

DOI: <https://doi.org/10.70208/3007.8245.v6.n1.418>

Efecto de la presión atmosférica en el sistema de alimentación durante el proceso de admisión en motores a gasolina operando entre 200 y 4500 m s.n.m.

Angel Vidal Baltazar Colque

Angel4balta@gmail.com<https://orcid.org/0009-0003-9788-2926>Universidad Técnica de Oruro – Facultad Técnica
Bolivia**RESUMEN**

El presente estudio analiza el efecto de la variación de la presión atmosférica, asociada a cambios de altitud comprendidos entre 200 y 4500 metros sobre el nivel del mar, sobre el sistema de alimentación durante el proceso de admisión en motores a gasolina de aspiración natural. La investigación se desarrolla bajo un enfoque descriptivo-analítico, a partir de la determinación de la presión atmosférica en función de la altitud y la temperatura promedio local, con el propósito de evaluar su incidencia en la masa de aire admitida por el cilindro. Mediante la aplicación de modelos teóricos de presión y densidad del aire, se establece la relación entre la disminución progresiva de la presión atmosférica y la reducción del llenado volumétrico del motor a medida que incrementa la altitud de operación. Los resultados obtenidos permiten interpretar las consecuencias de estas variaciones sobre el desempeño del motor, particularmente en lo referido a la eficiencia volumétrica y a la pérdida de potencia en condiciones altimétricas significativas. El estudio aporta criterios técnicos fundamentados para la comprensión del comportamiento de motores a gasolina bajo distintas condiciones de altitud, y constituye una base para el desarrollo de estrategias de ajuste y compensación en aplicaciones automotrices.

Palabras clave: presión atmosférica, proceso de admisión, motores a gasolina de aspiración natural, eficiencia volumétrica, altitud



Effect of Atmospheric Pressure on the Fuel Supply System During the Intake Process in Gasoline Engines Operating Between 200 and 4500 m a.s.l.

ABSTRACT

This study analyzes the effect of atmospheric pressure variation, associated with altitude changes between 200 and 4500 meters above sea level, on the fuel supply system during the intake process in naturally aspirated gasoline engines. The research follows a descriptive-analytical approach, based on determining atmospheric pressure as a function of altitude and local average temperature, in order to assess its impact on the mass of air entering the cylinder. Through the application of theoretical models of air pressure and density, the relationship between the progressive decrease in atmospheric pressure and the reduction of volumetric air filling in the engine as altitude increases is established. The results obtained allow for the interpretation of the consequences of these variations on engine performance, particularly regarding volumetric efficiency and power loss under significant altitude conditions. This study provides well-founded technical criteria for understanding the behavior of naturally aspirated gasoline engines under different altimetric conditions, and serves as a basis for developing adjustment and compensation strategies in automotive applications.

Keywords: atmospheric pressure, intake process, naturally aspirated gasoline engines, volumetric efficiency, altitude



INTRODUCCIÓN

La operación de los motores a gasolina atmosféricos se ve fuertemente influenciada por las condiciones del entorno, entre las cuales la presión atmosférica ocupa un lugar determinante al intervenir directamente en el proceso de admisión al ingresar la sustancia de trabajo que es el aire. En regiones donde la altitud varía de manera significativa, como ocurre entre 200 y 4500 metros sobre el nivel del mar, las variaciones de presión y densidad del aire modifican la cantidad de mezcla de aire-combustible disponible para el proceso de combustión, afectando el desempeño del motor. Esta situación resulta especialmente relevante en contextos del altiplano, donde los vehículos deben operar en amplios rangos altimétricos en un mismo territorio.

El sistema de alimentación durante el proceso de admisión está diseñado bajo ciertos supuestos de presión y temperatura atmosférica (ambiente) que no siempre se cumplen en condiciones reales de altura. A medida que la altitud aumenta, la disminución de la presión atmosférica reduce la masa de aire que ingresa al cilindro en cada ciclo de trabajo, lo que repercute en la eficiencia volumétrica y, en consecuencia, en la potencia efectiva del motor. Comprender de manera cuantitativa y cualitativa cómo se produce esta variación constituye un aspecto técnico clave para la adecuada selección, ajuste y mantenimiento de motores a gasolina en zonas de gran diversidad altimétrica.

Diversos estudios de termodinámica aplicada y de ingeniería automotriz han descrito el efecto de la altitud sobre el rendimiento de los motores de combustión interna, mostrando una correlación entre la reducción de presión y la pérdida de potencia. Sin embargo, en muchos casos estos análisis se presentan de forma general, sin considerar rangos específicos de altitud ni las condiciones atmosféricas locales de temperatura. En este contexto, se hace necesario un estudio que, tomando como referencia el intervalo comprendido entre 200 y 4500 msnm, permita determinar la presión atmosférica teórica y relacionarla con el llenado de aire durante el proceso de admisión en motores a gasolina atmosféricos.

METODOLOGÍA

En este apartado se describe el enfoque teórico y los procedimientos de cálculo empleados para analizar el efecto de la presión atmosférica en el sistema de alimentación durante el proceso de admisión en motores a gasolina atmosféricos que operan entre 200 y 4500 msnm. Por lo tanto, se trata



de una investigación de carácter aplicado mediante el análisis termodinámico del sistema de alimentación en los motores a gasolina en función a la variación de la presión atmosférica.

Enfoque y tipo de estudio

El estudio se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo de carácter teórico y alcance descriptivo. Se basa en el análisis de modelos y expresiones matemáticas que permiten determinar la presión atmosférica y sus efectos sobre la cantidad de aire admitida en el motor, en función de la altura sobre el nivel del mar y de la temperatura promedio local, sin la realización de mediciones experimentales directas en motores reales.

Desde la perspectiva del **tipo de estudio**, se trata de una investigación descriptiva–aplicada, apoyada en el análisis de expresiones matemáticas y en resultados teóricos y experimentales reportados en la literatura especializada en español, que documentan el efecto de la altitud sobre el rendimiento de motores de encendido por chispa.

Según (Lapuerta, Armas, O., Agudelo, J. R., & Sánchez, C. A. , Estudio del efecto de la altitud sobre el comportamiento de motores de combustión interna. , 2006), este estudio es uno de los trabajos de referencia fundamentales para la presente investigación. Lapuerta et al. analizan, desde un enfoque cuantitativo-teórico, cómo la reducción de la presión atmosférica con la altitud modifica el ciclo termodinámico de operación de los motores de combustión interna de aspiración natural. Los autores demuestran que la disminución de la densidad del aire es la principal causa de pérdida de potencia, y que no existe alteración significativa en las pérdidas mecánicas con el cambio de altitud, por lo que el rendimiento indicado y el efectivo se ven afectados de manera equivalente. Este trabajo de tipo descriptivo-aplicado, publicado en la revista indexada Información Tecnológica (Chile), respalda directamente el enfoque cuantitativo y descriptivo adoptado en el presente estudio, al validar el uso de modelos teóricos de presión y densidad del aire para evaluar el desempeño del motor en distintas altitudes.

De la misma manera lLa segunda parte del trabajo de Lapuerta et al. extiende el análisis al efecto de la altitud sobre los parámetros característicos de la combustión en motores diésel, tanto de aspiración natural como sobrealimentados. Se demuestra que al incrementar la altitud disminuye la densidad del



aire por efecto de la reducción de la presión barométrica, lo que afecta la relación másica estequiométrica entre aire y combustible. Aunque centrado en motores diésel, el fundamento teórico sobre la relación entre presión atmosférica y masa de aire admitida es directamente extrapolable a motores a gasolina de aspiración natural, sustentando el tipo de análisis cuantitativo-descriptivo adoptado en este estudio para el rango altimétrico 200–4500 msnm según (Lapuerta, Armas, O., Agudelo, J. R., & Agudelo, A. F., Estudio del efecto de la altitud sobre el comportamiento de motores de combustión interna., 2006).

(Miralles, 2015) desarrolla un modelo analítico-empírico que incorpora la relación de compresión del motor como variable adicional para cuantificar la pérdida de potencia con la altitud en motores de encendido provocado (ciclo Otto) de aspiración natural. Basado en la Atmósfera Estándar Internacional (ISA), demuestra que la disminución de la densidad del aire seco en función de la presión y temperatura atmosféricas es la causa dominante del deterioro del rendimiento del motor. El modelo fue validado en motores pequeños para vehículos aéreos no tripulados hasta 6000 m de altitud. Este trabajo respalda el enfoque cuantitativo-teórico y descriptivo del presente estudio al demostrar que expresiones matemáticas basadas en parámetros atmosféricos son suficientes para estimar con buena aproximación la degradación del llenado de aire en motores a gasolina atmosféricos.

(Agudelo, Agudelo, A., & Pérez, J., 2009), este trabajo investiga, mediante análisis energético y exergético, cómo varían los parámetros de funcionamiento de un motor diésel de automoción al operar en distintas altitudes. Los autores confirman que la reducción de la presión atmosférica provoca una menor presión de compresión en la cámara de combustión, lo que deteriora las condiciones locales de combustión, incrementa el consumo específico y reduce la potencia indicada. El estudio, de carácter cuantitativo-aplicado, introduce el modelo hidrostático de la presión atmosférica junto con la variación lineal de la temperatura con la altitud —principio compartido con el presente trabajo—, lo que refuerza la validez del enfoque metodológico adoptado para motores de encendido por chispa en el altiplano boliviano.

(Rosero Moreta, Tapia Ponce, J. A. , & Muñoz Jara, C. D., 2020), esta investigación experimental analiza el efecto de la altitud sobre las emisiones contaminantes de un motor de encendido provocado (MEP) en Ecuador, realizando mediciones en tres ciudades a 0, 2200 y 3000 msnm. Los resultados muestran



que la reducción de la presión atmosférica disminuye la concentración de oxígeno en la mezcla, afectando directamente la eficiencia volumétrica y la calidad de la combustión. A mayor altitud, la menor masa de aire admitida genera mezclas ricas, combustiones incompletas y mayor emisión de CO, fenómeno estrechamente ligado a la pérdida de llenado del cilindro que analiza el presente estudio. Este trabajo valida empíricamente la relación entre presión atmosférica, eficiencia volumétrica y desempeño del motor, corroborando las conclusiones teóricas del enfoque descriptivo adoptado.

Según (Llumiyinga, Córdova, J., & otros., 2021), analizaron el comportamiento de un motor de encendido provocado con inyección electrónica indirecta en 11 puntos entre el nivel del mar y 4500 m.s.n.m., usando la señal del sensor MAP y la mariposa para determinar la variación de vacío en el múltiple y las estrategias de corrección de la ECU. Encontraron que el voltaje del sensor MAP varía aproximadamente 0,38 V/1000 m y que el vacío del motor disminuye alrededor de 7,7 kPa/1000 m, lo cual muestra cuantitativamente cómo la menor presión atmosférica reduce la masa de aire admitida y obliga a la unidad de control a ajustar el ancho de pulso y el avance de encendido.

(Ceballos Marcillo, 2023) estudió el desempeño y las emisiones de un motor de encendido provocado operando a gran altitud con mezclas gasolina–bioetanol, mediante ensayos a diferentes regímenes para evaluar potencia, consumo y emisiones reguladas. El trabajo muestra que las condiciones de presión reducida afectan negativamente el rendimiento, pero ciertas mezclas con bioetanol contribuyen a mejorar el comportamiento del motor y el cumplimiento de normas de emisiones en condiciones de alta altitud.

(Arroyo Terán, Cevallos González, A. F., Imbaquingo Navarrete, R. P., & Melo Obando, J. L., 2020), evaluaron el efecto de la altitud sobre las emisiones de un motor de encendido provocado en tres ciudades a 0, 2200 y 3000 m.s.n.m., midiendo CO, CO₂ y HC a distintos regímenes de giro. Concluyeron que los rpm son el factor más influyente en CO y HC, mientras que la altitud incide especialmente en el CO₂, que disminuye a medida que desciende la presión atmosférica, evidenciando el impacto de la menor masa de aire en la combustión.

Un estudio breve publicado en *Fuel* analizó el impacto de la altitud en el consumo de combustible de un automóvil de gasolina, considerando que muchos vehículos se calibran a nivel del mar. Los autores



mostraron que la disminución de densidad del aire en altura reduce la carga de bombeo y puede disminuir el consumo específico de combustible, aunque también se afecta la potencia disponible, lo que refuerza la necesidad de contemplar la altitud en el análisis de desempeño, según (Kasseris & Heywood, J., 2011)

Según (Hashemi, 2013) en un artículo sobre el efecto de la altitud en parámetros de motor mostró que, al incrementar la altura de 350 a 975 m, el caudal de masa de aire inducida se reduce alrededor de un 20%, con una disminución asociada de la eficiencia volumétrica. El trabajo relaciona directamente la caída de presión atmosférica con la reducción de la masa de aire que ingresa al cilindro, lo cual coincide con el planteamiento teórico del presente estudio sobre la admisión en motores atmosféricos.

En este contexto, el presente estudio retoma y articula estos aportes teóricos y aplicados para establecer, desde un enfoque cuantitativo, la relación entre presión atmosférica, masa de aire admitida y desempeño del motor en un amplio rango altimétrico característico de la realidad boliviana.

Rango de altitudes y condiciones de análisis

El análisis considera un rango altimétrico comprendido entre 200 y 4500 metros sobre el nivel del mar, representativo de las condiciones geográficas de Bolivia, donde los motores a gasolina deben operar en diversos niveles de altura. Para distintos puntos dentro de este intervalo se estima la presión atmosférica teórica, incorporando la influencia de la temperatura ambiente promedio local, con el fin de obtener valores aproximados de densidad del aire y de masa de aire disponible para el llenado del cilindro durante el proceso de admisión.

Características del motor considerado

El estudio se orienta a motores a gasolina de aspiración natural (motores atmosféricos). Para el análisis se consideran parámetros geométricos fundamentales del motor, tales como el diámetro del cilindro, la carrera del pistón y la relación de compresión, a partir de los cuales se determinan el volumen del cilindro y el volumen de la cámara de combustión. Estos parámetros permiten estimar el volumen barrido y el volumen total disponible para la mezcla aire-combustible, lo que posibilita relacionar la variación de la presión atmosférica con el llenado de aire durante el proceso de admisión.



Procedimiento de cálculo y análisis

El procedimiento metodológico comprende:

1. La determinación de la presión atmosférica teórica en diferentes altitudes dentro del rango de 200 a 4500 msnm, considerando la influencia de la temperatura promedio local mediante expresiones termodinámicas estándar.

La presión atmosférica constituye una variable física fundamental en múltiples disciplinas científicas e ingenieriles. Su variación con la altitud sobre el nivel del mar es un fenómeno de gran relevancia práctica y teórica: afecta el rendimiento de motores de combustión interna, la eficiencia de turbomáquinas, los procesos de ebullición y transferencia de calor, la fisiología humana en ambientes de gran altura y la precisión de instrumentos de medición altimétrica.

Bolivia, y particularmente las regiones del Altiplano como el departamento de Oruro (situado a una altitud media de 3,735 m.s.n.m.), representa un entorno geográfico de especial interés para el estudio de estas variables, ya que las condiciones atmosféricas difieren significativamente de los valores de referencia al nivel del mar ($p_o = 1.01325 \text{ Bar} = 101,325 \text{ N/m}^2$)

El presente artículo tiene como objetivo realizar un análisis exhaustivo de los datos de presión atmosférica en función de la altitud, en el rango comprendido entre 200 y 4,500 m.s.n.m., aplicando herramientas estadísticas y comparando los resultados empíricos con los modelos teóricos establecidos en la literatura termodinámica y meteorológica.

Se analiza cuantitativamente la relación entre la altitud sobre el nivel del mar (h) y la presión atmosférica (p_o), fundamentado en la siguiente expresión para determinar la presión atmosférica:

$$p_o = p'_o \left[\frac{T'_o - (\beta h)}{T'_o} \right]^{\left[\frac{g}{\beta R} \right]} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad \beta = \left[\frac{T_o - T'_o}{h} \right] \left[\frac{^{\circ}K}{m} \right]$$

Donde:

p_o = Presión atmosférica [N/m^2]

p'_o = Presión normal de nuestras latitudes [$1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$]

T'_o = Temperatura normal para nuestras latitudes [$293 \text{ }^{\circ}\text{K}$]



β = Coeficiente local de la variación de la temperatura [°K/m]

R = Constante universal de los gases 287 [J/kg°K]

g = Aceleración de la gravedad 9,81 [m/s²]

T_0 = Temperatura promedio local [°K]

h = Altura sobre el nivel del mar [m]

A partir de un conjunto de 44 mediciones comprendidas entre 200 y 4,500 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), se determinaron los perfiles de presión atmosférica en unidades de [N/m²] y [Bar], junto con los correspondientes registros de temperatura atmosférica. Los resultados evidencian una reducción de presión del 38.75% a lo largo del rango altitudinal estudiado, con una tasa de cambio promedio de -0.0888 Bar por cada 100 metros de ascenso. El análisis de regresión lineal arroja un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9950$, confirmando la alta linealidad del fenómeno en la troposfera baja. La correlación de Pearson entre altitud y presión fue $r = -0.9975$ ($p < 0.001$), lo que

Se observa:

Tabla 1

<i>Cálculo de la presión atmosférica:</i>			
<i>Altura sobre el nivel del mar</i>	<i>Temperatura atmosférica</i>	<i>Presión atmosférica</i>	<i>Presión atmosférica</i>
<i>h [m]</i>	<i>T_0 [°C]</i>	<i>p_0 [N/m²]</i>	<i>p_0 [Bar]</i>
200	22	98980,34654	0,989803465
300	22	97828,44464	0,978284446
400	22	96689,94821	0,966899482
500	21	95574,27942	0,955742794
600	21	94463,9097	0,944639097
700	21	93366,44012	0,933664401
800	19	92311,11957	0,923111196
900	19	91242,29363	0,912422936
1000	19	90185,84311	0,901858431
1100	18	89161,01506	0,891610151
1200	18	88130,40521	0,881304052
1300	18	87111,70816	0,871117082
1400	17	86128,51721	0,861285172

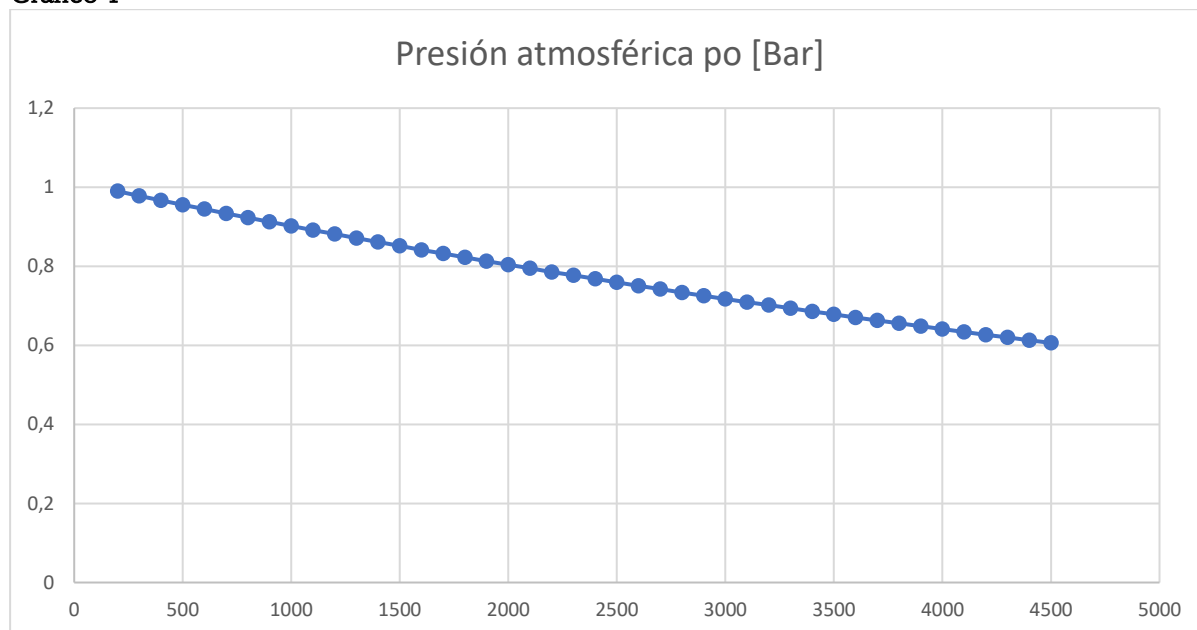


1500	17	85134,63565	0,851346357
1600	17	84152,22301	0,84152223
1700	16	83208,86029	0,832088603
1800	16	82250,28184	0,822502818
1900	16	81302,74636	0,813027464
2000	15	80397,48682	0,803974868
2100	15	79472,84607	0,794728461
2200	15	78558,83949	0,785588395
2300	14	77690,03774	0,776900377
2400	14	76798,0264	0,767980264
2500	14	75916,25683	0,759162568
2600	13	75082,34322	0,750823432
2700	13	74221,70749	0,742217075
2800	13	73370,93685	0,733709369
2900	12	72570,4138	0,725704138
3000	12	71739,95201	0,71739952
3100	12	70918,99362	0,709189936
3200	11	70150,43207	0,701504321
3300	11	69348,99226	0,693489923
3400	11	68556,70858	0,685567086
3500	10	67818,74466	0,678187447
3600	10	67045,22247	0,670452225
3700	10	66280,52286	0,662805229
3800	9	65571,85475	0,655718548
3900	9	64825,19122	0,648251912
4000	9	64087,02991	0,640870299
4100	8	63406,41484	0,634064148
4200	8	62685,59444	0,626855944
4300	8	61972,96852	0,619729685
4400	8	61268,44391	0,612684439
4500	7	60623,26863	0,606232686



De los resultados del análisis de la relación de la altura sobre el nivel del mar y la presión atmosférica se obtiene el siguiente grafico:

Gráfico 1



Los resultados obtenidos son altamente coherentes con el análisis establecido por la ley barométrica de Laplace y el modelo ISA. La linealidad del perfil de presión en el rango 200-4,500 m.s.n.m. con $R^2 = 0.9950$ es comparable a los resultados reportados en la literatura para conjuntos de datos de radio sondeo en la troposfera baja según (Wallace & Hobbs, P. V., 2006), donde la curvatura del decaimiento exponencial se vuelve apreciable solo para altitudes superiores a 10-12 km.

El lapse rate observado de -3.49 C/km , aunque inferior al estándar (-6.5 C/km), cae dentro del rango de variabilidad documentada para entornos de alta meseta continental. En el Altiplano boliviano, diversos estudios climatológicos han reportado gradientes térmicos reducidos asociados con la alta insolación y la baja conductividad térmica del suelo a gran altitud (Garreaud, Vuille, M., & Clement, A. C., 2003). Este valor más bajo del lapse rate implica que la atmósfera local es más estable que el estándar, lo que a su vez produce una reducción de presión ligeramente más gradual con la altitud en comparación con el modelo ISA puro.

Desde el punto de vista de la ingeniería, la reducción del 38.75% en la presión entre 200 y 4,500 m tiene consecuencias directas sobre el diseño y la operación de los equipos. En motores de combustión



interna, la caída de densidad del aire reduce el llenado volumétrico y, por ende, afecta la potencia que desarrolla el motor.

2. El cálculo aproximado de la densidad del aire y de la masa de aire que puede ingresar al cilindro en cada ciclo de admisión, tomando como referencia los volúmenes característicos del motor (volumen del cilindro y volumen de la cámara de combustión).

Por lo tanto, para poder evaluar esta cadena de consecuencias que es el fundamento de la entrega de potencia de los **MCI**, es de primordial importancia tener una relación que permita **cuantificar la cantidad de carga fresca admitida**, y la mejor base teórica para desarrollarla está en la ley de los gases, tomando como base una expresión derivada de la relación (**ECUACIÓN DE ESTADO DE LOS GASES**)

$$m = \frac{pV}{RT} [Kg] \quad \text{ó} \quad m = \rho V [Kg]$$

El equivalente a la cantidad de carga fresca, en realidad será la masa de carga fresca admitida en el cilindro (**aire + combustible = Gases de combustión**), expresada dentro de los parámetros más característicos del proceso de admisión de un **MCI** durante el sistema de alimentación del motor lo cual será:

$$mh = \frac{p_o V_h}{RT_o} [Kg]$$

Donde:

mh = Masa de carga fresca admitida en un cilindro [Kg]

p_o = Presión atmosférica [N/m²]

V_h = Volumen desplazado o cilindrada unitaria [m³]

T_o = Temperatura atmosférica [°K]

R = Constante universal del aire 287 [J/ (kg°K)]

Lo que se llega a conceptualizar en los **MCI**, que dependerá de las condiciones de alimentación durante el proceso de admisión, lo cual estará ligado fundamentalmente a la entrega de potencia en un **MCI**.

- A mayor presión de llenado mayor masa de carga fresca admitida
- A menor presión de llenado menor masa de carga fresca admitida
- A mayor temperatura de llenado menor masa de carga fresca admitida



- A menor temperatura de llenado mayor masa de carga fresca admitida

Probablemente una de las aplicaciones más importantes de la ley de los gases para los **MCI** ha quedado planteada en la Ecuación de estado, a partir de la cual se puede seguir planteando **relaciones y aproximaciones teóricas idealizadas** que serán el fundamento y punto de partida para estructuras y desarrollar un coherente análisis termodinámico de los **MCI**, en la validez original de su planteo.

Aparte de la masa de aire que entra como carga fresca admitida a un **MCI**, existen otras masas gaseosas características que intervienen en los procesos termodinámicos de un **MCI**, estas son:

$$m = mh + m(Vc)[Kg] \quad mc = \frac{mh}{r_{a/c}} [Kg]$$

m = Masa gaseosa total contenida en el SCP [Kg]

mh = Masa de carga fresca admitida en el SCP [Kg]

$m(Vc)$ = Masa de los gases residuales que quedan en la cámara de combustión [Kg]

mc = Masa de combustible que ingresa al SCP [Kg]

$r_{a/c}$ = *Relación* de aire combustible [Kga/Kgc]

La masa gaseosa total contenida en el **SCP** es la suma de la carga fresca más la masa de los gases residuales y al ser predominante la masa de la carga fresca se puede considerar: que las condiciones de temperatura y presión serán las de la admisión y que las propiedades de la masa gaseosa serán muy similares a las del aire predominante en la carga fresca, por lo tanto:

$$m = \frac{p_o(Vh + Vc)}{RT_o} [Kg]$$

Se tiene el siguiente análisis:

Tabla 2

MOTOR K15B (ERTIGA SUZUKI)			
<i>Volumen del cilindro</i>	<i>Masa de carga fresca admitida en el cilindro</i>	<i>Masa del combustible</i>	<i>Masa total contenida en el SCP</i>
$vh [m^3]$	$mh [kg]$	$mc [kg]$	$m [kg]$
0,000365571	0,000427383	2,84922E-05	0,000472371
0,000365571	0,000422409	2,81606E-05	0,000466873
0,000365571	0,000417493	2,78329E-05	0,00046144
0,000365571	0,00041408	2,76053E-05	0,000457667



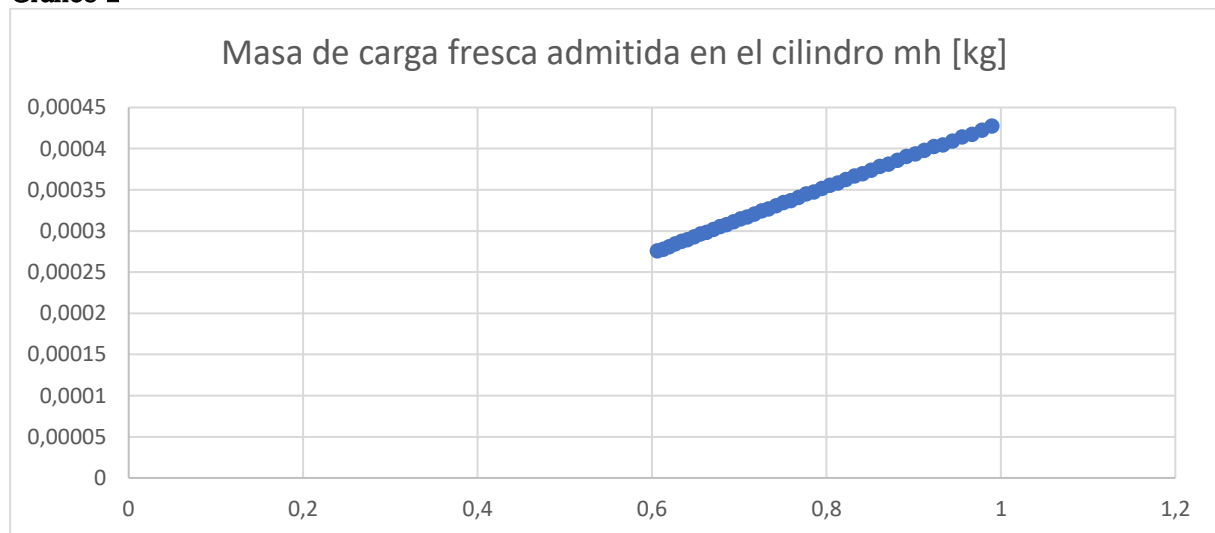
0,000365571	0,000409269	2,72846E-05	0,00045235
0,000365571	0,000404514	2,69676E-05	0,000447095
0,000365571	0,000402681	2,68454E-05	0,000445069
0,000365571	0,000398019	2,65346E-05	0,000439916
0,000365571	0,00039341	2,62274E-05	0,000434822
0,000365571	0,000390276	2,60184E-05	0,000431358
0,000365571	0,000385765	2,57177E-05	0,000426372
0,000365571	0,000381306	2,54204E-05	0,000421444
0,000365571	0,000378303	2,52202E-05	0,000418124
0,000365571	0,000373937	2,49291E-05	0,000413299
0,000365571	0,000369622	2,46415E-05	0,00040853
0,000365571	0,000366743	2,44495E-05	0,000405348
0,000365571	0,000362518	2,41679E-05	0,000400678
0,000365571	0,000358342	2,38895E-05	0,000396062
0,000365571	0,000355582	2,37055E-05	0,000393012
0,000365571	0,000351493	2,34329E-05	0,000388492
0,000365571	0,00034745	2,31634E-05	0,000384024
0,000365571	0,000344805	2,2987E-05	0,0003811
0,000365571	0,000340846	2,27231E-05	0,000376725
0,000365571	0,000336933	2,24622E-05	0,000372399
0,000365571	0,000334397	2,22931E-05	0,000369596
0,000365571	0,000330564	2,20376E-05	0,00036536
0,000365571	0,000326775	2,1785E-05	0,000361172
0,000365571	0,000324343	2,16229E-05	0,000358485
0,000365571	0,000320632	2,13755E-05	0,000354382
0,000365571	0,000316963	2,11308E-05	0,000350327
0,000365571	0,000314632	2,09754E-05	0,000347751
0,000365571	0,000311037	2,07358E-05	0,000343778
0,000365571	0,000307484	2,04989E-05	0,00033985
0,000365571	0,000305249	2,03499E-05	0,00033738
0,000365571	0,000301767	2,01178E-05	0,000333532
0,000365571	0,000298325	1,98883E-05	0,000329728
0,000365571	0,000296182	1,97455E-05	0,000327359
0,000365571	0,000292809	1,95206E-05	0,000323631



0,000365571	0,000289475	1,92983E-05	0,000319946
0,000365571	0,00028742	1,91613E-05	0,000317675
0,000365571	0,000284153	1,89435E-05	0,000314064
0,000365571	0,000280922	1,87282E-05	0,000310493
0,000365571	0,000277729	1,85153E-05	0,000306963
0,000365571	0,000275786	1,83857E-05	0,000304816

De los resultados del análisis de la presión atmosférica y la masa de carga fresca admitida en el cilindro se obtiene el siguiente gráfico, a medida que la presión aumenta también la masa de carga fresca aumenta:

Gráfico 2



El análisis de los datos demuestra una **relación directamente proporcional** entre la presión atmosférica y la masa de carga fresca admitida en el cilindro del motor K15B de la Suzuki Ertiga: conforme disminuye la presión con la altitud, la masa de carga fresca admitida en el cilindro que ingresa al motor de combustión interna cae de forma proporcional. La correlación entre ambas variables es extremadamente alta (cercana a 0.9999), lo que confirma que la presión atmosférica es el factor dominante en el llenado del cilindro.

Por consiguiente, lo que se observa en el rango de 200 m a 4500 m de altura, la presión atmosférica varía de 98,980 Pa a 60,623 Pa, mientras que la masa de carga fresca admitida en el cilindro (mh) disminuye de 0.000427 kg a 0.000276 kg por cilindro, una reducción del 35.47%. Otros parámetros geométricos del motor, como el diámetro del cilindro (0.074 m), la carrera (0.085 m), la relación de



compresión (10.5) y los volúmenes ($v_c = 3.85 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, $v_h = 3.66 \times 10^{-4} \text{ m}^3$), permanecen constantes, esa estabilidad resalta que la variación en **(mh)** se debe exclusivamente a cambios en las condiciones atmosféricas.

Este análisis sustenta que la presión atmosférica limita el rendimiento de motores aspirados en altitud: menor **(mh)** implica menor potencia, ya que la energía liberada en combustión es proporcional a la masa de combustible (y aire) admitida. Para mitigar esto, se usan turbocompresores que elevan la presión en admisión independientemente de p_o . Los datos, referidos al motor K15B (1.5 L, aspirado), ejemplifican el problema en regiones montañosas como los Andes bolivianos, donde Oruro (a ~3700 m) registraría ~30% menos **(mh)** que al nivel del mar.

Discusión científica

Los cálculos asumen llenado ideal sin considerar dinámica de flujo (números de Reynolds, pérdidas en válvulas), pero la alta correlación valida la aproximación para fines didácticos y de ingeniería básica. Variaciones en T_o introducen un leve desvío de la proporcionalidad estricta, pero p_o domina (~90-95% del efecto total). Más adelante se analizará cómo afecta el sistema de alimentación de un motor en la potencia que desarrollaría un motor a gasolina con estas características.

3. El establecimiento de la relación entre la disminución de la presión atmosférica con la altitud y la correspondiente reducción en el llenado de aire, analizando sus implicaciones sobre la eficiencia volumétrica teórica del motor.

El rendimiento volumétrico (η_v) mide qué tan efectivamente un motor a gasolina llena sus cilindros con aire fresco (o mezcla aire-combustible) durante la fase de admisión. Se calcula como la relación entre la masa real de aire admitida y la masa teórica que cabría en el volumen desplazado a condiciones atmosféricas, típicamente expresada en porcentaje.

Fórmula básica

La ecuación estándar es:

$$\eta_v = \frac{m_h}{m_{h,teor}} = \frac{m_h RT_o}{p_o V_h} \times 100\%$$



donde m_h es la masa real de aire fresco, $m_{h,teor} = \frac{p_o V_h}{RT_o}$ la masa teórica, p_o la presión atmosférica, V_h el volumen desplazado del cilindro, R la constante del aire y T_o la temperatura ambiente. En tus datos previos del motor K15B, esta fórmula se aplicó implícitamente para obtener m_h a partir de p_o y T_o , asumiendo $\eta_v \approx 100\%$.

A continuación, se considera para determinar:

La relación de aire combustible ($r_{a/c}$) se define: Como la cantidad de masa del aire sobre la cantidad de masa de combustible.

$$R_{a/c} = \lambda * r_{a/c} = \frac{mh_{real}}{mc} \quad mh_{real} = R_{a/c} mc \text{ [kg]} \quad \lambda = 0.8 - 0.9 \text{ Plena carga}$$

Dónde:

$r_{a/c}$ = Relación de aire combustible ideal [Kg_a/Kg_c]

$R_{a/c}$ = Relación de aire combustible real [Kg_a/Kg_c]

λ = Coeficiente exceso o defecto de aire

mh_{real} = Masa de aire real [kg_a]

mc = Masa de combustible [kg_c]

Tabla 3

MOTOR K15B (ERTIGA SUZUKI)			
<i>Masa de carga fresca admitida en el cilindro</i>	<i>Relación de aire combustible real</i>	<i>Masa de carga real fresca admitida en el cilindro</i>	<i>Rendimiento volumétrico</i>
<i>mh [kg]</i>	<i>Ra/c</i>	<i>mh real [kg]</i>	<i>nv [%]</i>
0,000427383	12,75	0,000363276	85
0,000422409	12,75	0,000359048	85
0,000417493	12,75	0,000354869	85
0,00041408	12,75	0,000351968	85
0,000409269	12,75	0,000347879	85
0,000404514	12,75	0,000343837	85
0,000402681	12,75	0,000342279	85
0,000398019	12,75	0,000338316	85
0,00039341	12,75	0,000334399	85
0,000390276	12,75	0,000331735	85



0,000385765	12,75	0,0003279	85
0,000381306	12,75	0,00032411	85
0,000378303	12,75	0,000321557	85
0,000373937	12,75	0,000317847	85
0,000369622	12,75	0,000314179	85
0,000366743	12,75	0,000311732	85
0,000362518	12,75	0,000308141	85
0,000358342	12,75	0,000304591	85
0,000355582	12,75	0,000302245	85
0,000351493	12,75	0,000298769	85
0,00034745	12,75	0,000295333	85
0,000344805	12,75	0,000293084	85
0,000340846	12,75	0,000289719	85
0,000336933	12,75	0,000286393	85
0,000334397	12,75	0,000284237	85
0,000330564	12,75	0,000280979	85
0,000326775	12,75	0,000277758	85
0,000324343	12,75	0,000275692	85
0,000320632	12,75	0,000272537	85
0,000316963	12,75	0,000269418	85
0,000314632	12,75	0,000267437	85
0,000311037	12,75	0,000264382	85
0,000307484	12,75	0,000261361	85
0,000305249	12,75	0,000259461	85
0,000301767	12,75	0,000256502	85
0,000298325	12,75	0,000253576	85
0,000296182	12,75	0,000251755	85
0,000292809	12,75	0,000248888	85
0,000289475	12,75	0,000246054	85
0,00028742	12,75	0,000244307	85
0,000284153	12,75	0,00024153	85
0,000280922	12,75	0,000238784	85
0,000277729	12,75	0,000236069	85
0,000275786	12,75	0,000234418	85



Un **análisis del rendimiento volumétrico (η_v)** constante del 85% en el motor K15B de Suzuki Ertiga, aplicado a un rango de alturas de 200 m a 4500 m. Esto refleja un valor realista y conservador para un motor aspirado a gasolina en condiciones de plena carga, donde η_v mide la eficiencia del llenado del cilindro con aire fresco.

Características de los datos

La tabla calcula η_v como constante en todo el intervalo, con desviación estándar cero (media exacta de 85.00%). Para cada altura, se distingue m_h (masa teórica de aire a condiciones ideales) de $m_{h,real}$ (masa real ajustada por η_v): en 200 m, $m_h = 0.000427$ kg vs. $m_{h,real} = 0.000363$ kg, una reducción del 15%. La relación aire-combustible real ($Ra/c = 12.75$) se mantiene fija, derivando m_c de $m_{h,real}$. Parámetros fijos del motor incluyen diámetro ($D=0.074$ m), carrera ($s=0.085$ m), relación de compresión ($r_k=10.5$) y volumen desplazado ($V_h = 3.66 \times 10^{-4}$ m³). La presión p_o y temperatura T_o varían con altura, afectando m_h teórica, pero η_v no cambia.

Un $\eta_v = 85\%$ es típico para motores a gasolina multicilíndricos aspirados a ~ 3000 - 4000 rpm y plena carga: superior al 70-80% en operación real por restricciones de mariposa o altas RPM, pero inferior al 100% ideal debido a:

- Pérdidas por flujo en admisión (turbulencia, fricción).
- Sobrepresión residual al cierre de válvulas.
- Calentamiento del aire en conductos.

La constancia en el archivo simplifica el modelo para estudiar efectos de altitud, pero en realidad η_v puede variar $\pm 5\%$ con RPM y carga; aquí se idealiza como invariante.

Tabla 4

Altura (m)	p_o (Pa)	m_h teórica (kg)	$m_{h,real}$ (kg)	η_v (%)
200	98,980	0.000427	0.000363	85.0
2500	75,916	0.000337	0.000286	85.0
4500	60,623	0.000276	0.000234	85.0



La tabla muestra que, pese a la caída del 35% en m_h teórica por menor p_o , η_v permanece fijo, limitando la masa real disponible para combustión.

Implicaciones científicas, este análisis sustenta que η_v actúa como factor multiplicativo constante en el rendimiento de motores aspirados frente a cambios ambientales como altitud. Reduce la potencia ~15% sistemáticamente vs. el ideal, exacerbando pérdidas por baja presión (~35% a 4500 m), totalizando ~44% menos masa real. En contextos como Oruro (3700 m), implica necesidad de recalibración de inyección para mantener $Ra/c=12.75$.

Teóricamente, deriva del rendimiento volumétrico en ciclo Otto: potencia $\propto m_{h,real} \times q_c \times \eta_{térmico}$, donde η_v modula directamente la carga. Limitaciones del modelo: ignora variaciones reales de η_v con Mach en válvulas o resonancia.

Este enfoque metodológico permite describir, desde una perspectiva teórica, cómo la variación de la presión atmosférica asociada a la altura impacta el sistema de alimentación durante el proceso de admisión en motores a gasolina atmosféricos, aportando una base conceptual para futuras validaciones experimentales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el análisis teórico realizado se observa que la presión atmosférica disminuye progresivamente a medida que se incrementa la altitud desde 200 hasta 4500 metros sobre el nivel del mar, lo cual implica una reducción simultánea de la densidad del aire disponible para el proceso de admisión en motores a gasolina atmosféricos. Esta variación se traduce en una menor masa de aire que ingresa al cilindro en cada ciclo, aun cuando el volumen geométrico del cilindro se mantiene constante, afectando directamente la cantidad de mezcla aire-combustible que puede formarse en condiciones estequiométricas.

De manera cualitativa, puede establecerse que, en altitudes bajas cercanas a 200 msnm, la presión atmosférica es mayor y favorece un mejor llenado de aire, lo que contribuye a una mayor eficiencia volumétrica teórica del motor. A medida que el motor opera en alturas intermedias y altas, dentro del rango considerado hasta aproximadamente 4500 msnm, la disminución de presión y densidad del aire



genera un llenado menos eficiente, lo que se asocia con pérdidas de potencia y respuesta dinámica del motor. Esta tendencia coincide con los principios de la termodinámica aplicada a motores de combustión interna, que señalan la dependencia del rendimiento del motor respecto de las condiciones de presión y temperatura ambiente.

Los resultados teóricos obtenidos permiten discutir la importancia de considerar la altitud en el diseño, selección y ajuste de motores a gasolina destinados a operar en países como Bolivia, donde existe una marcada variación altimétrica. En la práctica, la menor masa de aire admitida en altura puede requerir estrategias de compensación, tales como ajustes en la carburación, calibración de sistemas de inyección o incluso la incorporación de sistemas de sobrealimentación en aplicaciones específicas. Desde la formación en mecánica automotriz, la comprensión de estos efectos contribuye a que los estudiantes interpreten con mayor precisión el comportamiento real de los motores y tomen decisiones fundamentadas en contextos de operación a diferentes alturas.

CONCLUSIONES

El análisis teórico realizado permite concluir que la variación de la presión atmosférica en el rango de 200 a 4500 metros sobre el nivel del mar tiene un efecto directo y significativo sobre el sistema de alimentación durante el proceso de admisión en motores a gasolina atmosféricos. A medida que aumenta la altitud, la disminución de la presión y la densidad del aire reducen la masa de aire que ingresa al cilindro en cada ciclo, condicionando el llenado de aire y la formación de la mezcla aire–combustible.

Se confirma que, en condiciones de mayor altitud, la eficiencia volumétrica teórica del motor tiende a disminuir, lo que se traduce en pérdidas potenciales de potencia y en un rendimiento menos favorable respecto a zonas de baja altitud. Esta relación evidencia la importancia de considerar las condiciones altimétricas en el análisis, dimensionamiento y ajuste de motores a gasolina que operan en regiones como Bolivia, caracterizadas por amplias variaciones de altura.

Desde el punto de vista formativo, los resultados obtenidos aportan una base conceptual útil para estudiantes de mecánica automotriz, al vincular principios de termodinámica y de funcionamiento de motores de combustión interna con situaciones reales de operación en distintos niveles de altitud.



Asimismo, el estudio abre la posibilidad de futuros trabajos que incorporen validaciones experimentales, comparaciones entre diferentes tipos de motores y la evaluación de estrategias de compensación, como la sobrealimentación o la optimización de los sistemas de admisión y combustible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudelo, J., Agudelo, A., & Pérez, J. (2009). *Análisis energético y exergetico de un motor diésel de automoción operando en diferentes altitudes*. Obtenido de Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, (48), 45–54. : <https://doi.org/10.17533/udea.redin.16018>
- Arroyo Terán, E. S., Cevallos González, A. F., Imbaquingo Navarrete, R. P., & Melo Obando, J. L. (2020). *Estudio del efecto de la altitud sobre las emisiones de gases de escape de motores de combustión interna con encendido provocado*. Obtenido de Universidad Técnica del Norte. : <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85270674009>
- Ceballos Marcillo, J. J. (2023). *Performance and emissions of spark-ignition internal combustion engine operating with bioethanol–gasoline blends at high altitudes under low- and high-speed conditions* (Vol. 34). Universidad de Zaragoza.: Tesis de máster. doi: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1018-130X2023000300182&script=sci_arttext&tlng=pt
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (s.f.). *Thermodynamics: An engineering approach* (8th ed. ed.). 2015: McGraw-Hill Education.
- Garreaud, R., Vuille, M., & Clement, A. C. (2003). *The climate of the Altiplano: Observed current conditions and mechanisms of past changes*.
- Hashemi, A. (2013). *Effects of altitude on the performance of a gasoline engine. Transport*. Obtenido de <https://doi.org/10.3846/16484142.2013.798743>: [https://journals.vilniustech.lt/index.php/Transport/article/download/4161/3525\[6\]](https://journals.vilniustech.lt/index.php/Transport/article/download/4161/3525[6])
- Heywood, J. B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill.
- Kasseris, E., & Heywood, J. (2011). *Short communication: Impact of altitude on fuel consumption of a gasoline passenger car. Fuel*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.002>: [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236111000627\[5\]](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236111000627[5])



- 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*. Obtenido de Parte 2: Motores diésel. Información Tecnológica, 17(5), 31–41.: <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*. . Obtenido de Parte 1: Funcionamiento. Información Tecnológica, 17(5), 21–30. : <https://doi.org/10.4067/S0718-07642006000500005>
- Llumiquinga, D., Córdova, J., & otros. (2021). *Effects of altitude in the performance of a spark ignition internal combustion engine*. . doi: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=4bBsEAAAOBAJ&oi=fnd&pg=PT7&dq=la+privaci%C3%B3n+del+sue%C3%B1o+y+la+memoria,+atenci%C3%B3n+y+emociones&ots=xlULCzD5RV&sig=tzeasBbLJFvpo73mf4bvvYvWzcc>
- Miralles, J. L. (2015). *Efecto de la relación de compresión en el rendimiento de motores de combustión interna a diferentes altitudes*. . Obtenido de Información Tecnológica, 26(4), 55–66.: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000400009>
- Pulkrabek, W. W. (2004). *Engineering fundamentals of the internal combustion engine* (2nd ed. ed.). Pearson Prentice Hall.
- Rosero Moreta, M. J., Tapia Ponce, J. A. , & Muñoz Jara, C. D. (2020). *Estudio del efecto de la altitud sobre las emisiones de gases de escape de motores de combustión interna con encendido provocado*. Obtenido de Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 30(1), 148–160.: <https://doi.org/10.18359/rcin.4065>
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: An introductory survey* (2nd ed. ed.). Academic Press.

