Fuel Injection Parameters of the Diesel Engine Working at Plateau via Simulating. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/621946>

Zhu, Z., Zhang, F., Li, C., Wu, T., Han, K., Lv, J., Li, Y., & Xiao, X. (2015). Genetic algorithm optimization applied to the fuel supply parameters of diesel engines working at plateau. *Applied Energy*, 157, 789–797. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.126>

Anexo I

Extractos de las normas INEN ecuatorianas utilizadas

Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1489. 8va Revisión
“PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO. DIÉSEL. REQUISITOS”



Quito – Ecuador

NORMA
TÉCNICA
ECUATORIANA

NTE INEN1489
Octava revisión

PRODUCTOS DERIVADOS DE PETRÓLEO. DIÉSEL. REQUISITOS

PETROLEUM PRODUCTS. DIESEL REQUIREMENTS

PROYECTO A2

NTE INEN 1489

PRODUCTOS DERIVADOS DE PETRÓLEO DIÉSEL REQUISITOS

1. OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma establece los requisitos que debe cumplir el diésel.

2. REFERENCIAS NORMATIVAS

Los siguientes documentos, en su totalidad o en parte, son indispensables para su aplicación. Para referencias fechadas, solamente aplica la edición citada. Para referencias sin fecha, aplica la última edición (incluyendo cualquier enmienda).

EN 14078, *Liquid petroleum products - Determination of fatty acid methyl ester (FAME) content in middle distillates - Infrared spectrometry method*

NTE INEN 2266, *Transporte, almacenamiento y manejo de materiales peligrosos. Requisitos*

NTE INEN 2341, *Productos del petróleo. Productos relacionados con el petróleo y afines. Definiciones*

ASTM D86, *Standard test method for distillation of petroleum products and liquid fuels at atmospheric pressure*

ASTM D93, *Standard test methods for flash point by Pensky-Martens closed cup tester*

ASTM D130, *Standard test method for corrosiveness to copper from petroleum products by copper strip test*

ASTM D445, *Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity)*

ASTM D482, *Standard test method for ash from petroleum products*

ASTM D976, *Standard test method for calculated cetane index of distillate fuels*

ASTM D2622, *Standard test method for sulfur in petroleum products by wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry*

ASTM D2709, *Standard test method for water and sediment in middle distillate fuels by centrifuge*

ASTM D4057, *Standard practice for manual sampling of petroleum and petroleum products*

ASTM D4177, *Standard practice for automatic sampling of petroleum and petroleum products*

ASTM D4294, *Standard test method for sulfur in petroleum and petroleum products by energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry*

ASTM D4530, *Standard test method for determination of carbon residue (Micro method)*

ASTM D5453, *Standard test method for determination of total sulfur in light hydrocarbons, spark ignition engine fuel, diesel engine fuel, and engine oil by ultraviolet fluorescence*

3. TÉRMINOS Y DEFINICIONES

Para los efectos de esta norma, se adoptan las definiciones contempladas en NTE INEN 2341.

NTE INEN 1489

4. CLASIFICACIÓN

Para efectos de esta norma, el diésel se clasifica en tres tipos:

- a) **Diésel No. 1.** Combustible utilizado en equipos de combustión industrial o doméstico.
- b) **Diésel No. 2.** Combustible utilizado en el sector industrial.
- c) **Diésel premium.** Combustible con bajo contenido de azufre, utilizado en el sector automotriz.

5. REQUISITOS

El diésel No. 1, No. 2 y premium, debe almacenarse y transportarse de acuerdo con lo establecido en NTE INEN 2266.

El diésel No. 1, No. 2 y premium ensayado, debe cumplir con los requisitos establecidos en la tabla 1.

TABLA 1. Requisitos para el diésel

Requisito	Unidad	Diésel No. 1		Diésel No. 2		Diésel premium		Método de ensayo
		mín.	máx.	mín.	máx.	mín.	máx.	
Punto de inflamación	°C	40	--	51	--	51	--	ASTM D93
Contenido de agua y sedimento	% ^a	--	0,05	--	0,05	--	0,05	ASTM D2709
Contenido de ceniza	% ^b	--	0,01	--	0,01	--	0,01	ASTM D482
Contenido de azufre	% ^b	--	0,3	--	0,7	--	0,05	ASTM D2622 ASTM D4294 ASTM D5453
Contenido de residuo carbonoso sobre el 10 % de residuo destilado	% ^b	--	0,1	--	0,1	--	0,1	ASTM D4530
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm ² /s	1,3	2,4	2,0	5,0	2,0	5,0	ASTM D445
Temperatura de destilación del 90 %	°C	--	288	--	360	--	360	ASTM D86
Corrosión a la lámina de cobre	--	--	1a	--	1a	--	1a	ASTM D130
Índice de cetano calculado	--	No aplica		45	--	45	--	ASTM D976
Contenido de biodiésel ^c	% ^a	No contiene		--	5	5	10	EN 14078
^a % corresponde a fracción de volumen expresada en porcentaje. ^b % corresponde a fracción de masa expresada en porcentaje. ^c La determinación del contenido de biodiesel se debe realizar cuando esté adicionado en el diésel.								

6. MUESTREO

El muestreo del diésel No. 1, No. 2 y premium, debe realizarse de acuerdo con lo establecido en ASTM D4057 y ASTM D4177.

Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2656:2012. 1era Revisión
“CLASIFICACIÓN VEHICULAR”

CDU: 629-1-4
ICS: 43.020



CIIU: 3843
MC 08.16-101

Norma Técnica Ecuatoriana Voluntaria	CLASIFICACIÓN VEHICULAR	NTE INEN 2656:2012 2012-11
--------------------------------------	-------------------------	----------------------------

1. OBJETO

1.1 Esta norma establece la clasificación de los vehículos automotores identificados mediante características generales de diseño y uso.

2. ALCANCE

2.1 Esta norma se aplica a todos los vehículos diseñados para circulación terrestre (vehículos automotores y unidades de carga).

2.2 Esta norma no comprende máquinas tales como tractores agrícolas, forestales, maquinaria industrial y equipo caminero.

3. DEFINICIONES

3.1 Para los efectos de esta norma, se adoptan las definiciones establecidas en el RTE INEN 034, en el Reglamento de aplicación a la Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial, y las que a continuación se detallan:

3.1.1 *Asiento*. Estructura ergonómica fijada al vehículo, de configuración adecuada para que la persona se siente, pudiendo ser este individual o múltiple.

3.1.2 *Capacidad de arrastre*. Peso máximo de diseño a ser remolcado por un automotor.

3.1.3 *Capacidad de carga*. Carga útil máxima permitida para la cual fue diseñado el vehículo.

3.1.4 *Carrocería*. Estructura que se adiciona al chasis de forma fija para el transporte de personas y/o carga.

3.1.5 *Chasis*. Estructura básica del vehículo compuesta por el bastidor, el tren motriz y otras partes mecánicas relacionadas.

3.1.6 *Eje*. Elemento mecánico que sirve de soporte del vehículo a través de la suspensión y permite la movilidad del mismo.

3.1.7 *Pasajero*. Persona que hace uso del servicio de transporte público o privado para trasladarse de un lugar a otro.

3.1.8 *Peso Bruto Vehicular (PBV)*. Peso en vacío (Tara) del vehículo más la capacidad de carga de diseño.

3.1.9 *Peso Bruto Vehicular Combinado*. Peso Bruto Vehicular más la capacidad de arrastre.

3.1.10 *Peso en vacío (Tara)*. Peso del vehículo en orden de marcha, sin incluir la carga o pasajeros (incluye el peso del combustible con los tanques llenos, herramientas y rueda(s) de repuesto).

3.1.11 *Plaza*. Espacio físico destinado para una persona (sentada o de pie).

3.1.12 *Vehículo*. Medio para transporte de personas o mercancías, pudiendo ser motorizado o no.

3.1.13 Vehículo especial. Vehículo que realiza una función específica. No se consideran vehículos especiales las máquinas y equipos diseñados y fabricados exclusivamente para el uso fuera de las vías públicas, en la industria de la construcción, minería y agricultura.

4. CLASIFICACIÓN

4.1 Los vehículos se clasifican en:

4.1.1 Categoría L. Vehículos automotores con menos de 4 ruedas.

4.1.1.1 L1: Vehículos de dos ruedas, de hasta 50 cm³ y velocidad máxima de 50 km/h.

4.1.1.2 L2: Vehículos de tres ruedas, de hasta 50 cm³ y velocidad máxima de 50 km/h.

4.1.1.3 L3: Vehículos de dos ruedas, de más de 50 cm³ o velocidad mayor a 50 km/h.

4.1.1.4 L4: Vehículos de tres ruedas asimétricas al eje longitudinal del vehículo, de más de 50 cm³ o una velocidad mayor de 50 km/h.

4.1.1.5 L5: Vehículos de tres ruedas simétricas al eje longitudinal del vehículo, de más de 50 cm³ o velocidad mayor a 50 km/h y cuyo peso bruto vehicular no exceda de una tonelada.

4.1.2 Categoría M. Vehículos automotores de cuatro ruedas o más diseñados y construidos para el transporte de pasajeros.

4.1.2.1 M1: Vehículos de 8 asientos o menos, sin contar el asiento del conductor.

4.1.2.2 M2: Vehículos de más de 8 asientos, sin contar el asiento del conductor y peso bruto vehicular de 5 toneladas o menos.

4.1.2.3 M3: Vehículos de más de 8 asientos, sin contar el asiento del conductor y peso bruto vehicular de más de 5 toneladas.

Los vehículos de las categorías M2 y M3, a su vez, de acuerdo a la disposición de los pasajeros se clasifican en:

a) Clase I. Vehículos construidos con áreas para pasajeros de pie permitiendo el desplazamiento frecuente de estos.

b) Clase II. Vehículos construidos principalmente para el transporte de pasajeros sentados y, también diseñados para permitir el transporte de pasajeros de pie en el pasadizo y/o en un área que no excede el espacio provisto para dos asientos dobles.

c) Clase III. Vehículos construidos exclusivamente para el transporte de pasajeros sentados.

4.1.3 Categoría N. Vehículos automotores de cuatro ruedas o más diseñados y construidos para el transporte de mercancías.

4.1.3.1 N1: Vehículos de PBV de 3,5 toneladas o menos.

4.1.3.2 N2: Vehículos de PBV mayor a 3,5 hasta 12 toneladas.

4.1.3.3 N3: Vehículos de PBV mayor a 12 toneladas.

4.1.4 Categoría O. Remolques (incluidos semiremolques).

4.1.4.1 O1: Remolques de PBV de 0.75 toneladas o menos.

4.1.4.2 O2: Remolques de PBV mayor a 0,75 hasta 3,5 toneladas.

4.1.4.3 O3: Remolques de PBV mayor a 3,5 hasta 10 toneladas.

4.1.4.4 O4: Remolques de PBV mayor a 10 toneladas.

4.1.5 Combinaciones especiales. Adicionalmente, los vehículos de las categorías M, N y O para el transporte de pasajeros o mercancías que realizan una función específica, para la cual requieren carrocerías y/o equipos especiales, se clasifican en:

4.1.5.1 SA: Casas rodantes

4.1.5.2 SB: Vehículos blindados para el transporte de valores

4.1.5.3 SC: Ambulancias

4.1.5.4 SD: Vehículos funerarios

4.1.5.5 SE: Bomberos


4.1.5.6 SF: Vehículos celulares

4.1.5.7 SG: Porta tropas

4.1.5.8 Otros

4.2 Los símbolos que anteceden deben ser combinados con el símbolo de la categoría a la que pertenece, por ejemplo: Un vehículo de la categoría N1 convertido en ambulancia debe ser designado como N1SC, según lo establecido en el Anexo A de esta norma.

(Continuación Anexo A)

CÓDIGO	SUBCLASE	CLASE	DESCRIPCIÓN
AMB	SC	AMBULANCIA 	Vehículo automotor diseñado y acondicionado para trasladar y/o dar primeros auxilios a heridos o enfermos y para cuidados en emergencias médicas.
MCB	M2	MICROBÚS 	Vehículo orientado al transporte de pasajeros, con un espacio interno para la circulación de pasajeros (corredor central). El número de plazas puede ser hasta 26.
MNB	M3	MINIBÚS 	Vehículo orientado al transporte de pasajeros, con un espacio interno para la circulación de pasajeros (corredor central) El número de plazas puede ser hasta 60.
BUS	M3	BUS 	Vehículo destinado al transporte de pasajeros, con un espacio interno para la circulación de pasajeros (corredor central) El número de plazas puede ser hasta 90.
BDP	M3	BUS DE DOS PISOS 	Vehículo destinado al transporte de pasajeros, de dos plantas, con espacios internos para la circulación de pasajeros.
BCO	M3	BUS COSTA 	Vehículo diseñado para el transporte de pasajeros y mercancías a partir de un chasis cabinado. El volúmen de pasajeros no posee puertas ni ventanas.

(Continuación Anexo A)

CÓDIGO	SUBCLASE	CLASE	DESCRIPCIÓN
ART	M3	ARTICULADO	Formado por dos o más secciones rígidas, articuladas entre sí, en el cual los compartimentos de pasajeros de cada sección se intercomunican, de manera que los pasajeros pueden desplazarse libremente por ellos.
CML	N1	CAMIÓN LIGERO	Vehículo para el transporte de carga provisto de un chasis cabinado al que se puede montar una estructura para transportar carga, con un número de 2 ejes.
CMM	N2	CAMIÓN MEDIANO	Vehículo para el transporte de carga provisto de un chasis cabinado al que se puede montar una estructura para transportar carga, con un número de 2 ejes.
CMP	N3	CAMIÓN PESADO	Vehículo para el transporte de carga provisto de un chasis cabinado al que se puede montar una estructura para transportar carga, con un número de 2 o más ejes.

Anexo II

Artículos publicados y abstracts presentados

Artículo científico publicado en la revista *Energies* 2021, 14, 5346:



Article

Influence of Environmental Changes due to Altitude on Performance, Fuel Consumption and Emissions of a Naturally Aspirated Diesel Engine

John Jairo Ceballos ^{1,*}, Andrés Melgar ¹ and Francisco V. Tinaut ²

¹ Department of Energy and Fluid-Mechanics Engineering, University of Valladolid, Paseo del Cause, 59, 47011 Valladolid, Spain; andmel@eii.uva.es

² CMT—Motores Térmicos, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain; ftinaut@mot.upv.es

* Correspondence: johnjairo.cebillos@alumnos.uva.es; Tel.: +34-651-710-442

Abstract: The present study shows the effects of environmental conditions (atmospheric temperature, pressure and relative humidity) due to altitude changes on performance, fuel consumption and emissions in a naturally aspirated diesel engine. Due to changes in altitude, the atmospheric conditions are altered, mainly the air density, associated to hydrostatic pressure, temperature profile and humidity and relative nitrogen/oxygen ratio, thus modifying the engine intake conditions. The study considers changes in altitude from sea level to 2500 m above sea level, which are representative of the orographic conditions in Ecuador. As a main part of this research, a parametric study of variation of atmospheric temperature, pressure and relative humidity is carried out in AVL BOOST™, showing the effects on mean effective pressure, fuel consumption and specific pollutant emissions (CO₂, NO_x, CO and soot). The study considers effects at regional level (change from an altitude to another) and local level (changes in the atmospheric conditions due to local anticyclone or storm, temperature and humidity). The quantitative effects are expressed in the form of sensitivity coefficients, e.g., relative change in an engine output variable due to the change in atmospheric pressure, temperature or humidity. In addition, several global correlations have been obtained to provide analytical expressions to summarize all results obtained, showing the separate effect of pressure and temperature on each engine performance variable.

Citation: Ceballos, J.J.; Melgar, A.; Tinaut, F.V. Influence of Environmental Changes due to Altitude on Performance, Fuel Consumption and Emissions of a Naturally Aspirated Diesel Engine. *Energies* **2021**, *14*, x. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>




Academic Editor(s): Leonid Tartakovsky

Keywords: AVL BOOST; combustion engine; high altitude; environmental effects; pollutant emissions

Abstract presentado en la Conferencia Internacional de Contaminación del Aire y Transporte TAP Conference 2019, Thessaloniki, Greece. 15 – 17 May 2019.:

Fuel consumption and pollutant emissions analysis of a Diesel engine for interurban buses depending on ambient and operative conditions.


J. J. Ceballos, F. V. Tinaut and A. Melgar
 Department of Energy and Fluid Mechanics Engineering,
 Engineering School University of Valladolid, 47011 Valladolid, Spain
 johnjairo.ceballos@alumnos.uva.es

Introduction

- The present research analyzes the influence of the ambient conditions (atmospheric pressure, temperature and humidity) and operative conditions on the performance of the Diesel engine of interurban buses. The performance of the mentioned engines, their fuel consumption FC and polluting emissions levels, varies for different orographic conditions, specially in Ecuador with high altitude differences between its important cities: Guayaquil (4 MAMSL), Tena (698 MAMSL) and Ambato (2500 MAMSL) to name a few.
- The engine considered is an ADE 360N Series Diesel Engine, mainly used on Mercedes Benz 1721/52 intercity buses. The engine is naturally aspirated, with 6 cylinders and a total displacement of 6 liters, without post treatment emission systems.
- AVL Cruise, AVL Boost, SpeedTrackerGPS, Google Earth and TCX Converter have been used jointly throughout the investigation.

Methodology for engine performance analysis by simulation and experimental results comparison.



Mercedes Benz 1721/52 Technical Data:

- Diesel engine: ADE OM366N, 6cyl in line
- Gearbox: MG B 85-6, manual.
- Compression Ratio: 17.25:1.
- Power: 100kW, 134 hp@2800 rpm.
- Torque: 408 Nm, 301 lb.ft@1400 rpm.

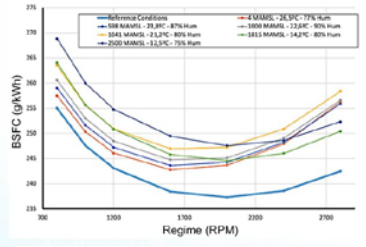
Data obtained through AVL Boost software:

- Engine Power and Torque.
- Air/Fuel ratio and Injected Fuel Mass.
- Volumetric, indicated and effective engine efficiency.
- BMEP and High Pressure Combustion characteristics.
- Diesel Mass Fraction Burned, Double Vibe characteristics.
- Flow coefficients and losses.

Data obtained through AVL Cruise software:

- Engine Power and Torque transmitted to wheels.
- Fuel Consumption, NOx, CO, HC and Soot emission rate.
- Efficiency at current gear.
- Slope and aerodynamic profile effects.
- Catalyst performance.
- Information on complementary mechanical characteristics.

Simulation model adjustment for orographic configuration in Ecuador

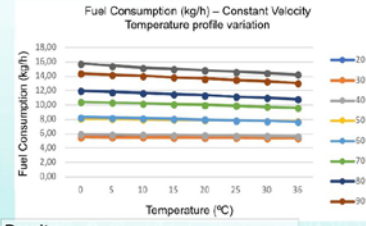


AVL Boost – AVL Cruise data analysis:

- Initial case with single cylinder configuration.
- Double Vibe study profile for Diesel combustion process approximation.
- Ignition timing diagrams (timing advance and timing retard).
- Injected Fuel Mass according to air/fuel ratio parameters.

Initial adjustment of the simulation model – Case Studies:

- 1 km Urban Driving Cycle (UDC).
- 100 km Random Cycle Gen.
- AVL vs COPERT 4 on urban routes analysis in Ambato.
- AVL Cruise using real altitude profile of Ambato
- AVL Cruise using real altitude, humidity and atmospheric pressure profiles of Ambato and speed profile from the vehicle.

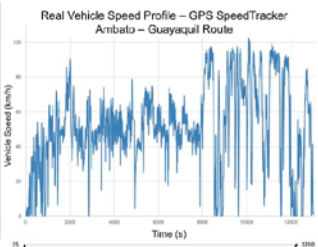


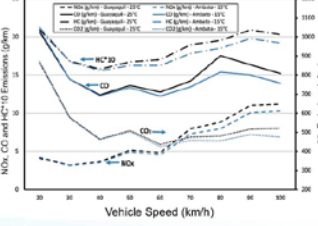
Individual parametric study:

- Test cases at different vehicle speed profiles.
- Test cases with individual temperature variation.
- Test cases with individual humidity variation.
- Test cases with individual atmospheric pressure variation.
- Aerodynamic and Coast Down analysis.

Intercity routes model adjustment:

- Intercity bus round trip with recorded speed by GPS.
- Ambato – Guayaquil route with real altitude profile.
- Temperature and ambient humidity profile analysis using the Meteorological Yearbook developed by the Ecuadorian Ministry of Environment.
- Bus load simulation (empty, half load, full load, overload.)





Results:

- According to the AVL Boost simulation model of the engine only, relative to the reference conditions (0 MAMSL, 15°C, 50% relative humidity), there is an increase in the brake specific fuel consumption BSFC of 2.46 g/kWh (Guayaquil, 4 MAMSL, 26.5°C, 77% relative humidity), 14.27 g/kWh (Ambato, 2500 MAMSL, 12.5°C, 75% relative humidity) at low engine rpms (<1600 rpm), as well as a BSFC increase of 13.8 g/kWh (Guayaquil, 4 MAMSL, 26.5°C, 77% relative humidity) and 10.27 g/kWh (Ambato, 2500 MAMSL, 12.5°C, 75% relative humidity) at high rpms (>1800 rpm).
- Since atmospheric conditions also affect the energy needed to propel the bus, simulations of the complete intercity bus have been made with the AVL Cruise simulation model. At typical vehicle speeds (70km/h – 100 km/h), the effects of atmospheric pressure in Ambato (0.751 bar) compared to Guayaquil (1.013 bar) on FC and CO₂ emissions experiences the opposite effect of just considering the engine alone, with a decrease between 3.8% at 70 km/h and 8.7% at 100 km/h. Regarding NO_x, CO and HC, the emission rates follow the same trend, with reductions at 80 km/h of 9.8% NO_x, 12.15% CO and 5.6% HC. At low vehicle speeds, however there is not a significant emissions variation.

23rd International Transport and Air Pollution Conference. Thessaloniki, Greece. 15 – 17 May, 2019

App Uva posters presentada en la Conferencia Internacional de Contaminación del Aire y Transporte TAP Conference 2019, Thessaloniki, Greece. 15 – 17 May 2019.:



UvA Posters

Interested in more information about an UvA Scientific Poster? UvA Poster App gives you access to additional features as: UvA Researcher Profile, related Abstract / Articles, Augmented Reality features and more...

UvA Search
Search the Poster in our UvA Posters Database, using the UvA Reference Code or the Researcher Last Name.

UvA Profile
Complete contact information, including research stats, Researchgate, LinkedIn profiles, UvA mail and Whatsapp phone number.

Augmented Reality
Some of the UvA Posters include Augmented Reality features to give extra information as: tables, graphics, animations and more.

Related Abstracts / Articles
Along with the Poster, you can check related abstract and article documents, with exact information and other scientific sources.

BOOST App Development Studio
Calle Cerrada, 47010, Valladolid, Spain
Phone: +34 651710442
Email: contact@boostapps.com

GET IT ON Google play

HOW TO USE THE AUGMENTED REALITY FEATURE:

1. Click on any Poster Item
2. If available, click on the Augmented Reality button
3. Wait until the AR Engine starts.
4. Point at any of the AR Frames located in the Poster using your mobile device camera.
5. Click on the prev/next buttons for even more information.
6. Click on the x button to return to home menu.

HOW TO USE THE UVA QR READER FEATURE:

1. Click on the QR Reader item button.
2. Wait until the QR Reader Engine starts.
3. Point at the UvA QRCode* located right next to this information using your mobile device camera.
5. Select the Poster.

*This QRCode only works with UvA Posters app.