



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,**  
**ELECTRÓNICA Y SISTEMAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**ELÉCTRICA**



**“ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA ALTITUD DE PUNO  
SOBRE LA POTENCIA EFECTIVA DE UN MOTOR DE  
COMBUSTIÓN INTERNA OTTO DE ASPIRACIÓN NATURAL”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**GROVER VELARDE DUEÑAS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PUNO – PERÚ**

**2023**



## Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA ALTITUD DE PUNO SOBRE LA POTENCIA EFECTIVA DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA OTTO DE ASPIRACIÓN NATURAL**

AUTOR

**GROVER VELARDE DUEÑAS**

RECUENTO DE PALABRAS

**19168 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**99780 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**109 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**4.2MB**

FECHA DE ENTREGA

**Jul 20, 2023 9:19 AM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Jul 20, 2023 9:21 AM GMT-5**

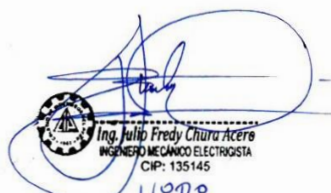
### ● 11% de similitud general


El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 10% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 5% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

### ● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 12 palabras)

  
Ing. Julio Freddy Chura Acero  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA  
CIP: 135145  
VºBº  
Sub. Director de Investigación  
EPI/ME

VºBº  
  
Leguinda Vilca Cullata

Resumen



## DEDICATORIA

Dedico a mi pareja Eva Lucy Miranda, por estar siempre brindándome su apoyo incondicional y motivación constante para lograr los objetivos planificados.

A mis pequeñas princesas Aracely Nikol y Jimena Abigail, que son mi mayor fortaleza y empuje firme para superar cada obstáculo presentado en el trayecto de mi vida.

Para las personas que me dieron la vida Humberto Velarde y Nancy Dueñas, quienes son el pilar en la trayectoria de mi formación profesional,

A mi hermano Yerzon, quien me brindo sus conocimientos durante la trayectoria de mi formación profesional, en la cual compartimos momentos de alegría y tristezas, logrando metas anheladas.

Gracias a todos.



## AGRADECIMIENTO

Agradecer a Dios, por guiarme en el camino correcto del aprendizaje y desarrollo de mi carrera profesional.

Agradecido con mi familia, por haberme conducido por el sendero correcto de superación y formación profesional.

Al Ing. Julio Argandoña e ing. Leónidas vilca, quienes me brindaron el soporte en la ejecución de este proyecto.

Gracias a cada uno de las personas que pusieron un granito de arena para lograr esta meta.



# ÍNDICE GENERAL

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTO**

**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**ÍNDICE DE ACRÓNIMOS**

<b>RESUMEN .....</b>	<b>12</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>13</b>

## **CAPITULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

<b>1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2. JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3. HIPÓTESIS GENERAL.....</b>	<b>17</b>
<b>1.4. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS .....</b>	<b>17</b>
<b>1.5. OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>18</b>
<b>1.6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>18</b>

## **CAPITULO II**

### **REVISIÓN DE LITERATURA**

<b>2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>29</b>
2.2.1. Motor de combustión interna .....	29
2.2.1.1. Ciclo de funcionamiento de un motor de combustión interna Otto .	29
2.2.1.2. Ciclo Otto teórico.....	30
2.2.1.3. Ciclo Otto real .....	32
2.2.1.4. Motor de cuatro tiempos .....	33
2.2.2. Partes de un motor ciclo Otto.....	34
2.2.2.1. Culata .....	35
2.2.2.2. Bloque de cilindros .....	36
2.2.2.3. Árbol de levas .....	37
2.2.2.4. Válvulas.....	38



2.2.2.5. Pistones .....	38
2.2.2.6. Cilindros .....	39
2.2.2.7. Cigüeñal .....	40
2.2.3. Altitud.....	40
2.2.3.1. Altímetro .....	42
2.2.3.2. Coordenadas geográficas .....	42
2.2.3.3. Insolación terrestre .....	44
2.2.4. Presión Atmosférica .....	44
2.2.4.1. Barómetro.....	45

### CAPITULO III

#### MATERIALES Y MÉTODOS

<b>3.1. MATERIALES .....</b>	<b>49</b>
3.1.1. Metodología para el análisis de los parámetros indicados del motor de combustión interna Otto de aspiración natural.....	49
3.1.1.1. Potencia indicada ( $N_i$ ) .....	50
3.1.1.2. Presión media indicada ( $P_i$ ).....	52
3.1.1.3. Consumo específico indicado de combustible ( $g_i$ ).....	53
3.1.1.4. Eficiencia indicada ( $N_i$ ).....	53
3.1.1.5. Relación entre los parámetros del ciclo de trabajo.....	54
3.1.2. Presión atmosférica y variación de oxígeno en altura.....	57
3.1.2.1. Presión Atmosférica en Puno .....	61
3.1.2.2. Disminución de la presión atmosférica en Puno .....	63
3.1.2.3. Porcentaje de oxígeno en el aire de Puno.....	64
<b>3.2. MÉTODOS.....</b>	<b>65</b>
3.2.1. Método de la International Normal Atmosphere (INA) para determinar la presión atmosférica normal internacional .....	65
3.2.2. Método para determinar la presión atmosférica de Puno.....	66
3.2.2.1. Corrección por temperatura ( $CT$ ).....	67
3.2.2.2. Corrección por latitud ( $Cg$ ).....	68



3.2.2.3. Corrección por Altitud ( $Ch$ ).....	69
3.2.3. Método para determinar el porcentaje de disminución de la presión atmosférica por cada 1000 metros de altitud sobre el nivel del mar .....	70
3.2.4. Método para determinar el porcentaje de oxígeno que tiene el aire en Puno.	71
3.2.5. Método para analizar en forma matemática los parámetros de funcionamiento de un motor Otto que influyen en la potencia debido a la altitud de Puno ....	73
<b>CAPITULO IV</b>	
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	
<b>4.1. RESULTADOS .....</b>	<b>75</b>
4.1.1. Determinación de la presión atmosférica normal internacional (INA).....	75
4.1.2. Determinación experimental de la presión atmosférica en Puno – UNA .....	78
4.1.3. Determinación del porcentaje de disminución de la presión atmosférica por cada 1000 metros de altitud sobre el nivel del mar .....	83
4.1.4. Análisis matemático de la influencia de la altitud en la potencia de un motor Otto de aspiración natural .....	85
<b>4.2. DISCUSIÓN .....</b>	<b>98</b>
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>99</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>101</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>102</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>105</b>

**AREA:** Ingenierías

**LINEA:** Ingeniería Mecánica

**FECHA DE SUSTENTACIÓN: 26 de julio de 2023**



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Tiempo de un ciclo Otto: a) Admisión, b) Compresión, c) Expansión, d) Escape .....	30
<b>Figura 2:</b> Ciclo de motor de combustión interna Otto teórico.....	31
<b>Figura 3:</b> Ciclo de motor de combustión interna Otto real.....	33
<b>Figura 4:</b> Ciclo de trabajo de un motor.....	34
<b>Figura 5:</b> Partes de un motor ciclo Otto.....	35
<b>Figura 6:</b> Culata y empaque de culata del motor de combustión interna .....	36
<b>Figura 7:</b> Bloque de cilindros .....	37
<b>Figura 8:</b> Árbol de levas .....	37
<b>Figura 9:</b> Válvulas de admisión y escape .....	38
<b>Figura 10:</b> Pistón de un motor .....	39
<b>Figura 11:</b> Cilindros de un motor .....	39
<b>Figura 12:</b> Cigüeñal de un motor.....	40
<b>Figura 13:</b> Altura y profundidad máximas en la tierra .....	41
<b>Figura 14:</b> Altimetro .....	42
<b>Figura 15:</b> Las coordenadas geográficas Latitud y Longitud .....	43
<b>Figura 16:</b> Presión atmosférica.....	45
<b>Figura 17:</b> Esquema del barómetro de mercurio .....	46
<b>Figura 18:</b> Barómetro Aneroide clásico .....	47
<b>Figura 19:</b> Diagrama indicado de un motor Otto de cuatro tiempos de aspiración natural. .....	50
<b>Figura 20:</b> Diagrama indicado .....	52
<b>Figura 21:</b> El aire contiene un 21% de oxígeno en los primeros 100 Km de la atmósfera. .....	57





<b>Figura 22:</b> Relación entre la presión atmosférica y la altitud.....	58
<b>Figura 23:</b> Presión atmosférica en el Everest y al nivel del mar .....	59
<b>Figura 24:</b> Partes del barómetro de sifón.....	62
<b>Figura 25:</b> Barómetro de sifón del Laboratorio de Física (FICA-UNAP).....	63
<b>Figura 26:</b> Disminución de la presión atmosférica con la altitud sobre el nivel del mar .....	77
<b>Figura 27:</b> Variación de las potencias efectivas ( $Ne$ ), indicada ( $Ni$ ) y de pérdidas mecánicas ( $Nm$ ) en función de la frecuencia de rotación ( $n$ ). .....	88
<b>Figura 28:</b> Variación de la presión efectiva ( $Pe$ ), presión indicada ( $Pi$ ), torque de giro ( $M$ ), potencia efectiva ( $Ne$ ) y potencia indicada ( $Ni$ ) en función de la frecuencia de rotación ( $n$ ). .....	90



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Valores aproximados de la presión atmosférica.....	48
<b>Tabla 2:</b> Presión atmosférica respecto a la altitud sobre el nivel del mar.....	60
<b>Tabla 3:</b> Variación de la presión atmosférica con la altitud .....	61
<b>Tabla 4:</b> Porcentaje de oxígeno en el aire en función de la altitud.....	64
<b>Tabla 5:</b> Corrección de temperatura para columnas de mercurio hasta 850 mm.....	68
<b>Tabla 6:</b> Corrección por Latitud para columnas de mercurio de barómetros .....	69
<b>Tabla 7:</b> Corrección por altitud ( $Ch$ ) para columnas de mercurio de barómetros .....	70
<b>Tabla 8:</b> Variación de la fracción del Oxígeno y Nitrógeno en el aire a diferentes altitudes. ....	73
<b>Tabla 9:</b> Variación de la presión atmosférica y propiedades del aire en función de la altura. ....	77
<b>Tabla 10:</b> Interpolaciones y cálculos para determinar la corrección para una temperatura de 18°C. ....	79



## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

<b>SENAMHI</b>	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
<b>FICA</b>	: Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura
<b>UNAP</b>	: Universidad Nacional del Altiplano de Puno
<b>INA</b>	: International Normal Atmosphere
<b>ASME</b>	: American Society Mechanical Engineer
<b>MIR</b>	: Editorial Paz



## RESUMEN

En el mundo actual el motor de combustión interna es la máquina de mayor uso en el área del transporte, en su desarrollo tecnológico su eficiencia se ha incrementado desde 10% hasta 40% en los motores actuales. En el Perú por sus características topográficas los motores operan a altitudes significativas sobre el nivel del mar, cuya variable climática influye disminuyendo la potencia efectiva de los motores Otto de aspiración natural como consecuencia de la disminución de la presión atmosférica y densidad del aire. En ese contexto el objetivo de la investigación es analizar la influencia de la altitud de Puno sobre la potencia efectiva de un motor de combustión interna Otto de aspiración natural; empleando para el análisis de los parámetros de funcionamiento del motor Otto la metodología desarrollada por investigadores del Instituto de Automóviles, Carreteras de Moscú, Rusia; y determinar qué parámetros son influenciados por la altitud que provocan la disminución de la potencia efectiva del motor y, para caracterizar la altitud de Puno las metodologías de la International Normal Atmosphere (INA), American Society Mechanical Engineer (ASME) y del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Los resultados que se obtuvieron para las condiciones ambientales de Puno fueron de una presión atmosférica de 490,7151 mm Hg, densidad del aire 0,783 Kg/m<sup>3</sup> y 19,91% de oxígeno. Las conclusiones son que la variación del porcentaje de oxígeno es mínima en la composición del aire en Puno y, que la disminución de la presión atmosférica influye en la disminución de la densidad del aire es el parámetro principal que influye en la pérdida de 36% de la potencia efectiva del motor Otto con respecto a la potencia efectiva al nivel del mar.

**Palabras clave:** Motor Otto, altitud, potencia efectiva, presión atmosférica, densidad aire, oxígeno.



## ABSTRACT

In today's world, the internal combustion engine is the most widely used machine in the area of transportation, in its technological development its efficiency has increased from 10% to 40% in current engines. In Peru, due to its topographic characteristics, the engines operate at significant altitudes above sea level, whose climatic variable influences by decreasing the effective power of naturally aspirated Otto engines as a consequence of the decrease in atmospheric pressure and air density. In this context, the objective of the research is to analyze the influence of the altitude of Puno on the effective power of a naturally aspirated Otto internal combustion engine; using for the analysis of the operating parameters of the Otto engine the methodology developed by researchers from the Institute of Automobiles, Moscow Roads, Russia; and to determine which parameters are influenced by the altitude that cause the reduction of the effective power of the engine and, to characterize the altitude of Puno, the methodologies of the International Normal Atmosphere (INA), American Society Mechanical Engineer (ASME) and the National Service of Meteorology and Hydrology (SENAMHI). The results obtained for the environmental conditions of Puno were an atmospheric pressure of 490.7151 mm Hg, air density 0.783 Kg/m<sup>3</sup> and 19.91% oxygen. The conclusions are that the variation of the percentage of oxygen is minimal in the composition of the air in Puno and that the decrease in atmospheric pressure influences the decrease in air density is the main parameter that influences the loss of 36% of the effective power of the Otto engine with respect to the effective power at sea level.

**Key words:** Otto engine, altitude, effective power, atmospheric pressure, air density, oxygen.



# CAPITULO I

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo del proyecto de investigación trata de la influencia de la altitud de Puno en la potencia efectiva de un motor Otto de aspiración natural, en base a un estudio analítico de los parámetros de funcionamiento del motor. La importancia del tema de investigación se fundamenta en que los conocimientos sobre el funcionamiento de los motores de combustión interna en la altitud, es relevante para un ingeniero mecánico, aún más considerando que nuestra alma mater, es decir, nuestra universidad se encuentra ubicada a 3827 metros sobre el nivel del mar.

El Perú es un país con características geográficas muy variables con respecto a la altitud sobre el nivel del mar, lo que implica una disminución significativa de la presión atmosférica, por lo que la investigación se analiza la variación de la potencia de un motor Otto en función de las condiciones ambientales, se cuantifica como al variar los factores ambientales, en qué medida varían los parámetros de funcionamiento del motor como influencia de la altitud sobre el nivel del mar.

En la coyuntura actual del cambio climático como consecuencia de la contaminación ambiental, las emisiones de gases que contaminan el ambiente emitidos por los vehículos es un problema de interés en el mundo; la altitud influye de manera importante las emisiones de gases, porque el motor trabaja a parámetros variables de la presión atmosférica, respecto al aire, que ingresa al motor también hoy variación en su temperatura y de igual manera en la humedad. Cuando la altitud sobre el nivel del mar es mayor, ocurre que la densidad del aire disminuye, como la composición del aire – combustible, se modifica el ciclo termodinámico y, se generan los gases contaminantes.



## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

A nivel mundial la aparición de los motores de combustión interna, este progreso tecnológico significa más progreso para toda la humanidad, por su aplicación importante en la generación de la potencia mecánica y eléctrica para el transporte tanto de los pasajeros y, como de carga por los diferentes medios de transporte por el aire, por mar y por tierra.

La obtención de mayores potencias en los motores de combustión interna se logró por investigaciones realizadas por diferentes instituciones constructoras de diferentes países como la SULZER de Suiza, MAN de Alemania, PERKINS de Inglaterra, FIAT de Italia, CATARPILLAR de Estados Unidos, SKODA de Checoslovaquia, Volvo de Suecia, etc. En América del Sur investigaciones para aumentar la potencia de motores de combustión está limitada a países como Brasil y Argentina, pero en marcas de Estados Unidos y Europa. En el Perú por nuestro desarrollo industrial que debería incrementarse con el adelanto de la tecnología actual, sucedió lo contrario, hace algunos años existían plantas de montaje de automóviles como la de la marca Toyota, pero por políticas de los gobiernos en nuestro país actualmente no se diseñan ni construyen motores de combustión interna.

Considerando que la ciudad de Puno por las características topográficas de la geografía variada de nuestro país, está situada a una altitud de 3827 metros sobre el nivel del mar y, es más nuestra universidad está en Puno donde tenemos la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, que creo que es importante se estudie e investigue cómo influye su gran altitud sobre la potencia de un motor Otto.

El problema de la influencia de la altitud en la potencia de un motor de combustión interna Otto de aspiración natural o sea no sobrealimentado es importante porque la altitud



varía el ciclo termodinámico real de funcionamiento y lo que determina que las prestaciones del motor y el proceso de combustión, lo que implica cambios en la potencia del motor, con respecto a la potencia al nivel del mar. La altitud de Puno sobre el nivel del mar, influye de manera importante sobre el aire ambiental y su composición química. También en las diferentes capas e la atmósfera el aire varía en su temperatura y, algo importante la presión atmosférica del aire disminuye a mayor altitud, como consecuencia de la disminución de la columna de aire que soporta por encima y, también a la disminución de la densidad del aire.

En este contexto de análisis de parámetros de funcionamiento de un motor de combustión interna Otto para estudiar cómo influye la altitud de Puno en la potencia del motor, me propuse aportar con un análisis teórico para contribuir con esta temática que nos ataña por la gran altitud a que se sitúa Puno; formulándonos estas preguntas de investigación que fueron las guías del trabajo desarrollado:

- ¿Es posible realizar la caracterización geográfica de la altitud de Puno?
- ¿Es posible analizar los parámetros de funcionamiento de un motor de combustión interna Otto de aspiración natural?
- ¿Es posible analizar los parámetros que influyen sobre la potencia del motor Otto debido a la altitud de Puno?

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

La justificación fundamental del desarrollo de la investigación es el que siendo ingenieros mecánicos es relevante el conocimiento sobre el análisis teórico de los procesos que caracterizan el funcionamiento del ciclo real en el motor Otto de aspiración natural, considerando que los fundamentos de la teoría se analizan y examinan en función





de las características del trabajo del motor, que en la investigación es el funcionamiento del motor en la altitud con respecto al nivel del mar.

Otra justificación o razón importante que motivó la presente investigación es el error muy generalizado en ciudades que se encuentran a gran altitud sobre el nivel del mar, que cuando un motor de combustión interna funciona la pérdida de potencia se debe a que en la altitud existe menor oxígeno, lo cual es falso y, por ende, la investigación se justifica ...

La altitud geográfica de 3827 metros sobre el nivel del mar de Puno, como de centros mineros que están a más de 4000 m, influye significativamente en su funcionamiento, específicamente en su potencia; en el desarrollo de la tesis se obtendrán conocimientos para calcular la variación de la potencia por la altitud, lo cual es importante para seleccionar motores de la potencia adecuada, que de no ser así causarían pérdidas económicas para las empresas mineras; problemas que se evitarán con la ejecución de la tesis y por ende constituye una relevante justificación.

### **1.3. HIPÓTESIS GENERAL**

- Es posible analizar la influencia de la altitud de Puno sobre la potencia efectiva de un motor Otto aplicando la teoría de los motores de combustión interna.

### **1.4. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS**

- Es posible analizar y efectuar la caracterización de la altitud geográfica de Puno.
- Es posible estudiar y analizar los parámetros de funcionamiento de un motor de combustión interna Otto de aspiración natural.



- Es posible analizar la influencia de la altitud de Puno sobre la potencia efectiva parámetro de funcionamiento de un motor Otto de aspiración natural.

### **1.5. OBJETIVO GENERAL**

- Analizar la influencia de la altitud de Puno sobre la potencia efectiva de un motor de combustión interna Otto de aspiración natural.

### **1.6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar y caracterizar la altitud geográfica de Puno.
- Estudiar y analizar los parámetros de funcionamiento de un motor de combustión interna Otto de aspiración natural.
- Analizar la influencia de la altitud de Puno sobre la potencia efectiva parámetros de funcionamiento de un motor de combustión interna Otto de aspiración natural.



## CAPITULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

**Lapuerta, M. & Armas, O. & Agudelo, J. (2016).** Estudio del efecto de la Altitud sobre el comportamiento de motores de combustión interna. Información Tecnológica – Vol. 17 N° 5-2016, pág.: 21-30. La Serena – Chile. En el artículo analizan cómo influye la altitud en la potencia de motores de combustión interna teniendo en cuenta la presión ambiental, considerando que influye en la densidad y composición del aire. La altitud de un lugar geográfico modifica aspectos termodinámicos de funcionamiento del motor, de la combustión lo cual determina la contaminación del ambiente. La eficiencia indicada disminuye debido a que la presión en el cilindro disminuye en todo el ciclo del motor. La concentración del oxígeno disminuye con la altitud y no depende de la temperatura ambiental. Se sugiere considerar la ecuación hidrostática atmosférica para estudiar efectos de la altitud. Concluyen que la altitud influye negativamente sobre la potencia indicada y por ende en la efectiva de un motor de aspiración natural y funcionando a diferentes revoluciones por minuto.

**García, L. (2013).** Efecto de la altura en el desempeño de un vehículo a gasolina. tesis de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Actualmente la mejora de los motores de combustión interna está enfocada a lograr el menor consumo de combustible y disminuir la contaminación que producen. Los ensayos de motores de combustión no se realizan simulando las condiciones ambientales de altitud respectivas, por cuya razón no se pueden corregir los resultados obtenidos en estas investigaciones. Las condiciones geográficas asociadas a la altitud, también afecta a las



cargas resistivas del motor. Se concluye que la presión atmosférica tiene gran influencia en la entrega de potencia del motor, para comprender el efecto sobre las cargas aerodinámicas debe considerarse la densidad del aire en el sitio geográfico respectivo; una disminución de 18% en la densidad del aire produjo una disminución de 6% en el coeficiente de arrastre del vehículo en ensayo. Se logró un ahorro de economía en el combustible del orden del 5,7%, como consecuencia del aumento de potencia y en las cargas aerodinámicas.

**Bardález, A. (2012).** Estudio del efecto de la altitud y la utilización de mezclas Bx sobre el funcionamiento de motores encendidos por compresión. Tesis Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. El objetivo de la tesis es determinar la variación porcentual de pérdidas de potencia, eficiencia y consumo de combustible de un motor diésel, considerando varias altitudes, usando mezclas Bx. Metodológicamente se calculó por separado las variaciones porcentuales por altitud y mezclas Bx. En la tesis se analiza el efecto de la altitud sobre la potencia, eficiencia y consumo de combustible en el motor, se demuestra que con la altitud disminuye la densidad del aire y la presión atmosférica, afectando la potencia que genera el motor. También se analiza el efecto de utilizar biodiésel de palma aceitera, que tiene menor poder calorífico que el diésel 2, pero que por su mayor viscosidad y lubricidad disminuye las pérdidas por rozamiento del sistema de inyección del motor. Se concluye que a 3000 metros de altitud con combustible B5 el motor desarrolla una potencia 35% menor, 20% menos eficiente y; 44% más de combustible en volumen. La pérdida de potencia se debe a que la eficiencia del ciclo termodinámico en la altitud disminuye. También la presión atmosférica y la densidad del aire en la altitud decrecen lo que trae como consecuencia que disminuye la eficiencia del motor, y por lo tanto el consumo específico de



combustible aumenta, lo cual también se debe al menor poder calorífico del biodiesel (Bx).

**Velasco, C. & Velasco, J. (2014).** Efectos de la altitud sobre la Combustión. Revista Metalúrgica N° 35, 2014. Universidad Técnica de Oruro, Bolivia. La altitud afecta a los procesos de combustión, porque influye sobre la presión y temperatura atmosféricas, como también sobre los parámetros de combustión: temperatura de llama, velocidad de combustión; determinando las implicancias sobre la potencia de combustión y velocidad de deflagración. Es importante el estudio del efecto de la altitud sobre la combustión porque se determina criterios para el diseño de quemadores, cámaras de combustión, seguridad de la combustión, eficiencia de uso de combustibles. Para la combustión en la altitud debe considerarse la variación de la presión atmosférica y cómo influye sobre las propiedades de los combustibles y del aire; la presión del aire decrece, lo que se debe a la disminución del peso de la columna de aire y a la disminución de la densidad del aire. Las condiciones de la atmósfera influyen en los procesos de combustión porque influyen en las propiedades del carburante. La disminución de la proporción del oxígeno en el aire modifica la relación molar estequiométrica entre aire y combustible. La presión atmosférica es menor con la altitud, lo que hace más lenta la reacción de combustión, por lo tanto, el flujo de energía desde el quemador es menor. Concluyen que en la altitud hay menor disponibilidad de oxígeno, lo que implica que la combustión sea más lenta y la llama es más fría; y se incrementará los inquemados y productos de combustión incompleta y; alcanzar límites críticos de monóxido de carbono.

**López, E. (2018).** Efectos producidos por el cambio de presión atmosférica debido a la altitud y su relación con la pérdida de potencia en los motores de combustión interna ciclo Otto Mitsubishi 4G94. Tesis de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San



Carlos de Guatemala. En su resumen detalla que la altitud sobre el nivel del mar influye en el rendimiento de un motor de combustión interna ciclo Otto. En base a su funcionamiento y sus elementos del motor para realizar una buena combustión. Se buscan soluciones para mejorar su eficiencia. Conociendo la causa de la disminución de la potencia, se elimina restricciones de la admisión como el escape; logrando una mejora aceptable y el incremento de potencia, y no disminuya a altitudes significativas. Se estima que, por cada 1 Km de altitud, un motor disminuye 10% de potencia como consecuencia del decremento de la densidad del aire. El objetivo de la tesis es investigar efectos producidos por disminución de la presión atmosférica por la altitud y cómo se relaciona con la pérdida de potencia de un motor de combustión interna ciclo Otto. También determinar el efecto sobre el consumo de combustible por la pérdida de potencia y, evaluar el aumento de costos en consumo de combustible por la altitud. Proponer solución para la disminución de potencia en condiciones de disminución de oxígeno por unidad de aire, sin afectar la eficiencia de funcionamiento del motor.

**Molina, B. (2020).** Análisis de un motor ciclo Otto ante diferentes factores atmosféricos mediante un estudio comparativo de parámetros de identificación para obtener el rendimiento energético. Proyecto técnico, Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, Ecuador. En el resumen de la investigación se informa que es de tipo experimental, que considera para su análisis factores ambientales diferentes para el funcionamiento de un motor Otto, con el objetivo de determinar la eficiencia energética del motor funcionando de condiciones reales, considerando un estudio previo de las condiciones meteorológicas de la región Cuenca – Guayaquil, la cual es tomada como muestra por las diferentes variaciones ambientales a que somete al funcionamiento de vehículos automotrices. Para los ensayos el vehículo empleado en la ruta de investigación, es equipado con dispositivos de almacenamiento de base de datos como frematics One +

y Brain Bee AGS-688; se consideró dos tipos de combustible, Súper y Eco-país para analizar su influencia en la variación de la eficiencia energética. La información obtenida de la computadora del motor es sistematizada con software de MATLAB, obteniendo PIDs de los sensores durante su operación, lo que simplifica el estudio analítico de la comparación. Determinado la pérdida de potencia del motor utilizando Eco.país con respecto a la altura es del orden de 6,43% y con el combustible súper de 6.26% por cada 1000 metros sobre el nivel del mar.

**Yepes, V. (2023).** Influencia de los factores atmosféricos en el rendimiento de un motor atmosférico Universidad Politécnica de Valencia, España. El artículo de investigación concluye que, si se disminuye la presión atmosférica o si se produce un incremento de la temperatura o de la humedad relativa, estas variaciones producirán una disminución del oxígeno disponible en el aire para la combustión interna. En un motor atmosférico o de aspiración natural el efecto es mayor que un motor turboalimentado. Una recomendación empírica específica que por cada 100 m de incremento de la altitud respecto al nivel del mar, un motor de aspiración natural disminuye un 1,2% de la potencia, pero en un motor turboalimentado es solo de 0,8%. Además, si la temperatura aumenta 10°C, las pérdidas de potencia son del orden de 3,6% y de 5,4% en el otro motor respectivamente.

En el Manual del Atlas Copco de 1976 el factor de disminución de la potencia para los motores de aspiración natural se calcula por la expresión:

$$r = \frac{P_A - P_{HA}}{P_O - P_{HO}} \cdot \left(\frac{T_D}{T_A}\right)^{1/2}$$

Donde:

$r$  : factor de disminución



$P_O$  : Presión absoluta a la altitud respectiva, en bar

$P_A$  : Presión absoluta a la altitud

$P_H$  : Presión del vapor de la humedad del aire (bar)

$T_A$  : Temperatura absoluta a la altitud real (°K)

$T_O$  : Temperatura absoluta al nivel referencial

**Llañez, E. & Rocha (2019).** Estratificación de un motor de inyección directa a gasolina al variar la altitud, Artículo científico vol. 12 Num. 30 Universidad Estatal de Milagro, Ecuador. En este artículo se desarrolla una metodología experimental para estratificar la mezcla aire-combustible de un motor Otto de inyección directa. Cuando un vehículo trabaja de 0 a 4000 metros de altitud, se determina qué parámetros inciden al estratificar la mezcla aire combustible empleando el sistema GDI, aplicando un ensayo experimental dinámico considerando normas y protocolos de la SAE. Se usa un escáner de última tecnología y un GPS aplicando a un auto MAZDA CX-5; obteniéndose cuando se generan tipos de trabajo homogéneo pobre, estratificado en los ensayos. La altitud influye en los tipos de trabajo cada 500 m de altitud y se puede identificar cada tipo de trabajo con el escáner mediante datos y la variación en el funcionamiento por el tipo de trabajo.

**López, D. (2018).** Factores que afectan al rendimiento del motor: temperatura y altura. Revista actualidad del motor. Un motor de combustión necesita mezcla de aire – combustible preciso para funcionar, lo cual es simple en condiciones normales, lo que no sucede en condiciones de altitud o altas temperaturas, en ambas situaciones la eficiencia del motor es afectada. La combustión es una reacción química en la que se oxida rápidamente el combustible, siendo necesario el oxígeno como comburente, al rápido aumento de la temperatura, el oxígeno reacciona con el carbono, generando una





explosión. En situaciones de altitud existe poco oxígeno, y las explosiones son menores, perdiendo el motor capacidad en algunas circunstancias; a mayor altitud disminuye la concentración del aire; la concentración de oxígeno es igual a cualquier altitud (21%), en la altitud hay menos aire por consecuencia existe menor presión atmosférica.

**Arroyo, E. & Cevallos, A. (2021).** Estudio del efecto de la altitud sobre las emisiones de gases de escape de motores de combustión interna con encendido provocado. *Revista Ingeniería y Desarrollo* vol. 38, Barranquilla, Ecuador. En la investigación se estudia la influencia de la altitud en las emisiones de gases tóxicos de un motor cuyo encendido es provocado (MEP), en varios países la topografía variada influye en el funcionamiento de los motores. Se estudian los gases tóxicos generados por un MEP en altitudes. Se analizaron los gases en ciudades a 0, 2200 y 3000 m.s.n.m., a diferentes RPM (ralentí, 2000, 3500 y 4500 RPM). Se evaluaron el CO y CO<sub>2</sub> e hidrocarburos no quemados HC. El resultado fue que los RPM es el factor importante en la generación de CO y HC, al incrementarse las RPM el % de CO crece y HC disminuye. Pero los gases de CO<sub>2</sub> en la altitud son significativos, se hacen menores si disminuye la presión atmosférica.

**García, J. (2022).** La potencia: ¿Cómo le afecta la altura y la presión en los motores de combustión interna? *Revista Garaje Hermético*, Febrero 12, México. La altitud afecta a un motor de combustión interna como también a nosotros. En altitud existe menor presión y menor oxígeno en el aire, no es lo mismo un motor sobrealimentado que uno a aspiración natural. La sobrealimentación sirve para obtener mayor potencia en el motor y que ésta no sea mermada con la altitud. El motor de combustión interna para su funcionamiento necesita aire y presión precisa para operar eficientemente de acuerdo a especificaciones. A mayor altitud el aire tiene menos oxígeno, incluso a las personas les



cuesta moverse porque no llega la cantidad necesaria de oxígeno a la sangre, en forma análoga ocurre con un motor Otto, la mezcla estequiométrica es de 15 partes de aire por una parte de combustible; si falta oxígeno el poder calorífico de la detonación será muy pobre; a partir de 1500 m la pérdida de potencia es significativamente.

**Muñoz, L. (2019).** Efecto de la altura en el desempeño de un vehículo a gasolina. Tesis Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Colombia. La presión atmosférica influye en la potencia del vehículo analizado. Al considerar parámetros atmosféricos para comprender el efecto sobre cargas aerodinámicas, debe utilizarse la densidad del aire, los resultados señalan que si la densidad del aire disminuye 18,1% se obtendrá un decrecimiento de 5,8% en el coeficiente de arrastre del auto de ensayo. A baja altitud el auto de ensayo, se tiene un aumento de 5,7% en el consumo de combustible; al aumentar la producción de potencia y cargas aerodinámicas. En los ensayos realizados a diferentes presiones atmosféricas no se pudo establecer qué altitud influye en los indicadores usados en los ensayos de pista. Pero la metodología sí permitió medir en condiciones reales el cambio en el funcionamiento del auto de ensayos, como la influencia de las condiciones ambientales y principalmente las cargas aerodinámicas relacionadas con el cambio de la densidad del aire como los coeficientes de arrastre.

**Lima, R. (1996).** Análisis de los efectos de la altitud en el funcionamiento de los motores de automoción, dosificación e ignición. Tesis de la Universidad Politécnica de Catalunya, España. La investigación es una propuesta de un modelo de predicción de funcionamiento de carburadores en altitud, considerando variables no consideradas en modelos actuales, se quiere obtener procedimientos de compensación para la relación de la mezcla en la altitud y el retardo del ángulo de avance. En los cálculos de flujos de masa de aire real y combustible en los conductos de carburadores que tienen venturis dobles de



flujo constante, se determinó un modelo de simulación de dosificación en base a variables de operación del motor (RPM) y del ambiente. El modelo se contrasta con un motor de automóvil, donde el sistema de admisión a una depresión que se cambia a voluntad. Se estudia la influencia de la altitud sobre el aumento del ángulo de avance de encendido como causa del aumento de la fase de inicio de la llama como causa a los menores reactivos en el cilindro.

**Córdova, E. (2013).** Estudio de un motor de combustión interna para determinar sus parámetros de funcionamiento en el laboratorio. Tesis de la Universidad Técnica de Ambato, Ecuador. Se informa en el resumen ejecutivo de la importancia de los motores de combustión interna en la humanidad, por su uso en muchos dispositivos o máquinas que producen potencia. El objetivo de la investigación es estudiar los parámetros de funcionamiento de un motor Briggs & Stratton de 6,5 HP, empleando un freno Prony hidráulico para simular el trabajo del motor en varias etapas, obteniendo valores experimentales de velocidad, potencia y torque, aplicando al motor cargas hidráulicas que se regulan con válvula de paso, dándole la presión necesaria al agua con una bomba de 1 HP, la presión en el freno es 90,81 KPa que se origina en la fricción que transforma la energía mecánica en calor. La investigación experimental se basa en ensayos, fundamentándose en la bibliografía sistematizada.

**Erazo, D. & Viteri, A. (2017).** Análisis termodinámico de los parámetros indicados de un motor de ciclo Otto aspiración natural con sistema de inyección electrónica en función de la altitud sobre el nivel del mar. Tesis Facultad de Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Nacional, Quito. En el resumen del trabajo de investigación se expone el método para establecer la potencia, trabajo y presión media indicada del motor Otto en función de la altitud sobre el nivel del mar, aplicando un



análisis termodinámico en base a información obtenida por sensores del sistema de inyección y relación aire – combustible establecida por el factor lamda ( $\lambda$ ) determinado por un análisis de gases. Se determinó también parámetros indicados del motor que influyen en el funcionamiento del motor, estableciendo un protocolo de ensayo para la obtención de variables necesarias para el cálculo de parámetros indicados. Los resultados son la correlación entre los parámetros indicados determinados por ensayos estáticos al aumentar la altitud observando pérdidas de 0,5% por 100 metros de altitud.

**Peralta, G. (2013).** Efectos de la altitud sobre los motores de combustión interna. Prezi.com, Aplicación online. El rendimiento decrece por efecto de la altitud debido a que disminuye la presión en el cilindro durante el ciclo del motor provocando disminución de la potencia indicada; el tiempo desde que comienza la inyección hasta el inicio de la combustión se incrementa debido a la altitud en motores de aspiración natural.

La altitud respecto al nivel del mar influye en la densidad de aire y composición, como los motores de combustión interna tienen sistemas de admisión e inyección del combustible volumétricos también son afectados por la altitud, el ciclo termodinámico como las condiciones de combustión y en consecuencia se forman gases contaminantes; la menor presión y temperatura atmosférica disminuye la densidad del aire. En el año 2005 ensayos en un motor diésel de aspiración natural, se observaron disminuciones del orden de 24% en la potencia y un aumento del consumo específico de combustible aproximadamente de 4% funcionando a 2000 metros sobre el nivel del mar.



## **2.2. MARCO TEÓRICO**

### **2.2.1. Motor de combustión interna**

El profesor ruso Grinevetski en el año 1906, estableció el primer método de cálculo térmico del motor, desarrollado y complementado por los profesores Briling, Mazing y Stechkin, miembros de la Academia de Ciencias de Rusia. La energía mecánica es fundamental para la operación de máquinas, esta energía puede ser generada usando energía hidráulica, térmica, solar y eólica. Los motores de combustión interna que transforman energía térmica en trabajo útil consumen el 80% de energía de hidrocarburos en el mundo; en dichas máquinas se genera trabajo mecánico de la energía química que poseen los combustibles.

#### **2.2.1.1. Ciclo de funcionamiento de un motor de combustión interna Otto**

Un ciclo termodinámico es un proceso que al concluir deja al sistema como en el estado inicial que tenía; en un sistema es un espacio, o masa que se selecciona para el desarrollo del proceso, puede ser:

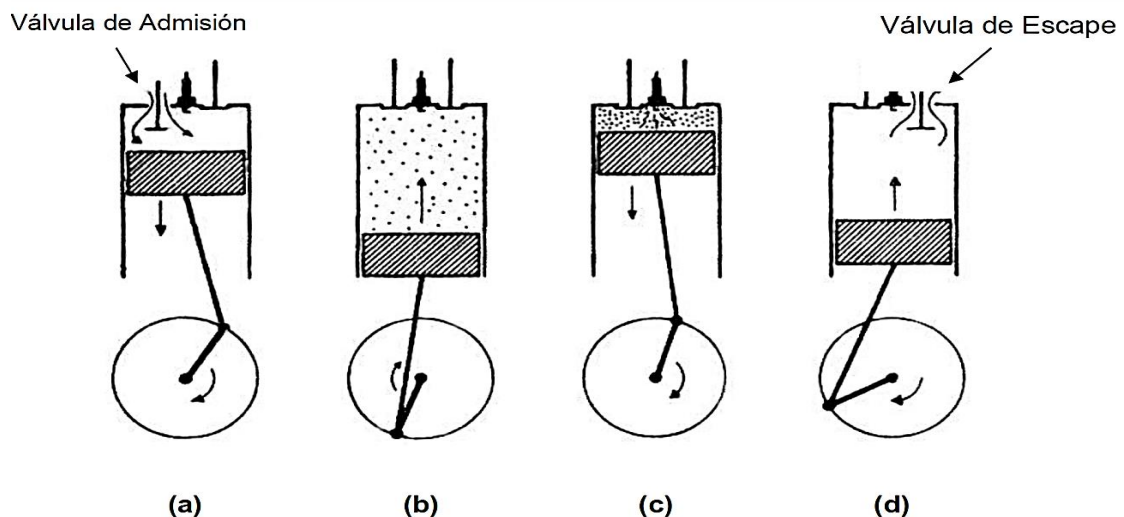
- Sistema cerrado, cuando no hay transferencia de masa entre sistema y alrededores.
- Sistema abierto, si existe transferencia de masa entre sistema y alrededores, el flujo de masa que ingresa es igual que sale de éste.

El ciclo mecánico de un motor Otto que opera a cuántos tiempos, desarrolla con cuatro carreras del pistón, dos revoluciones del cigüeñal y una vuelta del eje de levas.

En el motor Otto de cuatro tiempos ingresa en el proceso de admisión al cilindro una mezcla de aire y combustible en una proporción determinada y el pistón recorre desde

su punto muerto superior (PMS) hasta su punto muerto inferior (PMI); luego se comprime la mezcla y el pistón se desplaza del PMI hasta el PMS; terminando el proceso se produce la combustión de la mezcla por la chispa de la bujía, elevándose la presión y la temperatura de la mezcla a volumen constante mínimo, desplazándose el pistón del PMS al PMI.

El cigüeñal gira 720 grados o lo que es equivalente a dos revoluciones para completar los procesos de admisión, compresión, expansión y escape que se aprecian en la siguiente figura:



**Figura 1:** Tiempo de un ciclo Otto: a) Admisión, b) Compresión, c) Expansión, d) Escape

**Fuente:** <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt417.pdf>

#### 2.2.1.2. Ciclo Otto teórico

##### 0-1: Proceso de aspiración (isobárico)

Se abre la válvula de admisión y se admite mezcla de aire y combustible a presión atmosférica, logrando que el pistón descienda, permanece cerrada la válvula de escape.

### 1-2: Proceso de compresión (adiabático)

No hay transferencia de calor por las paredes del cilindro, se cierran las válvulas de admisión y escape y el pistón asciende comprimiendo la mezcla que se vuelve vapor.

### 2-3: Proceso de combustión (isocórico)

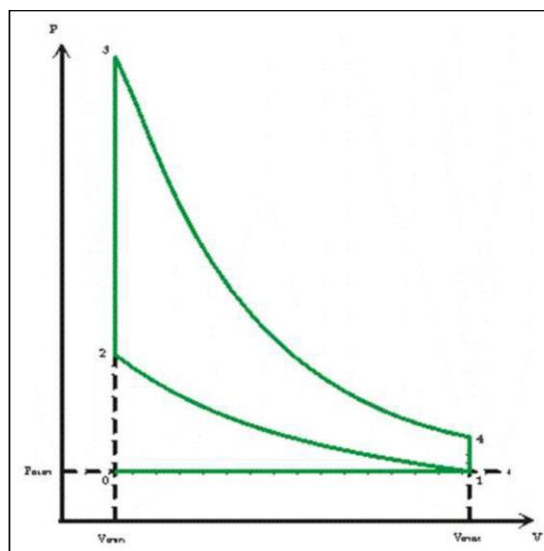
Las válvulas se cierran, al llegar el pistón al PMS, el gas que está comprimido se inflama por la chispa y se produce la combustión instantánea de la mezcla, y el volumen no varía, por lo que la presión aumenta rápidamente.

### 3-4: Proceso de expansión (adiabático)

La mezcla inflamada actúa sobre el pistón. En el proceso no hay transferencia de calor, al crecer el volumen, la presión disminuye.

### 4-1: Proceso de escape (isocórico)

Estando el pistón en el PMI, la válvula de admisión cerrada y la de escape abierta, la presión disminuye en forma rápida a volumen constante. Luego a presión atmosférica el volumen decrece. Los procesos son mostrados en la figura siguiente:



**Figura 2:** Ciclo de motor de combustión interna Otto teórico.

**Fuente:** <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt417.pdf>



### **2.2.1.3. Ciclo Otto real**

#### **0-1: Proceso de aspiración**

La presión del gas es menor a la presión atmosférica, después que el pistón llegue al PMI se cierra la válvula de admisión, prolongándose la admisión, entrando máxima mezcla de aire y combustible al cilindro.

#### **1-2: Proceso de compresión**

La mezcla transfiere calor al cilindro, entonces el gas se enfría y disminuye la presión.

#### **2-3: Proceso de combustión**

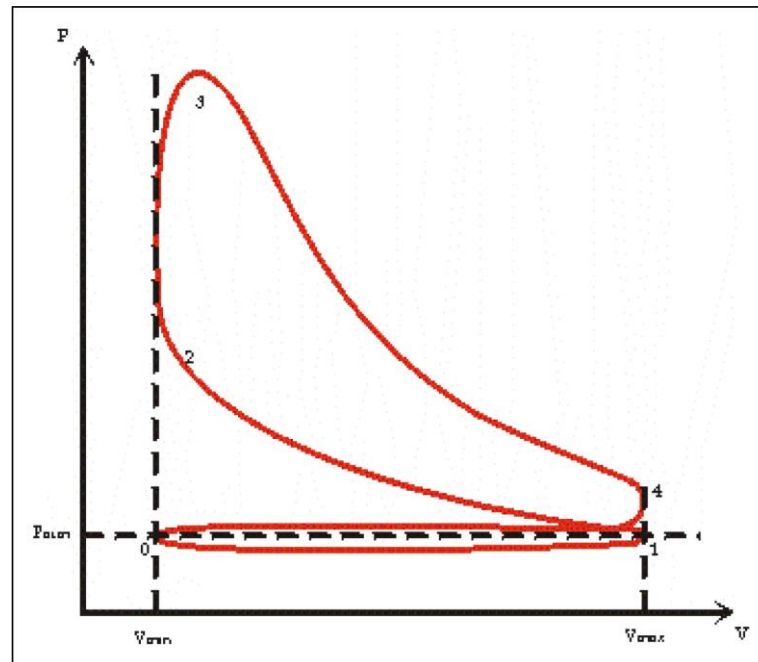
La combustión es lenta y el volumen varía con la inflamación, la chispa salta antes que termine la compresión, logrando aumentar la presión después de la combustión, generándose un gran trabajo.

#### **4-5: Proceso de escape**

El escape no es instantáneo, porque los gases tienen aún presión mayor que la atmosférica, la válvula se abre antes que el pistón llegue al PMI, al ascender habrá gases casi expansionados. Antes que el pistón llegue al PMS, se abre la válvula de admisión, generando depresión en el cilindro produciendo aspiración energética.

Los procesos se aprecian en la figura siguiente:





**Figura 3:** Ciclo de motor de combustión interna Otto real.

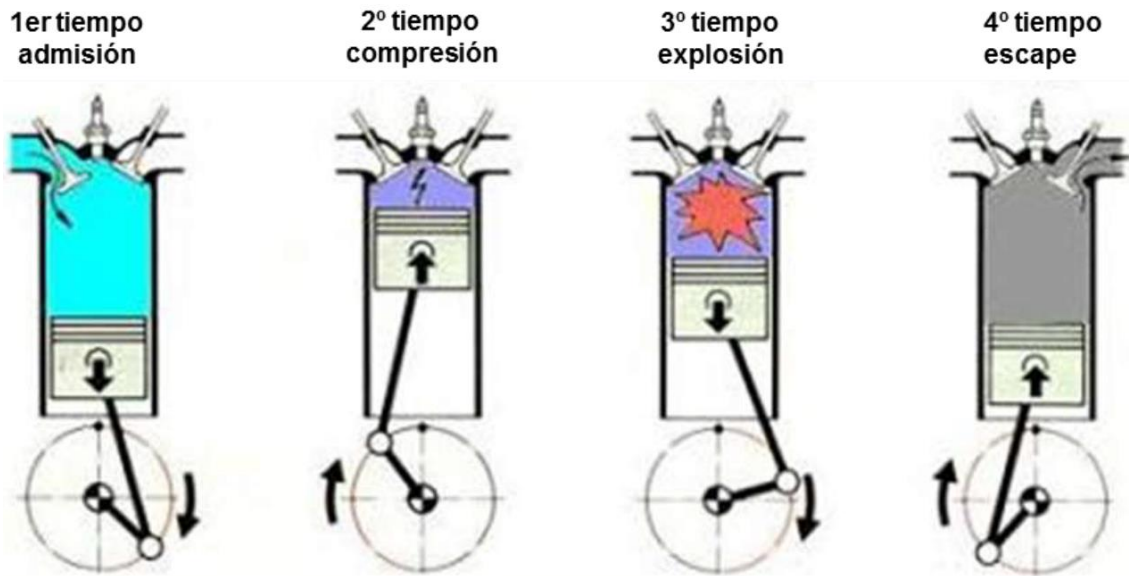
**Fuente:** <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt417.pdf>

#### 2.2.1.4. Motor de cuatro tiempos

Un motor es de cuatro tiempos, si el ciclo de trabajo se efectúa en dos vueltas del cigüeñal y cuatro carreras del pistón, las cuatro fases se realizan en el cilindro:

- Admisión de la mezcla aire-combustible.
- Compresión de la mezcla aire-combustible.
- Explosión de la mezcla aire-combustible.
- Escape de los gases de combustión.

En la figura siguiente se muestra un pistón realizando los cuatro tiempos.

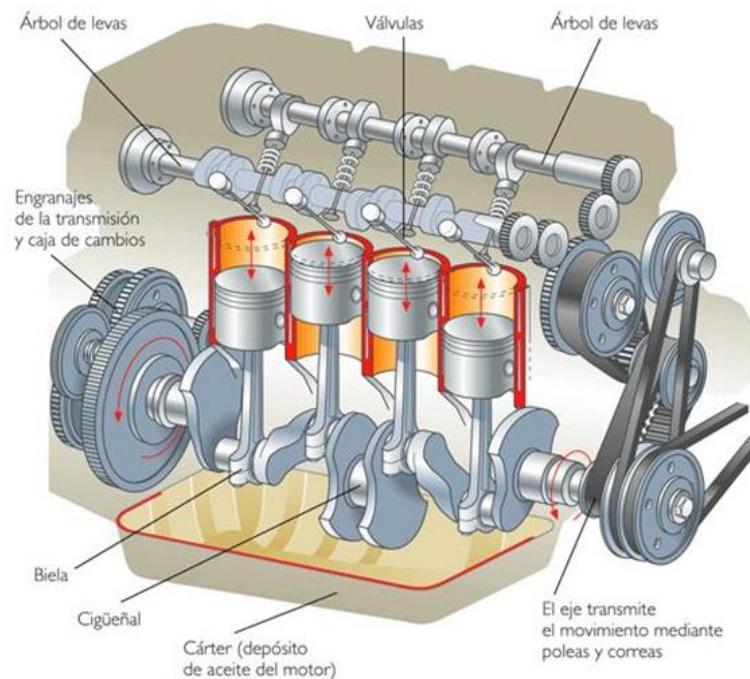


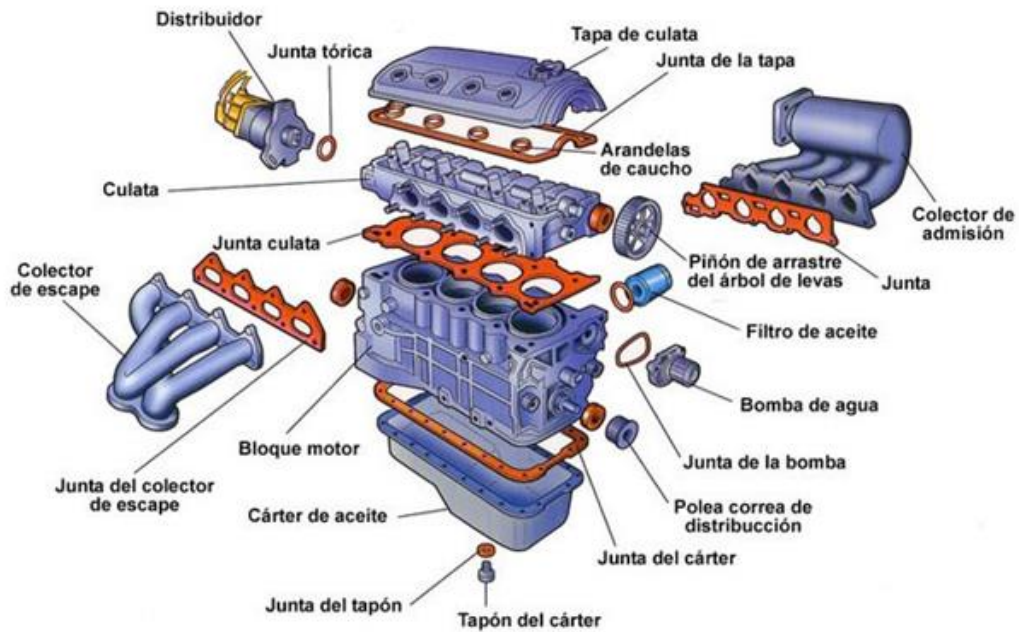
**Figura 4:** Ciclo de trabajo de un motor.

**Fuente:** <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt417.pdf>

### 2.2.2. Partes de un motor ciclo Otto

En la figura siguiente se muestra las partes y el despiece de un motor de cuatro cilindros en línea.





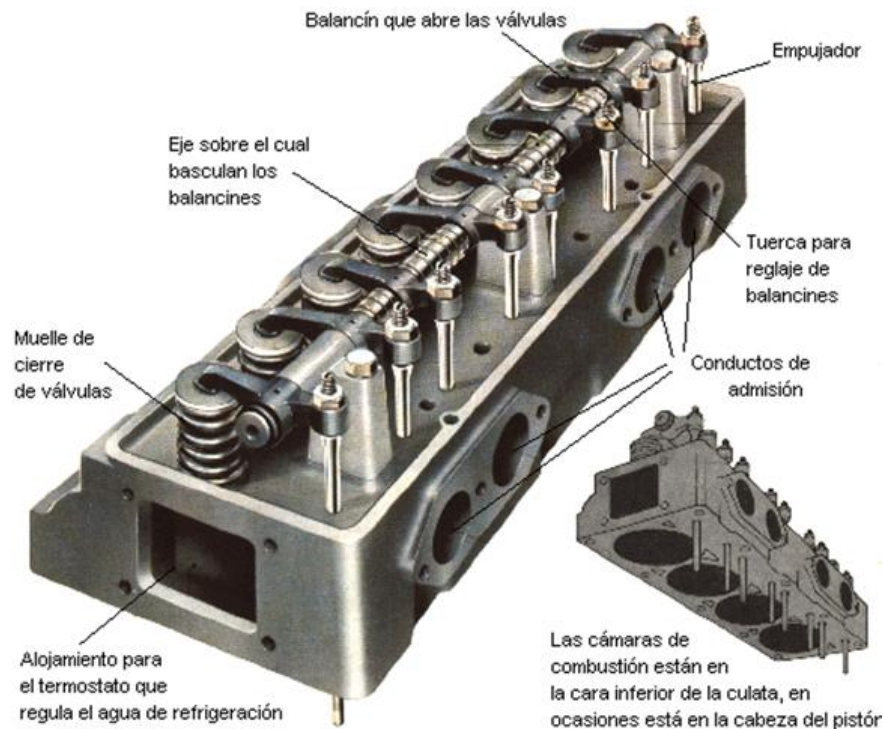
Despiece de un motor de 4 cilindros en línea

**Figura 5:** Partes de un motor ciclo Otto

**Fuente:** <http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/MotoresCombustion>

### 2.2.2.1. Culata

La culata es el elemento superior del motor, cierra los cilindros, en él se montan las válvulas, las bujías, árbol de levas, conductos de admisión y escape. La culata soporta las explosiones que se originan en los cilindros, por eso se atornilla al bloque del motor, tiene doble pared para el sistema de refrigeración, la junta de culata entre el bloque y culata garantiza su hermeticidad, la culata se fabrica de hierro fundido o aluminio, materiales que se enfrían en forma rápida y resisten presiones altas internamente.



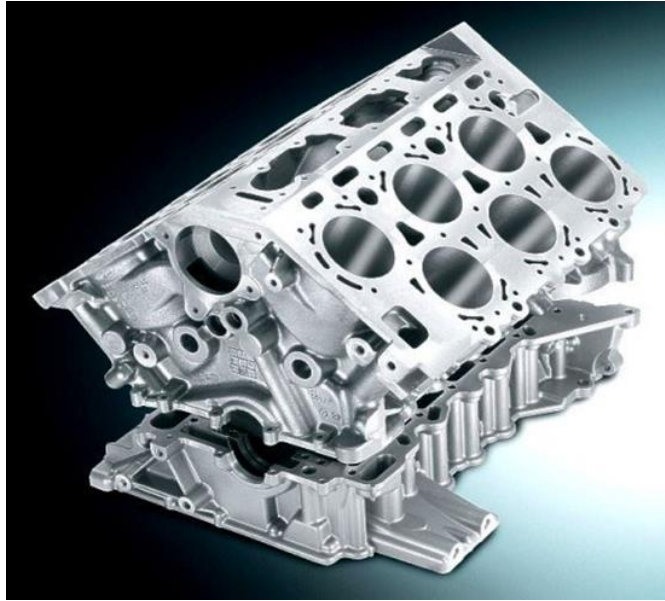
Empaque de Culata del Motor de Combustion Interna

**Figura 6:** Culata y empaque de culata del motor de combustión interna

**Fuente:** <http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/MotoresCombustion>

#### 2.2.2.2. Bloque de cilindros

El bloque de cilindros es fabricado de hierro o aluminio de una sola pieza, en su interior se sitúan los cilindros del motor, los soportes para el apoyo del cigüeñal, las bielas operan la subida y bajada de los pistones en el interior de los cilindros. En motores por refrigeración líquida, existen conductos por los que circula el agua y también conductos para la lubricación, usualmente el filtro de aceite está en el bloque del motor. Para el cálculo de la cilindrada del motor, se mide el diámetro del cilindro y la carrera del pistón.



**Figura 7:** Bloque de cilindros

**Fuente:** <http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/MotoresCombustion>

### 2.2.2.3. Árbol de levas

El árbol de levas es un eje con diseño particular que regula el proceso de abrir y cerrar las válvulas. El árbol está formado por dispositivos llamados levas de formas y tamaños diferentes, que permiten asegurar una operación correcta del motor respecto a rangos especificados de revoluciones por minuto y velocidades respectivas.



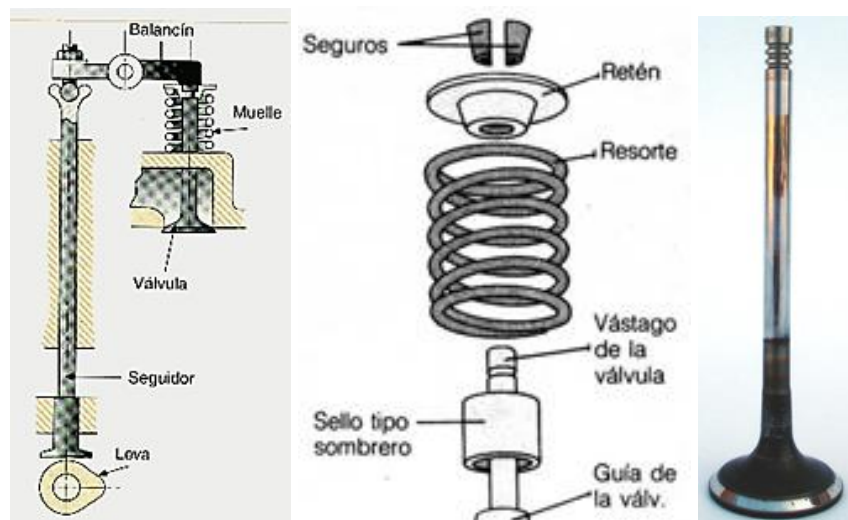
**Figura 8:** Árbol de levas

**Fuente:** <http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/MotoresCombustion>

#### 2.2.2.4. Válvulas

Las válvulas son dispositivos que permiten el flujo de gases al cilindro. Son mecanismos robustos y fabricados de acero, titanio, porque trabajan a muy altas temperaturas.

El motor teniendo en cuenta el número y posición de las válvulas tendrá un comportamiento determinado. Motores de 16 válvulas, permiten un mejor flujo de gases hacia el cilindro y un funcionamiento adecuado a altas revoluciones por minuto.



**Figura 9:** Válvulas de admisión y escape

**Fuente:** <http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/MotoresCombustion>

#### 2.2.2.5. Pistones

Son elementos de máquinas ubicadas dentro del cilindro, transmiten la potencia de los gases de combustión a la biela, la que transmite la potencia al cigüeñal. Está constituido por la cabeza, parte superior en contacto con el fluido, el cielo es la parte superior del pistón, el perno que articula el pistón y biela, las faldas que guían el desplazamiento del pistón en el interior del cilindro.



**Figura 10:** Pistón de un motor

**Fuente:** <http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/MotoresCombustion>

### 2.2.2.6. Cilindros

Son elementos tubulares por donde se desplazan los pistones y el origen de su nombre es por su forma geométrica. Son fabricados de metales resistentes, porque en el funcionamiento del motor crean y soportan explosiones elevadas de energía. Un motor puede tener desde uno, doce a catorce cilindros, el conjunto de cilindros se le denomina bloque motor.

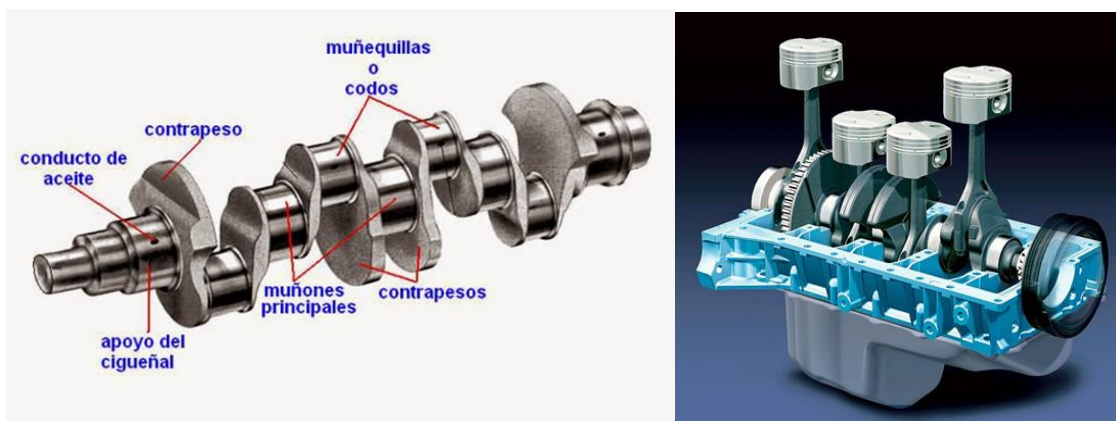


**Figura 11:** Cilindros de un motor

**Fuente:** <http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/MotoresCombustion>

### 2.2.2.7. Cigüeñal

El cigüeñal es como el eje principal del motor, en el proceso de la combustión soporta elevadas fuerzas y presiones. Al operar empuja a los pistones que transfieren la energía mecánica al cigüeñal por intermedio de las bielas, transformando los desplazamientos alternativos en fuerzas.



**Figura 12:** Cigüeñal de un motor

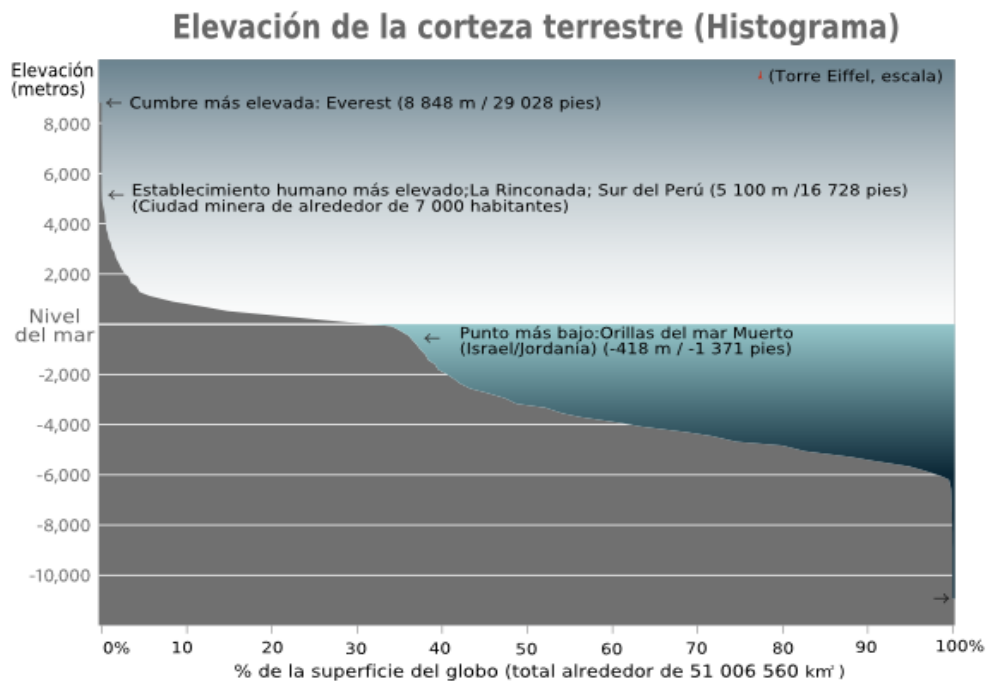
**Fuente:** <http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/MotoresCombustion>

### 2.2.3. Altitud

Se define la altitud como la distancia vertical entre un punto cualquiera de la tierra con respecto al nivel del mar. Si se desea calcular la altitud, se debe tomar como referencia el nivel del mar, expresándose por eso la altitud en unidades de metros y a continuación las letras s.n.m., es decir se acostumbra utilizar m.s.n.m., que significa metros sobre el nivel del mar. En la ciencia de la geografía, se define la altitud como la distancia vertical que existe entre un punto cualquiera de la tierra con referencia al nivel del mar, denominada elevación sobre el nivel medio del mar, que no debe confundirse con la altura, que es la distancia vertical entre dos puntos cualesquiera de la superficie de la tierra; y la definición del nivel de vuelo, como la altitud respecto a la presión estándar



medida con un instrumento llamado altímetro, el que está situado a más de 20 000 pies respecto al nivel medio del mar.



**Figura 13:** Altura y profundidad máximas en la tierra

**Fuente:** es.m.wikipedia.org

En Europa, Iberoamérica y otras ciudades del mundo, la altitud se mide en metros (m). En Estados Unidos se mide en pies o en la unidad del Sistema Internacional de Unidades (SI).

En aviación en todo el mundo la altitud se expresa en pies, en la Unión Soviética en metros.

En meteorología la altitud se considera como un parámetro que determina cambios de temperatura, considerándose que por cada 100 metros de altitud la temperatura decrece en 0,65 °C.

### 2.2.3.1. Altímetro

El altímetro es un instrumento que mide la diferencia de altitud entre el punto donde se sitúa el altímetro y un punto con respecto al cual se mide; usualmente se usa para determinar la altura sobre el nivel del mar. En todo el mundo el altímetro se calibra en hectopascales (hPa), en Estados Unidos y Japón en pulgadas de mercurio (inHg).



**Figura 14:** Altímetro

**Fuente:** es.m.wikipedia.org

En aeronáutica es la mayor utilización del altímetro, como instrumento de seguridad del avión.

En otras actividades como en deportes como el montañismo, ciclismo, esquí, paracaidismo, etc., se usa para identificar desniveles que se están pasando en el trayecto.

### 2.2.3.2. Coordenadas geográficas

Las coordenadas geográficas constituyen un sistema de referencia que a través de él se puede ubicar cualquier punto de la tierra, que es especificado por números y letras.

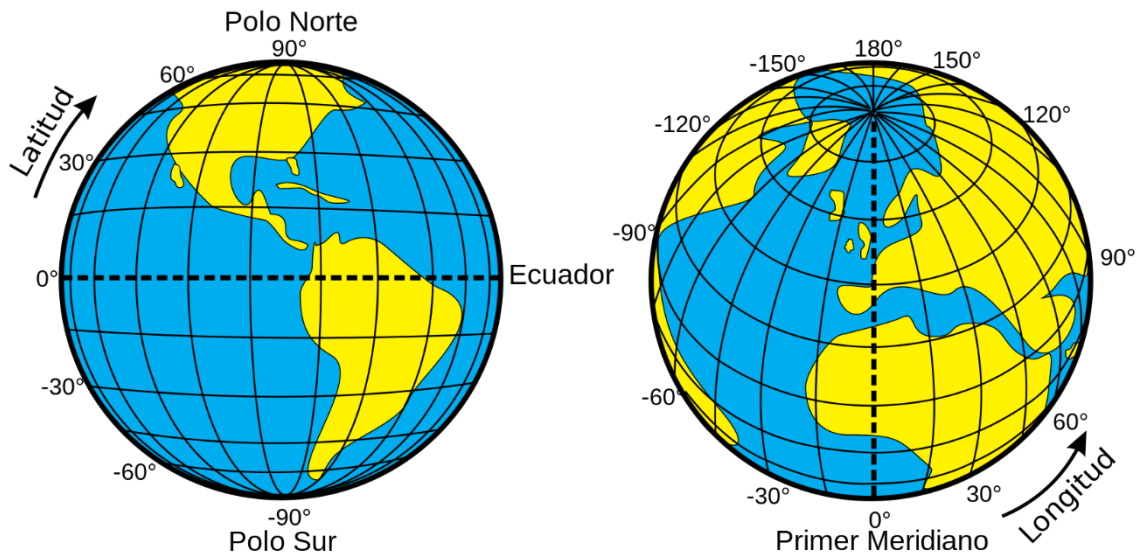
- **Latitud**

La latitud es el ángulo que forma el plano ecuatorial y la línea trazada a través de este punto y el centro de la tierra. Todos los puntos con igual latitud determinan una superficie paralela a la superficie del Ecuador. El ecuador divide la tierra en hemisferios sur y norte, por ejemplo, el polo norte es  $90^{\circ}\text{N}$  y el polo sur es  $90^{\circ}\text{S}$ .

- **Longitud**

De un punto de la tierra es el ángulo formado por el meridiano de referencia y el meridiano que atraviesa este punto. El meridiano de referencia es el de Greenwich ubicado al sureste de Londres, determinando los hemisferios este y oeste.

La distancia en Km equivalente a un grado de longitud depende de la latitud.



**Figura 15:** Las coordenadas geográficas Latitud y Longitud

**Fuente:** es.m.wikipedia.org



### **2.2.3.3. Insolación terrestre**

Depende de la latitud, porque la distancia a la que nos encontramos respecto al sol, los rayos del sol son prácticamente paralelos cuando llegan a la tierra. La pendiente de los rayos es variable y depende de la latitud cuando inciden sobre la tierra.

### **2.2.4. Presión Atmosférica**

La atmósfera es una masa de un fluido en estado gaseoso que ejerce presión sobre cualquier cuerpo sumergido en ella, también los seres humanos. Se define la presión atmosférica como la fuerza por unidad de área que la atmósfera ejerce sobre un punto cualquiera de la tierra. La presión atmosférica se genera en la acción de fuerza ejercida por la gravedad sobre la columna de aire encima de este punto; la presión atmosférica es igual a la presión ejercida por la columna de aire encima de dicho nivel, hasta el límite real de la atmósfera, lo que implica que a mayor altitud será menor la presión atmosférica.

La densidad del aire es menor a mayor altitud, la temperatura y la presión del aire influyen en la densidad que varía en el tiempo. El aire frío tiene un peso mayor que el caliente, factor importante que influye en la variación de la presión atmosférica a la misma altitud.



**Figura 16:** Presión atmosférica

**Fuente:** <https://www.todamateria.com>

Las unidades usuales en meteorología son los milibares (mbar) o hectopascales (hPa) históricamente se medía en milímetros de mercurio (mmHg), la altura que alcanza la columna de mercurio que equilibra con la presión de la atmósfera. La presión atmosférica al nivel se considera 1013 hPa; 1013 mbar; 1 atm; 760 mmHg.

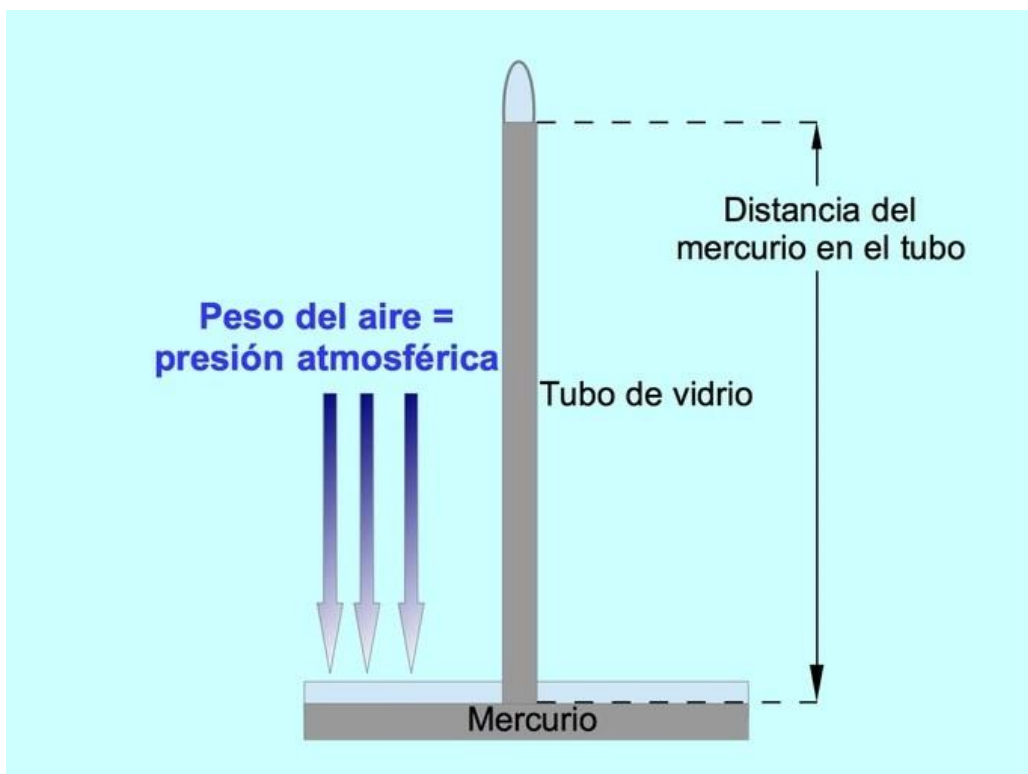
#### **2.2.4.1. Barómetro**

La presión atmosférica se mide con instrumentos llamados barómetros, que miden el peso del aire; determinar la presión atmosférica nos ayuda a realizar pronósticos del tiempo, si la presión atmosférica es alta el tiempo es calmado y claro y, a presión atmosférica baja el ambiente presenta nubes y lluvia. Los barómetros son de dos tipos:

- Barómetros de mercurio
- Barómetros aneroides

- **Barómetros de mercurio**

Estos barómetros fueron los primeros que se emplearon para la medición de la presión atmosférica, están constituidos por un tubo de vidrio con mercurio (Hg) el cual está inmerso en un depósito de mercurio, la presión del aire de la atmósfera hace que el mercurio del tubo baje o suba, la altura del mercurio nos indica la medida de la presión atmosférica en mmHg.



**Figura 17:** Esquema del barómetro de mercurio

Elaboración propia

- **Barómetros aneroides**

Los barómetros aneroides en la actualidad son los usados para medir la presión atmosférica, por ser simple su construcción y transporte. Están formados por discos de metal dispuestos en un depósito cerrado, conjuntamente con un

mecanismo de un sistema de palancas que accionan una aguja que registra la presión atmosférica en un papel milimetrado.



**Figura 18:** Barómetro Aneroide clásico

**Fuente:** <https://www.todamateria.com>

- **Fórmula para calcular la presión atmosférica**

Si no se dispone de un barómetro a la mano, podemos calcular la presión atmosférica por la fórmula:

$$\text{Presión atmosférica} = \text{altura} \times \text{densidad} \times \text{gravedad}$$

Donde:

- La altura de la atmósfera en el lugar
- La densidad del aire en el lugar
- La aceleración de la gravedad

La altura de la atmósfera es la cantidad de la masa del aire que se tiene sobre el lugar.

La densidad permite determinar la cantidad de masa de aire que está contenida en el volumen de aire del ambiente del lugar.



La aceleración de la gravedad es la fuerza de atracción de la tierra que influye en el cálculo del peso del aire.

En la tabla siguiente se muestra valores de la presión atmosférica según la altitud.

**Tabla 1:** Valores aproximados de la presión atmosférica.

Metros sobre el nivel del mar	Presión atmosférica			
	Pascal	mmHg	atm	bar
0	101 300	760	1	0,101
500	95 500	716,3	0,943	0,955
1000	89 900	674,3	0,887	0,899
2000	70 500	528,8	0,696	0,705
3000	70 100	525,8	0,692	0,701
4000	61 600	462,0	0,608	0,616
5000	54 000	405,0	0,533	0,540
6000	47 200	354,0	0,466	0,472
7000	41 200	309,0	0,407	0,412
8000	35 600	267,0	0,351	0,356
9000	30 700	230,3	0,303	0,307
10 000	26 400	198,0	0,261	0,264

**Fuente:** <https://www.todamateria.com>





## CAPITULO III

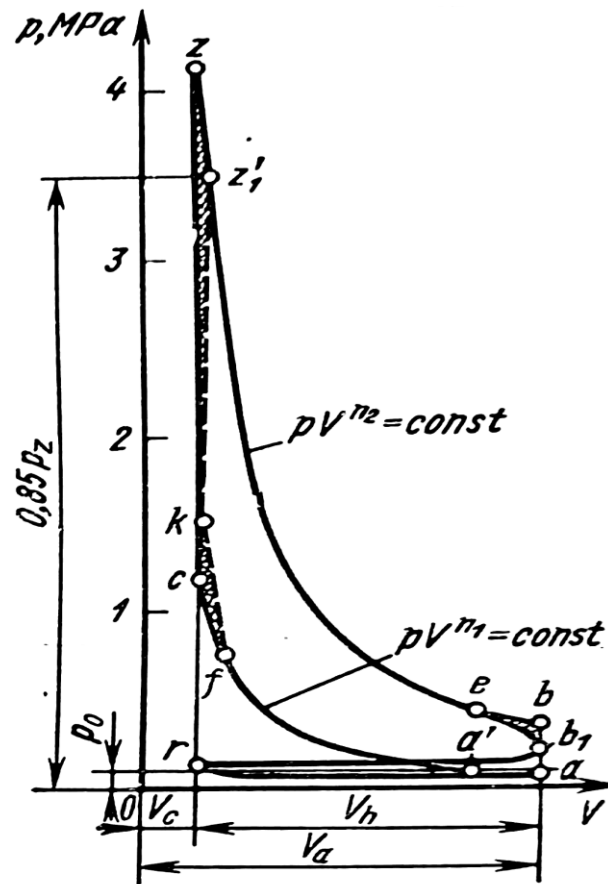
### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. MATERIALES

La metodología desarrollada en la investigación será en tres fases. En la primera se caracterizará la altitud **geográfica** de Puno; en la segunda fase se empleará la metodología clásica desarrollada por investigadores del Instituto de Automóviles y Carreteras de Moscú, Rusia, para analizar la teoría de los parámetros de funcionamiento de un motor Otto de aspiración natural y, en la tercera fase se determinarán qué parámetros son influenciados por la altitud de Puno y que actúan sobre la potencia efectiva del motor.

##### 3.1.1. Metodología para el análisis de los parámetros indicados del motor de combustión interna Otto de aspiración natural

En la figura siguiente se puede apreciar el diagrama indicado de un motor Otto de aspiración natural de cuatro tiempos. El área bajo la curva es igual al trabajo indicado del ciclo del motor. Este trabajo no se puede transmitir en forma total del cigüeñal, porque una parte se pierde por la fricción en elementos móviles y en mecanismos auxiliares, que constituyen las pérdidas mecánicas del motor y las cuales se restan del trabajo indicado; el resultado es el trabajo efectivo en el eje que puede usar el consumidor.



**Figura 19:** Diagrama indicado de un motor Otto de cuatro tiempos de aspiración natural.

**Fuente:** Jovaj, M. (2017). Motores de Automóvil (pp. 167) Moscú. Editorial MIR.

Los parámetros indicados del motor Otto de aspiración natural, caracterizan el ciclo teórico perfecto del motor, respecto del aprovechamiento total del calor y está relacionado con los procesos ideales del motor.

### 3.1.1.1. Potencia indicada ( $N_i$ )

El trabajo indicado efectuado en el ciclo se determinó por la siguiente expresión:

$$L_i = P_i V_h$$

Donde:

$P_i$  : presión media indicada, en Pa

$V_h$  : volumen del cilindro, en  $m^3$



$$V_h = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S$$

Donde:

$D$  : diámetro del cilindro, en m

$S$  : carrera del pistón, en m.

El motor en 1 s realiza  $2 n/\tau$  ciclos de trabajo ( $n$  en RPS;  $2n$  carreras del pistón;  $\tau$  número de carreras por cada ciclo).

Por consiguiente la potencia indicada de un cilindro, en W, es:

$$N_{ic} = \frac{2}{\tau} \cdot P_i \cdot V_h \cdot n$$

Para un motor de “ $i$ ” cilindros:

$$N_i = \frac{2}{\tau} \cdot P_i \cdot i \cdot V_h \cdot n \quad (1)$$

Si:

$P_i$  : potencia media indicada, en MPa

$V_h$  : Volumen de trabajo del cilindro, en L

$n$  : RPM

Entonces, la potencia indicada para un cilindro está expresada en KW, está expresada por la ecuación:

$$N_i = \frac{P_i \cdot i \cdot V_h \cdot n}{30 \tau} \quad (2)$$

Si el motor tiene cuatro tiempos,  $\tau = 4$ :

$$N_i = \frac{P_i \cdot i \cdot V_h \cdot n}{120} \quad (3)$$

Para un motor de dos tiempos,  $\tau = 2$ :

$$N_i = \frac{P_i \cdot i \cdot V_h \cdot n}{60} \quad (4)$$

### 3.1.1.2. Presión media indicada ( $P_i$ )

La presión media indicada se determina utilizando un analizador de diagrama en un cilindro de un motor, dispositivo que genera un diagrama indicado como se aprecia en la figura siguiente:

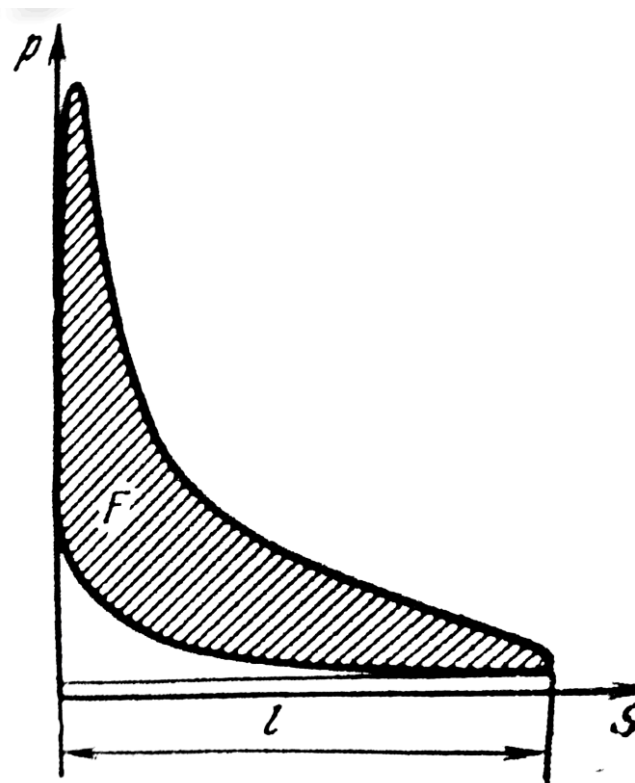


Figura 20: Diagrama indicado

**Fuente:** Jovaj, M. (2017). Motores de Automóvil (pp. 172) Moscú. Editorial MIR

En el diagrama se mide el área ( $F$ ) en  $\text{mm}^2$ , la longitud ( $l$ ) en  $\text{mm}$  y, donde  $K$  es una constante en  $\text{mm/MPa}$ . La presión media indicada se calcula por:



$$P_i = \frac{F}{lK} \quad (5)$$

### 3.1.1.3. Consumo específico indicado de combustible ( $g_i$ )

Si en el desarrollo de los ensayos se calcularon la potencia indicada del motor Otto y se determinaron el consumo de combustible en una hora, por consiguiente, se puede calcular el consumo específico indicado de combustible en g/(KW-h) por la ecuación:

$$g_i = \frac{G_C \cdot 10^3}{N_i} \quad (6)$$

Donde:

$G_C$  : consumo de combustible, en Kg/h

$G_C$ , es calculado en el ensayo del motor operando en régimen estacionario, manteniendo constante  $N_i$ ,  $P_i$  y  $n$ .

### 3.1.1.4. Eficiencia indicada ( $N_i$ )

Conociendo el poder calorífico del combustible ( $H_u$ ), se puede calcular la eficiencia indicada a través de la ecuación:

$$\eta_i = \frac{1}{H_u \cdot g_i} \quad (7)$$

Donde:

$H_u$  : poder calorífico del combustible, en J/Kg

$g_i$  : consumo específico indicado de combustible, en Kg/J

Al estudiar el comportamiento de motores que consumen combustibles que tengan diferentes poderes caloríficos ( $H_u$ ), la utilización del calor se debe evaluar considerando



la eficiencia indicada.

### 3.1.1.5. Relación entre los parámetros del ciclo de trabajo

En el estudio de los factores que tienen influencia en los índices del ciclo de trabajo del motor y la determinación de las consideraciones para prever la economía de combustible del motor en su diseño, se puede realizar utilizando las ecuaciones que se exponen:

- a) Se puede calcular la cantidad de mezcla fresca, en Kg, que ingresa al cilindro del motor Otto en cada ciclo de trabajo a través de la ecuación:

$$G_{m,cicl} = \frac{\alpha \cdot l_o \cdot G_c \cdot \tau}{2 i n} \quad (8)$$

Donde:

$G_c$  : en Kg/s

$n$  : en revoluciones por segundo, RPS.

- b) La cantidad de aire, en Kg, es decir el volumen de trabajo que podría ocupar un cilindro considerando condiciones ambientales, se calcula por la ecuación:

$$(G_a)_{P_K T_K} = V_h \cdot \rho_k \quad (9)$$

Donde:

$V_h$  : en m<sup>3</sup>

$\rho_K$  : en Kg/m<sup>3</sup>

- c) Para calcular el consumo de combustible ( $G_c$ ), en Kg/s se puede emplear la ecuación:



$$G_c = g_i \cdot N_i = \frac{2i \cdot V_h \cdot n}{\tau} P_i \cdot g_i \quad (10)$$

Donde:

$g_i$ , en Kg/J

$N_i$ , en W

$V_h$ , en m<sup>3</sup>

$P_i$ , en  $P_\alpha$

d) Por consiguiente, se puede calcular el coeficiente de llenado por la ecuación:

$$\eta = \frac{G_{m.cic}}{(G_a)_{PKTK}} = \frac{\alpha \cdot l_o}{\rho_K} \cdot P_i \cdot g_i \quad (11)$$

e) Entonces, el consumo específico indicado de combustible, en Kg/J, se puede calcular por la ecuación:

$$g_i = \frac{\rho_K}{l_o} \cdot \frac{n_V}{\alpha \cdot P_i} \quad (12)$$

f) Por lo tanto, el consumo específico de combustible, en g/(KW-h), se puede expresar como:

$$g_i = 3600 \frac{\rho_K \cdot n_V}{\alpha \cdot l_o \cdot P_i} \quad (13)$$

Donde:

$P_i$ , en  $MP_a$

g) Reemplazando la ecuación (12) para  $g_i$  en la ecuación (7), determinamos la siguiente ecuación para la eficiencia indicada:



$$\eta_i = \frac{1}{H_u \cdot g_i} = \frac{l_o}{H_u} = \frac{\alpha \cdot P_i}{\eta_v \cdot \rho_K} \quad (14)$$

Donde:

$H_u$ , en MJ/Kg

$P_i$ , en MPa.

- h) Al analizar las ecuaciones (12) y (14) poder establecer la relación existente entre los parámetros  $g_i$  o  $\eta_i$  con los parámetros que influyen en el trabajo del motor.

Calculando  $\alpha$ ,  $\eta_v$ ,  $l_o$ ; los parámetros de admisión del aire y el poder calorífico, se puede establecer en el diseño de un motor su eficiencia y previsión económica.

- i) Si analizamos la ecuación (14), deducimos que a través de ella podemos calcular la presión media indicada del correspondiente ciclo de trabajo, en Pa:

$$P_i = \frac{H_u}{l_o} \cdot \frac{\eta_i}{\alpha} \cdot \eta_v \cdot \rho_K \quad (15)$$

En la ecuación anterior si la unidad de  $H_u$  es MJ/Kg, entonces la unidad de  $P_i$  será MPa.

- j) Si de la ecuación (15), despejamos  $P_i$  y lo sustituimos en la ecuación (19), determinaremos una ecuación para la potencia indicada del motor, en W:

$$N_i = \frac{H_u}{l_o} \cdot \frac{\eta_i}{\alpha} \cdot \frac{2n}{\tau} \cdot i \cdot V_h \cdot \eta_v \cdot \rho_K \quad (16)$$

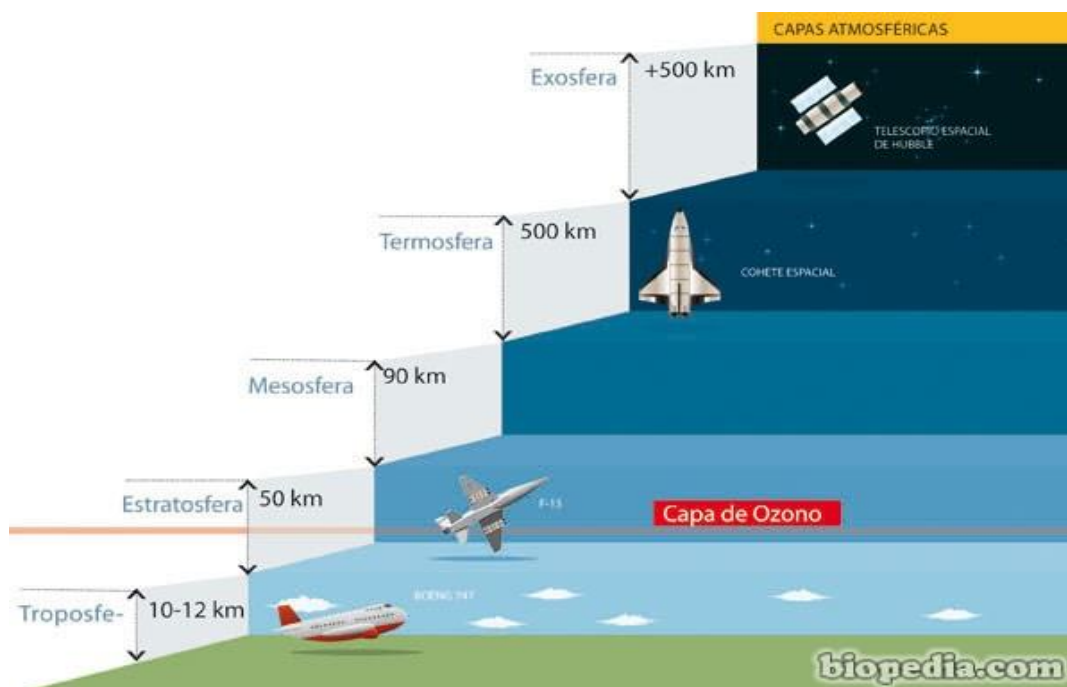
- k) Si en la ecuación (2), las unidades de  $V_h$  en L;  $n$  en RPM y  $H_u$  en MJ/Kg; entonces  $N_i$  estará expresado en KW.



$$N_i = \frac{H_u}{l_o} \cdot \frac{\eta_i}{\alpha} \cdot \frac{n}{30\tau} \cdot i \cdot V_h \cdot \eta_V \cdot \rho_K \quad (17)$$

### 3.1.2. Presión atmosférica y variación de oxígeno en altura

A mayor altitud sobre el nivel del mar, la concentración de oxígeno existente en el aire decrece, por lo que sentimos los efectos del mal debido a la altitud: mareos, náuseas, dolores de cabeza, taquicardia y en casos extremos edema pulmonar. Hasta los 100 kilómetros sobre la superficie terrestre, la concentración de oxígeno en el aire es constante: 21% oxígeno, 71% nitrógeno y 1% diferentes gases.

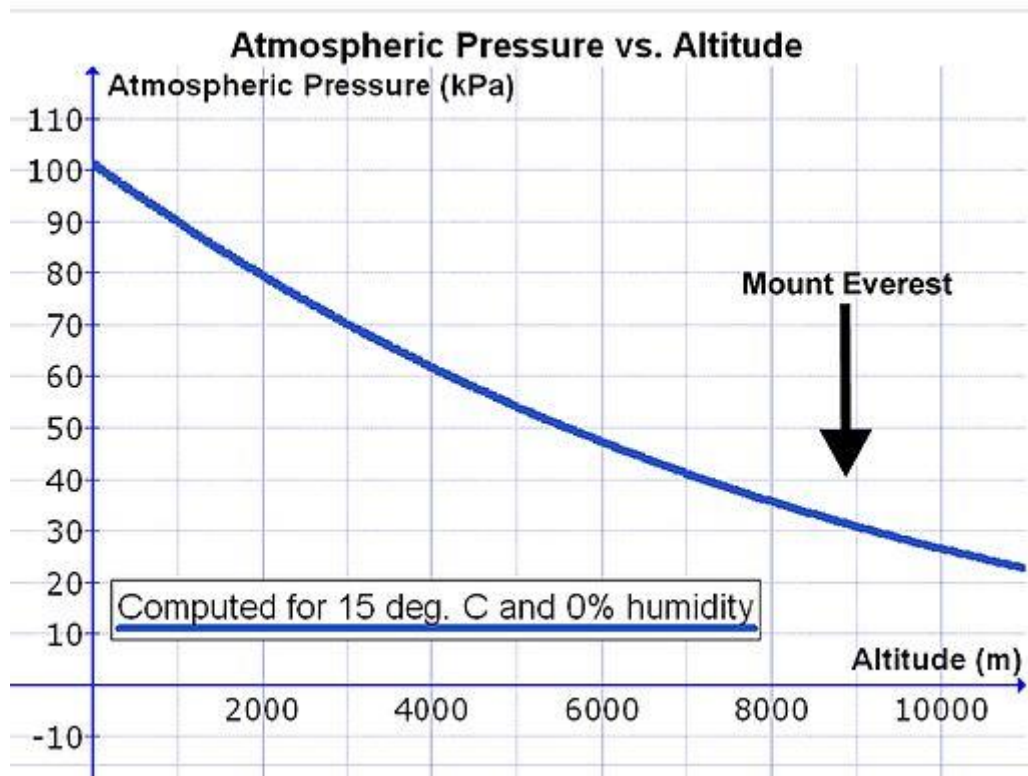


**Figura 21:** El aire contiene un 21% de oxígeno en los primeros 100 Km de la atmósfera.

**Fuente:** <https://www.aristasur.com/sites/as/users/3/image/capas-atmosfera.jpg>

Por consiguiente, a diferentes altitudes sobre el nivel del mar no disminuye la concentración de oxígeno existente en el aire, lo que en realidad decrece es la presión atmosférica, que ejerce presión sobre nosotros debido a la columna de aire de la atmósfera; a mayor altitud existe una menor cantidad de partículas de aire, lo que implica

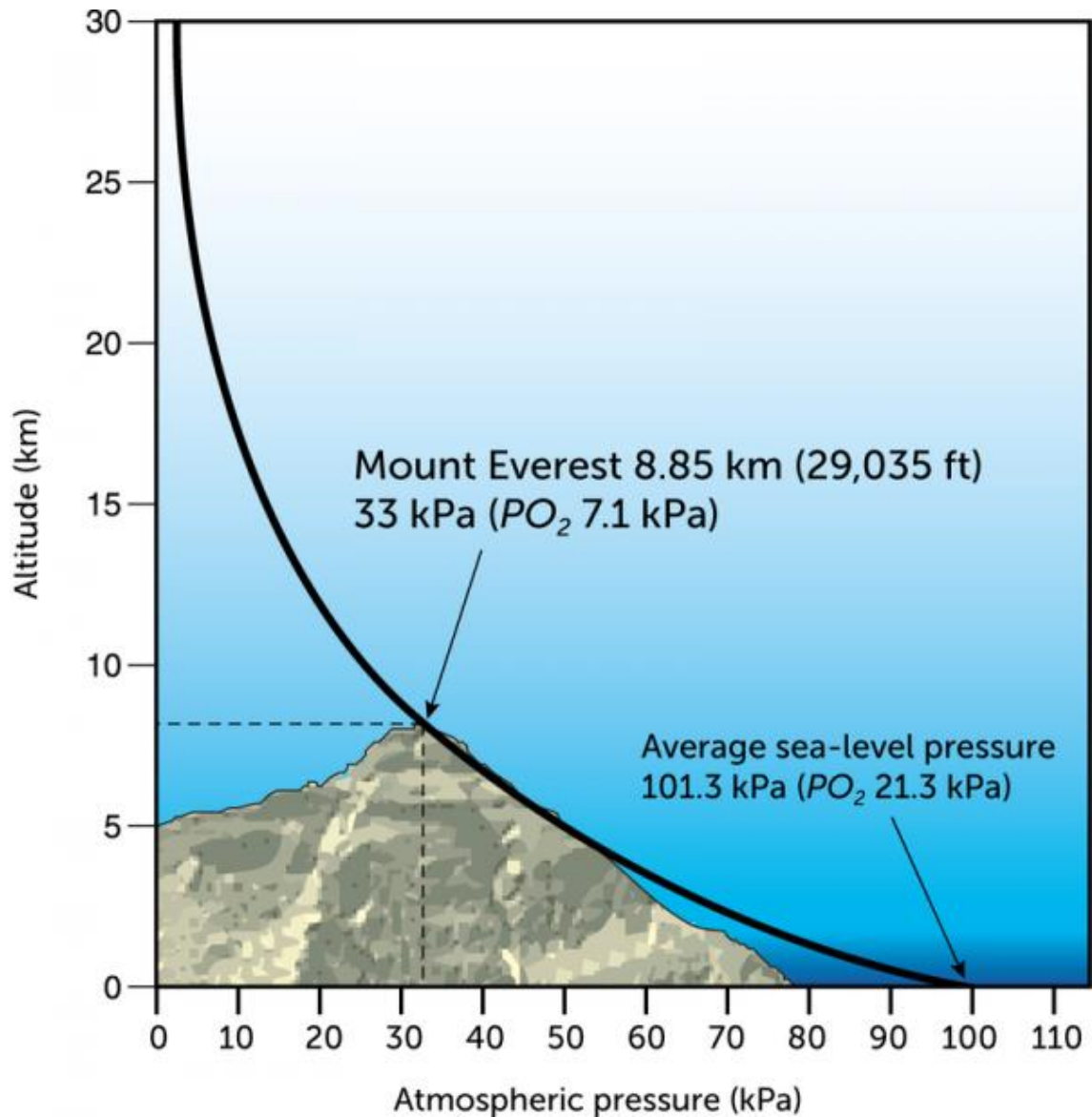
una menor presión.



**Figura 22:** Relación entre la presión atmosférica y la altitud.

**Fuente:**[https://www.aristasur.com/sites/as/users/3/image/altura\\_presion\\_atmosferica\\_everest.jpg](https://www.aristasur.com/sites/as/users/3/image/altura_presion_atmosferica_everest.jpg)

En la figura anterior se observa que el nivel del mar la presión atmosférica es 100KPa y a la altitud del Everest 8848 m la presión disminuye a 34 KPa, es decir que las moléculas que tiene el aire a esa altitud es de 34% con respecto al 100% al nivel del mar; lo que se podría entender que al disminuir la presión en la altitud, la cantidad de moléculas del aire se separan, teniendo para un mismo volumen, menos moléculas, es decir en la cima del Everest, se respira igual concentración de oxígeno que al nivel del mar, pero menos moléculas de oxígeno, lo que se debe a la disminución de la presión atmosférica.



**Figura 23:** Presión atmosférica en el Everest y al nivel del mar

**Fuente:**

[https://www.aristasur.com/sites/as/users/3/image/presion\\_atmosferica\\_everest.jpg](https://www.aristasur.com/sites/as/users/3/image/presion_atmosferica_everest.jpg)

Por lo tanto, si ascendemos una montaña, la concentración de oxígeno en el aire permanece constante, lo que se reduce son las moléculas de aire, incluyendo el oxígeno en un 21%. En la tabla siguiente se muestra la variación de la presión atmosférica en función a la altitud.



**Tabla 2:** Presión atmosférica respecto a la altitud sobre el nivel del mar.

Altitud (m)	Presión (mbar)	Presión (mmHg)
0	1013	760
500	954	716
1000	898	674
1500	845	634
2000	795	596
2500	746	560
3000	701	525
3500	657	493
4000	616	462
4500	577	433
5000	540	405
5500	505	379
6000	472	354
6500	440	330
7000	411	308
7500	382	287
8000	356	267
8500	331	248
9000	308	231
9500	285	214
10000	264	198

**Fuente:** <https://www.aristasur.com/contenido/presion-atmosferica-y-variacion-de-oxigeno-en-altura>

Con la altitud los parámetros ambientales de la presión, temperatura y densidad varían, al aumentar la altitud la presión atmosférica disminuye influyendo en la variación proporcional de la densidad del aire, en contraposición la temperatura debería disminuir y aumentar la densidad del aire, pero no compensa el efecto de la presión que es mayor.

La presión atmosférica varía en forma cíclica durante el día, las máximas ocurren a las 10 a.m. y 10 p.m. y las mínimas a las 4 a.m. y 4 p.m., a esta variación se le denomina marca barométrica, cuya amplitud depende de la ubicación geográfica, es mayor en zonas



tropicales y menor en altas latitudes.

Como la densidad del aire está en función de la temperatura y la presión, experimentalmente se determinó que en la proximidad de la superficie terrestre la presión atmosférica disminuye 1 mm Hg por cada 11 metros de altitud, pero para una altitud mayor que los 1000 metros disminuye más lentamente.

En la tabla siguiente se tabula la variación de la presión atmosférica en función de la altitud.

**Tabla 3:** Variación de la presión atmosférica con la altitud

<b>Lugar</b>	<b>Presión Atmosférica (hPa)</b>	<b>Altitud (m.s.n.m.)</b>
La Molina	992	224
Chosica	925	874
Corcona	883	1265
Matucana	775	2410
San Mateo	717	3025
Juli (Puno)	648,4	3812
Casapalca	619	4465
Ticlio	576	4818

**Fuente:** SENAMHI

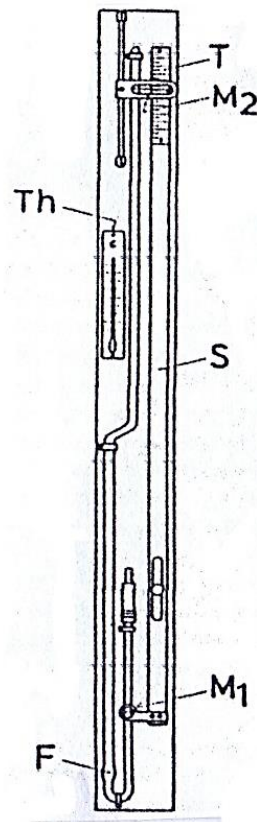
### 3.1.2.1. Presión Atmosférica en Puno

La presión atmosférica en Puno, la determinaremos utilizando el barómetro de Física de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

El barómetro de sifón marca Leybold se utiliza para medir en forma exacta la presión atmosférica y su uso también es para calibrar los barómetros aneroides. Está constituido por un tubo de vidrio curvado de 3 mm de diámetro, con dos brazos, uno largo cerrado y el otro corto abierto.

El tubo está dispuesto en un tablero que tiene una lámina desplazable (S), con un cursor para leer la presión, un termómetro (Th) para medir la temperatura ambiental. La lámina (S) en su parte superior está milimetrada (T) y en la parte inferior un cursor (M<sub>1</sub>), la lámina se desplaza en una guía y se fija por un tornillo manual.

La marca (M<sub>2</sub>) permite leer el nivel de la columna de mercurio. Una trampita (F) evita la entrada de burbujas de aire en el tubo de vidrio.



**Figura 24:** Partes del barómetro de sifón.

Elaboración propia.



**Figura 25:** Barómetro de sifón del Laboratorio de Física (FICA-UNAP).

Fotografía propia.

### 3.1.2.2. Disminución de la presión atmosférica en Puno

Los aspectos por la que la presión atmosférica disminuye influenciada por la altitud ha sido estudiado en 3.1. La International Normal Atmosphere (INA) considerando que las propiedades del aire varían en función de la altitud, establece que la medición de la presión atmosférica disminuye aproximadamente 10% por cada 1000 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.).

Esta afirmación científica la determinaremos experimentalmente y realizaremos la demostración considerando los datos experimentales de la presión atmosférica medida en el Laboratorio de Física de la Escuela Profesional de Físico Matemáticas de la UNAP.

### 3.1.2.3. Porcentaje de oxígeno en el aire de Puno

El porcentaje de oxígeno en el aire de Puno es importante en la investigación, frecuentemente se dice que la disminución de la potencia de un motor de combustión interna en la altitud, como en Puno, se debe a que hay menos oxígeno, lo cual es incorrecto.

Según la International Normal Atmosphere (INA) la variación de la composición del aire es mínima hasta la altura de 20 Km sobre el nivel del mar, considerando este fundamento se la considera constante.

Investigadores de la Universidad de Antioquía y de Castilla – La Mancha, España; teniendo en cuenta parámetros ambientales como la presión y la temperatura que varía con la altitud y el cambio o variación de la fracción molar del oxígeno en la composición del aire obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 4:** Porcentaje de oxígeno en el aire en función de la altitud.

Altitud (m)	O <sub>2</sub> (%)
0	20,92
500	20,72
1000	20,66
1500	20,53
2000	20,40
2500	20,27
3000	20,14
3500	20,00
3827	19,91
4000	19,87
4500	19,74

**Fuente:** Universidad de Antioquía y de Castilla, La Mancha, España.





## 3.2. MÉTODOS

### 3.2.1. Método de la International Normal Atmosphere (INA) para determinar la presión atmosférica normal internacional

Las condiciones ambientales normales de composición de las propiedades del aire son por convención para la temperatura de 15°C (288°K), para la presión de 1,01 bar (1,033 Kg/cm<sup>2</sup>), para la latitud de 40° y para la altitud el nivel del mar.

La atmósfera estándar es la que tiene definido valores fijos de presión, densidad y temperatura a nivel del mar y se rige por la ley de los gases ideales y la ecuación de la presión hidrostática. Considerando como punto de partida las ecuaciones:

$$dp = \rho g dh$$

$$\frac{p}{\rho} = RT$$

Reemplazando la densidad ( $\rho$ ) en la primera ecuación obtenemos:

$$dp = \frac{p}{RT} g dh$$

Considera que para alturas inferiores a 11 Km la temperatura varía con la altitud en un promedio de 65°C por Km, expresada por la ecuación:

$$T = 288,15 - 0,0065h$$

Donde:

$T$  = en grados Kelvin, °K

$h$  : altitud en metros, m



Por consiguiente, operando obtenemos:

$$\frac{dp}{p} = \frac{g}{R} \cdot \frac{dh}{288,15 - 0,0065h}$$

Integramos y considerando que para  $h = 0$  implica  $p = p_0$  y, substituyendo  $g = 9,806 \text{ m/s}^2$  y  $R = 287 \text{ J/(Kg}^{-\circ}\text{K)}$ :

$$\int_{p_0}^p \frac{dp}{p} = -0,0342 \int_0^h \frac{dh}{288,15 - 0,0065h}$$

Operando:

$$\ln \frac{p}{p_0} = 5,256 [\ln(288,15 - 0,0065h)]_0^h$$

$$\ln \frac{p}{p_0} = 5,256 \cdot \ln \frac{288,15 - 0,0065h}{288,15}$$

$$\ln \frac{p}{p_0} = 5,256 \cdot \ln(1 - 22,557 \times 10^{-4}h)$$

Finalmente:

$$p = p_0(1 - 22,557 \times 10^{-4}h)^{5,256}$$

Esta ecuación es importante porque nos permite determinar la variación de la presión atmosférica en función de la altitud sobre el nivel del mar.

### 3.2.2. Método para determinar la presión atmosférica de Puno

Es necesario determinar la presión atmosférica para calcular la presión absoluta. El instrumento para medir la presión atmosférica se denomina barómetro, razón por lo que a la presión atmosférica muchas veces se la denomina presión barométrica.



Considerando que ningún barómetro mide directamente la real presión atmosférica, por eso a la presión medida con el barómetro, es necesario realizar correcciones por condiciones ambientales.

El método para determinar la presión atmosférica en Puno está basado en lo establecido por la American Society Mechanical Engineer (ASME – Power), cuyo procedimiento determina que, a la presión atmosférica medida con el barómetro, en nuestro caso el barómetro de sifón, se le debe realizar correcciones relacionadas con las condiciones ambientales del lugar donde se realiza la presión atmosférica; estas correcciones son con respecto a la:

- Temperatura
- Latitud
- Altitud

### 3.2.2.1. Corrección por temperatura ( $C_T$ )

La corrección por temperatura se efectúa con el objetivo de reducir la altura medida de la columna de mercurio a la temperatura del laboratorio, a la altura de columna de mercurio, pero medida a la temperatura de 0°C, temperatura de referencia; considerando que a esa temperatura de 0°C el peso específico del mercurio es de 13,595 g/cm<sup>3</sup> y aceleración de gravedad de 9,80665 m/s<sup>2</sup>.

En la tabla 3.4 se muestran y tabulan las correcciones respectivas a aplicar a la presión atmosférica medida, para corregir los efectos de la temperatura. Por consiguiente, a la presión atmosférica medida ( $P_{at}$ ), se le debe sumar o restar la primera corrección por temperatura ( $C_T$ ).

**Tabla 5:** Corrección de temperatura para columnas de mercurio hasta 850 mm

Temperatura de la columna, °C	Lecturas observadas de la columna, mm de Hg								
	400	450	500	550	600	650	700	730	850
Sumar									
-20	1.2	1.4	1.3	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3	2.4
-15	0.9	1.0	1.0	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
-10	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	1.1
-5	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Restar									
5	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7
10	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
15	1.2	1.3	1.4	1.3	1.6	1.7	1.9	2.0	2.2
20	1.5	1.7	1.8	2.0	2.2	2.4	2.5	2.7	3.0
25	1.7	2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.2	3.3	3.7
30	2.0	2.2	2.5	2.8	3.2	3.3	3.7	4.0	4.2
35	2.3	2.5	2.9	3.2	3.3	3.8	4.2	4.2	4.8

**Fuente:** ASME – Power Test Codes.

### 3.2.2.2. Corrección por latitud ( $C_g$ )

Al variar la latitud de un punto de la tierra a otro, esta variación determina una variación de la aceleración de la gravedad. Esta corrección, considera como latitud de referencia 45°N, donde la aceleración de la gravedad es considerada 9,80685 m/s<sup>2</sup>. Las correcciones de Latitud deben sumarse algebraicamente a las alturas de mercurio corregidas a la temperatura de 0°C, para conseguir las alturas respectivas corregidas al nivel del mar y una latitud de 45°N. En la tabla 3, se tabulan las correcciones por Latitud que realmente son por efecto de la variación de la gravedad que deben sumarse algebraicamente a las alturas de mercurio de los barómetros.

Por consiguiente a la presión atmosférica ( $P_{at}$ ) medida se le debe sumar o restar la segunda corrección por Latitud ( $C_g$ ).

**Tabla 6:** Corrección por Latitud para columnas de mercurio de barómetros

Altitud, m	0		600		1200		1800		2400		3000	
Altura de la columna mm Hg	760	700	700	630	650	600	600	550	550	500	500	450
Latitud grados	Corrección											
23	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.5	-1.2	-1.5	-1.2	-1.2	-1.2
30	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0
33	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-1.0	-0.7	-1.0	-0.7	-1.0	-0.7
40	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.3	-0.5	-0.7	-0.5	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7
45	-0.0	-0.0	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
50	+0.2	+0.2	+0.2	-0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2

**Fuente:** ASME – Power Test Codes.

### 3.2.2.3. Corrección por Altitud ( $C_h$ )

La corrección por altitud considera como referencia una altitud de cero metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Intuitivamente se conoce que conforme aumenta la altitud va disminuyendo la presión atmosférica.

En la tabla 3, se tabulan las correcciones por altitud ( $C_h$ ) por consiguiente a la presión atmosférica medida con el barómetro ( $P_{at}$ ) se le debe sumar algebraicamente la tercera corrección por altitud ( $C_h$ ).

**Tabla 7:** Corrección por altitud ( $C_h$ ) para columnas de mercurio de barómetros

Altitud media m	Temperatura media de la atmósfera, °C							
	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
0	11	10	10	9	9	9	S	8
300	10	10	9	9	9	8	s	8
600	10	9	9	8	8	8	8	7
900	9	9	8	8	8	8	7	7
1200	9	8	8	8	7	7	7	7
1500	8	8	8	7	7	7	7	7
1800	8	8	7	7	7	7	7	7
2100	8	7	7	7	7	7	7	6

Fuente: ASME – Power Test Codes.

Finalmente, la presión atmosférica medida con el barómetro ( $P_{at}$ ) con las tres correcciones respectivas por las condiciones ambientales, será la presión atmosférica real que existe en Puno ( $P_{atcorr}$ ) la cual está estandarizada para ser comparado con la presión atmosférica de otras ciudades, presión que debe ser determinada de la misma manera.

Por consiguiente:

$$P_{atcorr} = P_{at} \pm C_T \pm C_g \pm C_h$$

La  $P_{atcorr}$  será la presión atmosférica que se empleará para el análisis del motor de combustión interna Otto de aspiración natural.

### 3.2.3. Método para determinar el porcentaje de disminución de la presión atmosférica por cada 1000 metros de altitud sobre el nivel del mar

La International Normal Atmosphere (INA) en base a las propiedades del aire en función a la altitud, y en mediciones experimentales de la presión atmosférica a diferentes altitudes establece como recomendación técnica que la presión atmosférica disminuye aproximadamente un valor cuantitativo de 10% por cada 1000 metros sobre el nivel del



mar (m.s.n.m.) de altitud.

Como un aporte del trabajo de investigación establecemos la metodología que lógicamente no informa la INA:

- a) Esta recomendación técnica la demostramos utilizando los datos experimentales de la presión atmosférica de Puno, medida en el laboratorio de Física de la Escuela Profesional de Físico Matemáticas de la FICA-UNAP.

Los datos experimentales necesarios son:

Presión atmosférica, en mm Hg

Altitud, en m.s.n.m.

- b) Es necesario los datos experimentales de referencia correspondientes a la presión atmosférica en mm Hg y altitud en m.s.n.m., al nivel del mar.
- c) Con los valores experimentales de la presión atmosférica y altitud de los pasos a) y b), calculamos la variación de la presión atmosférica debido a la altitud de Puno.
- d) Establecemos con el cálculo de la variación de la presión atmosférica, por cada 1000 metros de altitud en unidades de mm Hg.
- e) Finalmente, la variación de la presión atmosférica en mm Hg por cada 1000 metros de altitud, lo determinamos en porcentaje (%) y, debe resultar un valor aproximado de 10%.

#### **3.2.4. Método para determinar el porcentaje de oxígeno que tiene el aire en Puno**

La determinación del porcentaje de oxígeno que tiene la composición del aire de Puno, en base a informaciones técnicas experimentales es de gran importancia, porque muy a menudo se manifiesta equivocadamente que a mayor altitud sobre el nivel del mar existe menos oxígeno, es decir técnicamente menor porcentaje de oxígeno. En principio



una institución de amplia credibilidad como la International Normal Atmosphere (INA) determina que la variación porcentual del oxígeno en la composición del aire es mínima hasta una altitud de 20 Km sobre el nivel del mar, por lo que para cálculos de ingeniería se le puede considerar constante. Para determinar metodológicamente el porcentaje (%) de oxígeno ( $O_2$ ) en la composición del aire de Puno, utilizaremos la información experimental de investigadores de la universidad de Antioquía y de Castilla de La Mancha de España.

En base a la ecuación:

$$(FM) = (FM_0) \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-\frac{g}{RC}(PM_m - PM_a)} \quad \text{Donde:}$$

$(FM)$ ,  $(FM_0)$  = fracciones molares de los componentes del aire

$g$  = aceleración de la gravedad

$R$  = constante universal de los gases: 8,314 J/K°-mol

$PM_m$ ;  $PM_a$  = Pesos moleculares del gas a calcular y del aire.

La fracción molar del  $O_2$  es 20,92% al nivel del mar y del  $N_2$  es 78,14% y sus pesos moleculares son 32 g/mol y 28 g/mol respectivamente. La relación estequiométrica de  $N_2/O_2$  a condiciones normales es de 3,76. Para la altitud de Puno de 3827 m.s.n.m., la relación varía a 3,98, porcentualmente aumenta en 5,8%, que para cálculos en ingeniería se puede despreciar.

En la tabla siguiente se tabulan los porcentajes del oxígeno y nitrógeno en función de la altitud sobre el nivel del mar.



**Tabla 8:** Variación de la fracción del Oxígeno y Nitrógeno en el aire a diferentes altitudes.

Altitud (m)	O <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)
0	20,92	78,14
500	20,72	78,29
1000	20,66	78,45
1500	20,53	78,60
2000	20,40	78,76
2500	20,27	78,92
3000	20,14	79,09
3500	20,00	79,25
3827	19,91	79,36
4000	19,87	79,42
4500	19,74	79,59

Elaboración propia.

Analizando en la tabla 3.7, la composición del aire, es decir, el % N<sub>2</sub> y el % O<sub>2</sub>, sus variaciones son mínimas para altitudes hasta 45000 metros, por lo tanto para cálculos de ingeniería lo podemos considerar como constante.

### 3.2.5. Método para analizar en forma matemática los parámetros de funcionamiento de un motor Otto que influyen en la potencia debido a la altitud de Puno

La metodología **empleada** en el desarrollo de la investigación con el propósito de analizar el funcionamiento de un motor Otto de aspiración natural e, identificar qué parámetros determina la disminución de la potencia como consecuencia de su funcionamiento a la altitud de Puno, el procedimiento es el siguiente:

- En base a la caracterización de la altitud de Puno, en la que se determina que la altitud influye en la disminución de la presión atmosférica y la



temperatura de la atmósfera los que son la causa que varíe la composición del aire en cuanto a la disminución de la densidad de aire en la altitud geográfica, sistematizando esta información se procedió al siguiente paso.

- El análisis en forma teórica y matemática de los parámetros de funcionamiento de motores Otto, se realiza en base a la metodología desarrollada por investigadores de la Cátedra de “Motores de automóviles y tractores” del Instituto de Automóviles y Carreteras de Moscú, expuesta, por el Doctor en Ciencias Técnicas Jóvaj, M. en el libro de Motores de automóvil; en donde en forma analítica y meticulosa se analizan los procesos de funcionamiento de un motor Otto y, en base a la caracterización de la altitud de Puno, se incidió puntualmente en el análisis de los parámetros de la presión media efectiva ( $P_e$ ) y la potencia efectiva ( $N_e$ ) que son los que son influenciados por la altitud.
- Finalmente, como tercer paso del método, ya identificado los parámetros influenciados por la altitud y que tienen efectos en la disminución de la potencia efectiva del motor, se analiza y cuantifica a la densidad de aire en cuanto a su disminución en la altitud, para concluir en su influencia sobre la disminución de la potencia efectiva.



## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. RESULTADOS

##### 4.1.1. Determinación de la presión atmosférica normal internacional (INA)

La ecuación matemática determinada que la International Normal Atmosphere (INA), nos permite determinar aproximadamente el valor de la presión atmosférica para cualquier ciudad, considerando la altitud a la que se encuentra y, considerando las condiciones ambientales al nivel del mar como referencia, para deducir la expresión matemática siguiente:

$$P = P_0(1 - 22,557 \times 10^{-4}h)^{5,256} \quad (4.1)$$

Determinamos presiones atmosféricas aplicando la ecuación (4.1), las que se tabulan en la tabla 4.1, variando la altitud de 500 m en 500 m hasta 5000 metros; considerando para la temperatura la ecuación:

$$T = 288 - 0,0065h$$

Considerando para Puno:

$$h = 3827 \text{ m}$$

$$P_0 = 1,033 \text{ Kg/cm}^2$$

- Presión atmosférica:

$$P_0 = 1,033 [1 - 2,257 \times 10^{-6}(3827)]^{5,256}$$



$$P_0 = 0,622 \frac{Kg}{cm^2} = 457,6186 \text{ mmHg}$$

- Temperatura:

$$T = 288 - 0,0065(3827)^\circ K$$

$$T = 213,1245^\circ K = -9,8755^\circ C$$

- Relación de temperatura ( $T/T_0$ )

$$T = 263,1245^\circ K$$

$$T_0 = 288^\circ K$$

Entonces:

$$\frac{T}{T_0} = \frac{213,1245}{288} = 0,914$$

- Relación de presiones ( $P/P_0$ )

$$P = 0,622 \text{ Kg/cm}^2$$

$$P_0 = 1,033 \text{ Kg/cm}^2$$

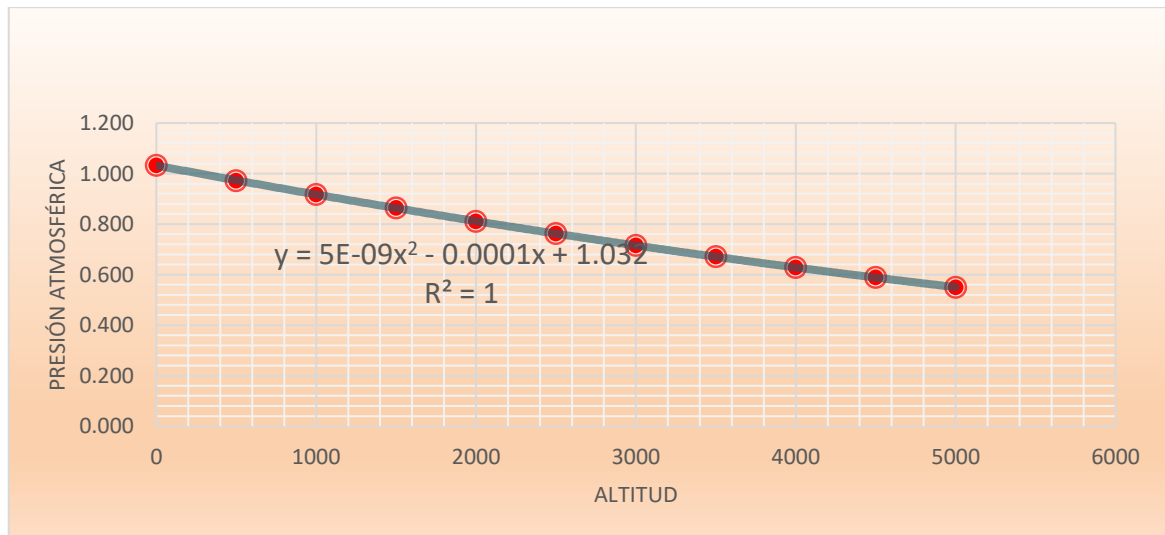
Entonces:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{0,622}{1,033} = 0,602$$

**Tabla 9:** Variación de la presión atmosférica y propiedades del aire en función de la altura.

Altitud (m)	Presión Atmosférica		Temperatura		Relación de temperaturas (T/T <sub>0</sub> )	Relación de Presiones (P/P <sub>0</sub> )	Peso específico (Kg/m <sup>3</sup> )
	(MN/m <sup>2</sup> )	(Kg/cm <sup>2</sup> )	(°C)	(°K)			
0	0,101	1,033	1,500	288,00	1,000	1,000	1,225
500	0,095	0,972	1,175	284,75	0,986	0,942	1,166
1000	0,090	0,917	8,50	281,50	0,977	0,887	1,111
1500	0,085	0,864	5,25	278,25	0,966	0,835	1,058
2000	0,079	0,811	2,00	275,00	0,955	0,785	1,006
2500	0,075	0,763	-1,25	271,25	0,943	0,737	0,957
3000	0,070	0,715	-4,50	268,50	0,932	0,692	0,909
3500	0,066	0,671	-7,75	265,25	0,921	0,649	0,863
4000	0,062	0,628	-11,00	262,00	0,910	0,608	0,819
4500	0,058	0,589	-14,25	258,75	0,898	0,570	0,777
5000	0,054	0,550	-17,50	255,50	0,887	0,533	0,736

Elaboración propia



**Figura 26:** Disminución de la presión atmosférica con la altitud sobre el nivel del mar

Elaboración propia



#### 4.1.2. Determinación experimental de la presión atmosférica en Puno – UNA

La determinación de la presión atmosférica en Puno, se realizó en el Laboratorio de Física de la Escuela Profesional de Físico Matemáticas de la UNAP, utilizando el barómetro de sifón, marca Leybold – Alemania, utilizando la metodología de la American Society of Mechanical Engineers (ASME) – Power Test Codes.

Los datos experimentales medidos fueron:

En el barómetro:  $P_{at} = 489 \text{ mmHg}$

En el termómetro:  $T = 18^\circ\text{C}$

Por datos del SENAMHI, para la ciudad de Puno:

Latitud:  $515^\circ 50' 31,92'' = 15,8422^\circ$

Longitud:  $0 70^\circ 1' 11,64'' = 70,0199^\circ$

Altitud: 3827 msnm.

Según la metodología del ASME, a la presión atmosférica medida en el Laboratorio, se le deben realizar las correcciones por temperatura, Latitud y Altitud.

$P_{at} = 489 \text{ mm Hg}$

##### a) Corrección por temperatura ( $C_T$ )

La lectura en el termómetro ubicado junto al barómetro fue:

$T = 18^\circ\text{C}$

Empleando la tabla 3.4, de corrección de temperaturas de la ASME, y efectuando las interpolaciones respectivas, que se muestran en la tabla siguiente:

**Tabla 10:** Interpolaciones y cálculos para determinar la corrección para una temperatura de 18°C.

Temperatura de la columna (°C)	Lectura observadas de la columna, mm de Hg									
	400	450	489	500	550	600	650	700	750	850
SUMAR										
⇒ -20	1.2	1.4	1.4724	1.5	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3	2.4
-15	0.9	1.0		1.0	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
-10	0.5	0.6		0.7	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	1.1
-5	0.2	0.3		0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
⇒ 0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
RESTAR										
5	0.3	0.3		0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7
10	0.7	0.8		0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
15	1.2	1.3	1.378	1.4	1.5	1.6	1.7	1.9	2.0	2.2
⇒ 18			1.618							
20	1.5	1.7	1.778	1.8	2.0	2.2	2.4	2.5	2.7	3.0
25	1.7	2.0			2.5	2.8	3.0	3.2	3.5	3.7
30	2.0	2.2		2.5	2.8	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2
35	2.3	2.5		2.9	3.2	3.5	3.8	4.2	4.2	4.8

Elaboración propia

De las operaciones efectuadas, determinamos una corrección por temperatura de:

$$C_T = 1,618 \text{ mmHg}$$

Por consiguiente, haciendo la primera corrección a la presión atmosférica:

$$P_{at_1} = P_{at} - C_T$$

$$P_{at_1} = 489 - 1,618 = 487,382 \text{ mmHg}$$



## b) Corrección por Latitud ( $C_g$ )

La coordenada geográfica de la latitud de una ciudad influye sobre la aceleración de la gravedad, por lo que la corrección por latitud la denotamos por  $C_g$ . Utilizaremos la tabla 3.5 de la ASME para la corrección por latitud. La latitud de Puno es  $15,88422^\circ$  a una altitud de 3827 m.s.n.m.

Utilizando la tabla 3.5, para 3000 m y 500 mmHg, realizamos una regresión lineal, obteniendo:

$$C_{g_1} = 0,04228575 L - 2,287142$$

Considerando la latitud de Puno:

$$L = 15,8422^\circ$$

Sustituyendo:

$$C_{g_1} = 0,04228575(15,8422) - 2,287142$$

$$C_{g_1} = -1,7172 \text{ mmHg}$$

De la misma manera para 3000 m y 450 mmHg, haciendo una regresión lineal obtenemos:

$$C_{g_2} = 0,03714285 L - 2,1095238$$

Sustituyendo la latitud de Puno:  $L = 15,8422^\circ$

$$C_{g_2} = 0,03714285(15,8422) - 2,1095238$$

$$C_{g_2} = -1,5211 \text{ mmHg}$$





Relacionando las dos correcciones por latitud:

$P_{at}$ (mm Hg)	$C_g$ (mm Hg)
450	-1,5211
489	$C_g$
500	-1,7172

Interpolando obtenemos:

$$C_g = -1,6741 \text{ mm Hg}$$

Realizando la segunda corrección a la medición de la presión atmosférica.

$$P_{at_2} = P_{at_1} - C_g$$

$$P_{at_2} = 487,382 - 1,6741$$

$$P_{at_2} = 485,7079 \text{ mm Hg}$$

### c) Corrección por altitud ( $C_h$ )

De la misma manera que para la corrección por latitud, utilizando la tabla 3.6, realizamos las regresiones lineales.

- Para  $T = 10^\circ\text{C}$

$$C_h = -1,111 \times 10^{-3}h + 8,91666$$

La altitud de Puno:  $h = 3827 \text{ msnm}$

Reemplazando:

$$C_h = -1,111 \times 10^{-3}(3827) + 8,91666$$



$$C_{h_1} = 4,6643$$

- Para  $T = 20^\circ\text{C}$

$$C_{h_2} = -0,9126 \times 10^{-3}h + 8,5833$$

Para Puno:  $h = 3827 \text{ msnm}$

Reemplazando:

$$C_{h_2} = -0,9126 \times 10^{-3}(3827) + 8,5833$$

$$C_{h_1} = 5,0908 \text{ mm Hg}$$

Realizando la interpolación, en base a lo calculado:

$T$ ( $^\circ\text{C}$ )	$C_h$ (mm Hg)
10	4,6643
18	$C_h$
20	5,0908

Obtenemos:

$$C_h = 5,0072$$

Por consiguiente, realizamos la tercera corrección a la presión atmosférica medida:

$$P_{at_3} = P_{at_2} - C_h$$

$$P_{at_3} = 485,7079 - 5,0072$$

$$P_{at_3} = 490,7151 \text{ mm Hg}$$



Entonces la presión atmosférica en Puno, con las correcciones por condiciones ambientales es:

$$P_{at} = 490,7151 \text{ mm Hg}$$

#### 4.1.3. Determinación del porcentaje de disminución de la presión atmosférica por cada 1000 metros de altitud sobre el nivel del mar

La International Normal Atmosphere (INA) en base a las propiedades del aire y la ecuación para determinar la variación de la presión atmosférica con la altitud, establece como información técnica que la presión atmosférica disminuye aproximadamente 10% por cada 1000 metros de altitud sobre el nivel del mar (m.s.n.m.)

Esta afirmación científica la demostraremos en base al resultado de la presión atmosférica determinada en forma experimental en el Laboratorio de Física de la Escuela Profesional de Físico Matemáticas de la UNAP.

Los resultados para la ciudad de Puno fueron:

$$P_{at} = 490,7151 \text{ mm Hg}$$

Altitud = 3827 m.s.n.m.

Como referencia, sabemos que la presión atmosférica al nivel del mar es:

$$P_{at} = 760 \text{ mm Hg}$$

Altitud = 0 m.s.n.m.

A partir de esta información, calculamos la variación de la presión atmosférica por la altitud de 3827 metros:

$$\Delta P_{at} = 760 - 490,7151 = 269,2849 \text{ mm Hg}$$



Ahora determinaremos la variación de la presión atmosférica para cada 1000 metros de altitud:

$$3827 \text{ m} \longrightarrow 269,2849 \text{ mm Hg}$$

$$1000 \text{ m} \longrightarrow \Delta P_{at} \text{ }_{1000 \text{ m}}$$

Operando:

$$\Delta P_{at} \text{ }_{1000 \text{ m}} = \frac{269,2849 \times 1000}{3827}$$

Entonces:

$$\Delta P_{at} \text{ }_{1000 \text{ m}} = 70,3645 \text{ mm Hg}$$

Finalmente, ésta variación de la presión atmosférica en mm Hg, lo expresamos en porcentaje:

$$760 \text{ mm Hg} \longrightarrow 100\%$$

$$70,3645 \text{ mm Hg} \longrightarrow \% \Delta P_{at} \text{ }_{1000 \text{ m}}$$

Operando:

$$\% \Delta P_{at} \text{ }_{1000 \text{ m}} = \frac{70,3645 \times 100}{760}$$

Entonces:

$$\% \Delta P_{at} \text{ }_{1000 \text{ m}} = 9,26\% \approx 10\%$$

Resultando que coincide con lo establecido por la INA, que la variación de la presión atmosférica por cada 1000 metros sobre el nivel del mar es de  $9,26\% \approx 10\%$

#### 4.1.4. Análisis matemático de la influencia de la altitud en la potencia de un motor Otto de aspiración natural

La altitud geográfica de un lugar determinado tiene influencia sobre la generación de una potencia de un motor de combustión interno Otto de aspiración natural, porque conforme se incrementa la altitud con respecto al nivel del mar, la presión atmosférica disminuye como también varía la composición del aire, aspectos que determinan variaciones en el funcionamiento del motor. En los capítulos anteriores se analizaron los cambios que determina la altitud en la presión atmosférica y la composición del aire.

Por consiguiente, analizaremos en forma matemática cómo influyen los parámetros de funcionamiento en la potencia efectiva de un motor Otto de aspiración natural.

La potencia que se genera en el cigüeñal de un motor se le llama potencia efectiva ( $N_e$ ), es potencia es menor que la potencia indicada ( $N_i$ ) en una magnitud de potencia correspondiente a las pérdidas mecánicas ( $N_m$ ) que se pierden por la fricción entre elementos mecánicos móviles.

$$N_e = N_i - N_m \quad (4.2)$$

La potencia efectiva se suele expresar en función de la presión media efectiva y el volumen de trabajo se realiza en el cilindro, es decir:

$$N_e = \frac{P_e \cdot i \cdot V_h \cdot n}{30\tau} \quad (4.3)$$

Donde:

$N_e$  = potencia efectiva, en KW

$P_e$  = presión media efectiva, en MPa



$i$  = número de cilindros

$V_h$  = Volumen de trabajo del cilindro, en RPM

$n$  = revoluciones por minuto, en RPM

$\tau$  = número de carreras del pistón por ciclo útil

Analizando matemáticamente la ecuación (4.2) y determinar qué parámetros aumentan, disminuyen o mantienen constante la magnitud de la potencia efectiva ( $N_e$ ):

**a) La cilindrada ( $i \cdot V_h$ )**

La cilindrada del motor de estudio, no tiene influencia sobre la potencia efectiva, porque es constante para cualquier altitud donde funcione el motor.

**b) El número de carreras del pistón por ciclo ( $\tau$ )**

Este parámetro de funcionamiento del motor del estudio que es parte de la ecuación de la potencia efectiva permanece constante ya sea el motor de cuatro o dos tiempos por lo tanto no tiene influencia en la variación de la magnitud de la potencia efectiva, debido a la altitud geográfica de la ciudad donde opere el motor.

**c) La frecuencia de rotación ( $n$ ) en RPM**

Durante el funcionamiento del motor si se disminuye las revoluciones por minuto, entonces también disminuirá la potencia efectiva; el aumento de “ $n$ ” estará limitado por la velocidad media límite del pistón que depende de la durabilidad y desgaste tolerable de los principales elementos mecánicos del motor, así como el aumento de pérdidas por fricción y en el intercambio de gases que influyen en el decrecimiento de la eficiencia mecánica. La velocidad media del pistón es un parámetro del funcionamiento del motor que limita las revoluciones por minuto, se



puede determinar por la ecuación:

$$V_p = 2D \cdot n \quad (4.4)$$

Donde:

$D$  = diámetro del cilindro, en m.

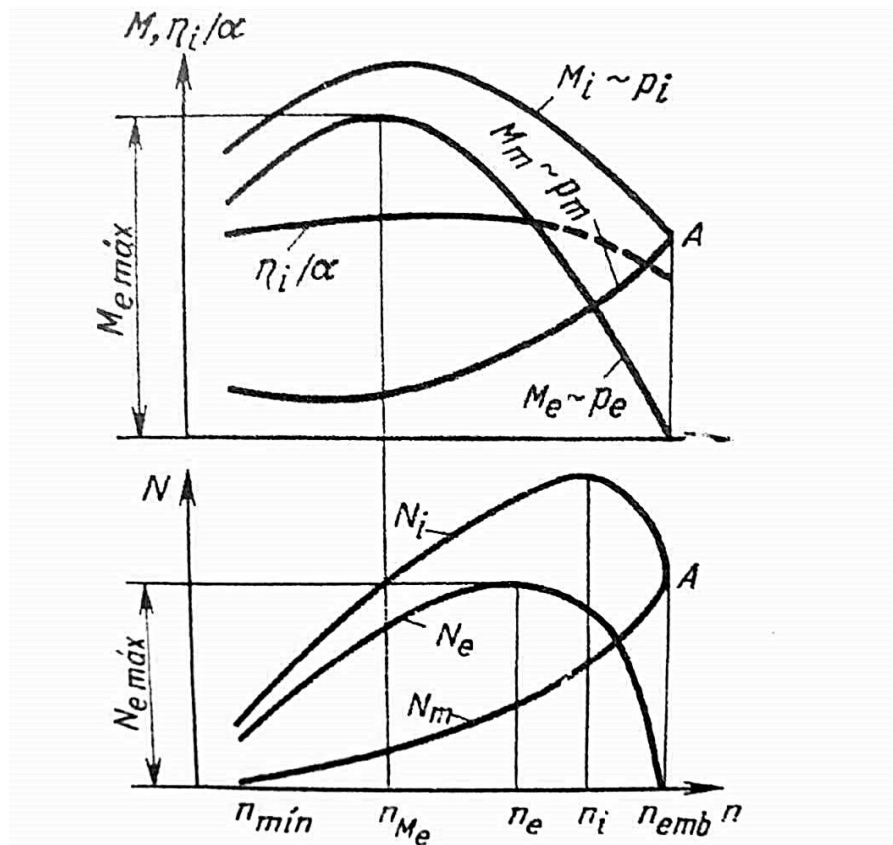
$n$  = revoluciones por segundo

$V_p$  = velocidad media del pistón, en m/s

Para elevar la frecuencia de rotación “ $n$ ” manteniendo  $V_p$  entre el rango de límites tolerables, en un motor con una cilindrada específica, se disminuye la carrera hasta cierto límite aumentando el diámetro respectivo del motor.

La frecuencia de rotación “ $n$ ” del motor, influye sobre la presión media efectiva ( $P_e$ ) y la potencia efectiva ( $N_e$ ); al incrementar “ $n$ ” sobre la potencia efectiva se generan dos influencias: la tendencia de perfección del proceso a través de la relación ( $\eta_i/\alpha$ ) para la composición de la mezcla aire-combustible y la variación de la eficiencia de llenado del cilindro ( $\eta_v$ ); que hacen que la potencia efectiva aumente y luego disminuya. El análisis de la influencia del aumento del parámetro “ $n$ ” se puede observar en la figura 4,2 donde se aprecia que la potencia efectiva, máxima ocurre a una frecuencia de rotación efectiva ( $n_e$ ) menor que la frecuencia de rotación indicada ( $n_i$ ) correspondiente a su potencia indicada.

Por consiguiente, las condiciones del medio ambiente, es decir la altitud geográfica de Puno no es un factor que influya en la frecuencia de rotación “ $n$ ”, considerando que se está analizando en el estudio de la investigación la disminución de la potencia efectiva como consecuencia de la altitud de Puno y, por ende, la disminución de la presión atmosférica.



**Figura 27:** Variación de las potencias efectivas ( $N_e$ ), indicada ( $N_i$ ) y de pérdidas mecánicas ( $N_m$ ) en función de la frecuencia de rotación ( $n$ ).

**Fuente:** Jovac, M. (2018) Motores de Automóvil, Moscú, Editorial MIR.

#### d) La presión media efectiva ( $P_e$ )

Del análisis matemático realizado de los parámetros de funcionamiento del motor Otto de aspiración natural, podemos afirmar que la altitud de Puno que influye en la disminución de la presión atmosférica son variables del medio ambiente que influyen en la variación de la potencia efectiva del motor, en el análisis teórico se determinó que los parámetros de funcionamiento de la cilindrada ( $i \cdot V_h$ ), el número de carreras del pistón por ciclo ( $\tau$ ) y la frecuencia de rotación ( $n$ ) no tienen influencia sobre la variación de la potencia efectiva; quedando para el análisis matemático el parámetro de la presión media efectiva del motor para establecer la influencia de la altitud y por ende de la presión atmosférica sobre la potencia efectiva. Considerando





la ecuación de la potencia efectiva, ecuación (4.3):

$$Ne = \frac{Pe \cdot i \cdot V_h \cdot n}{30\tau}$$

Donde la presión media efectiva está dada por la ecuación:

$$Pe = \frac{H_\mu}{l_0} \cdot \frac{\eta_i}{\alpha} \cdot \eta_v \cdot \eta_m \cdot \rho_k \quad (4.5)$$

Analizando la ecuación (4.5):

**i) Análisis de la relación de parámetros ( $H_\mu/l_0$ )**

La relación de parámetros entre el poder calorífico del combustible y la cantidad teórica de aire necesario para la combustión de 1 Kg de combustible, es decir ( $H_\mu/l_0$ ) depende de la composición de la mezcla y caracteriza el calor de combustión de la misma para una mezcla estequiométrica cuando  $\alpha = 1$ .

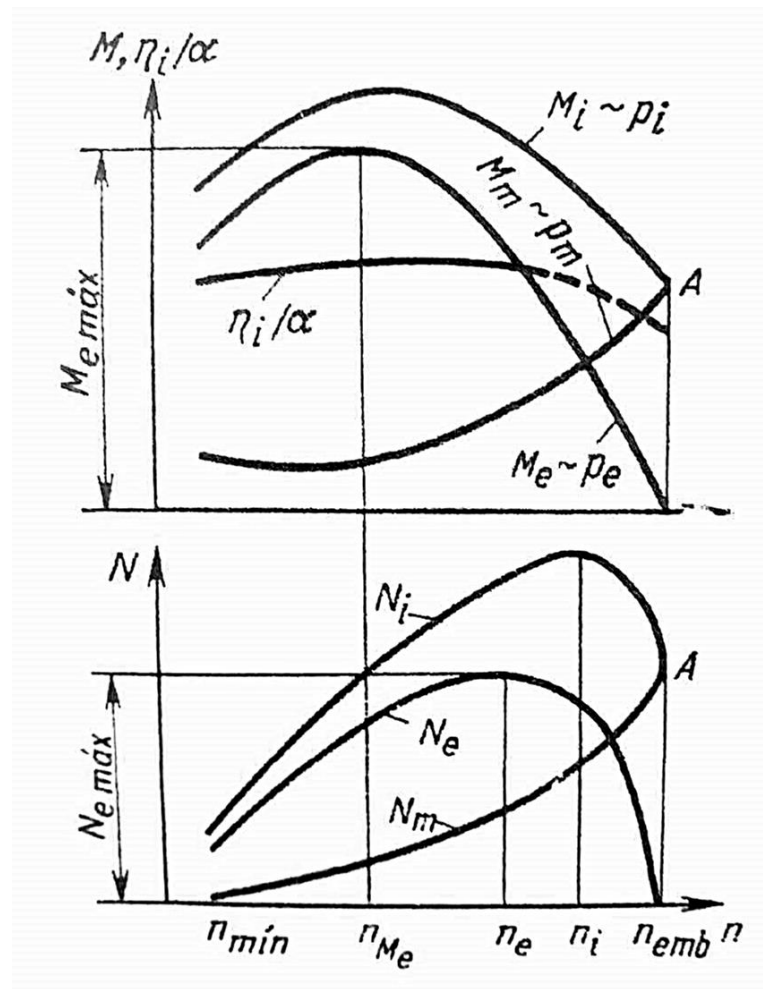
Para los combustibles líquidos empleados en los motores Otto, la relación ( $H_\mu/l_0$ ) por investigaciones experimentales fluctúa entre límites reducidos y, puede asumirse como constante:

$$\frac{H_\mu}{l_0} \approx 3,0 \quad \text{MJ/Kg}$$

Por consiguiente, la altitud de Puno y su correspondiente presión atmosférica no influyen sobre la relación de parámetros ( $H_\mu/l_0$ ), porque al poder considerarse prácticamente esta relación como constante no influirá en la variación de la presión media efectiva del motor y, por lo tanto tampoco en la magnitud de la potencia efectiva.

## ii) Análisis de la relación e parámetros ( $\eta_i/\alpha$ )

Para analizar cómo influye sobre la presión media efectiva la relación entre la eficiencia indicada y el coeficiente de exceso de aire, recurriremos a la Figura 4.4 que muestra en las curvas la tendencia de cómo varían los parámetros de funcionamiento del motor y, cómo influyen sobre la potencia efectiva en función de la frecuencia de rotación.



**Figura 28:** Variación de la presión efectiva ( $P_e$ ), presión indicada ( $P_i$ ), torque de giro ( $M$ ), potencia efectiva ( $N_e$ ) y potencia indicada ( $N_i$ ) en función de la frecuencia de rotación ( $n$ ).

**Fuente:** Jovac, M. (2018) Motores de Automóvil, Moscú, Editorial MIR.

Analizando la figura anterior se puede observar que la curva de la relación

entre los parámetros ( $\eta_i/\alpha$ ) tiene una tendencia casi horizontal, es decir constante hasta la potencia efectiva máxima en función de la velocidad de rotación ( $n$ ), por consiguiente no disminuirá en forma significativa ni la presión media efectiva y, por lo tanto tampoco la potencia efectiva del motor. Observándose también en las curvas que la potencia efectiva máxima ( $Ne_{m\acute{a}x}$ ) ocurre a una velocidad de rotación ( $n_e$ ) menor que ( $n_i$ ) correspondiente a la potencia indicada máxima ( $Ni_{m\acute{a}x}$ ).

En base al análisis efectuada concluimos que la altitud de Puno, que influye en una disminución significativa de la presión atmosférica, no influye en la relación ( $\eta_i/\alpha$ ) de la eficiencia indicada ( $\eta_i$ ) y el coeficiente de exceso de aire ( $\alpha$ ), por lo tanto la presión media efectiva ( $Pe$ ) no será influenciada por esta relación ni la potencia efectiva ( $Ne$ ) del motor.

### iii) Análisis del coeficiente de llenado ( $\eta_v$ )

El parámetro de funcionamiento ( $\eta_v$ ) como término de la fórmula para calcula la presión media efectiva ( $Pe$ ), cuantifica la perfección del proceso de admisión del motor, su definición es la relación entre la cantidad de mezcla fresca existente en el cilindro al inicio del proceso de compresión real cuando se cierran los dispositivos de intercambio de los gases y, la cantidad de mezcla fresca que podría llenar el volumen de trabajo del cilindro, es decir:

$$\eta_v = \frac{V_K}{V_h} \quad (4.4)$$

Donde:

$V_e$  = volumen mezcla fresca, a condiciones de admisión:  $P_K$  y  $T_K$

$V_h$  = volumen de desplazamiento del pistón



Por información técnica en base a investigaciones experimentales, la variación del coeficiente de llenado ( $\eta_v$ ) para motores de ciclo Otto de aspiración natural, funcionando en regímenes nominales varía en el rango de 0,75 – 0,85.

Por consiguiente, en base a la información técnica, el coeficiente de llenado ( $\eta_v$ ) tiene una variación que en ingeniería se puede despreciar o es mínimo, durante el funcionamiento del motor; lo que implica que no influirá significativamente en la magnitud de la presión media efectiva ( $Pe$ ) ni en el cálculo de la potencia efectiva del motor, como consecuencia de la influencia de la altitud geográfica en la disminución de la presión atmosférica en Puno.

#### iv) **Análisis de la eficiencia mecánica ( $\eta_m$ )**

El parámetro de funcionamiento de la eficiencia mecánica ( $\eta_m$ ) cuantifica en forma porcentual la potencia que se pierde en las pérdidas mecánicas ( $Nm$ ) con respecto a la potencia efectiva ( $Ne$ ).

Las pérdidas mecánicas están constituidas por las potencias que se pierden en fricción entre elementos móviles, en accionar las bombas de agua y aceite, el ventilador, el generador y otros mecanismos auxiliares.

Se define:

$$Nm = Ni - Ne \quad (4.7)$$

Donde:

$Nm$  = Potencia de pérdidas mecánicas

$Ni$  = potencia indicada

$Ne$  = potencia efectiva

Las pérdidas mecánicas se cuantifican a través de la eficiencia mecánica

$(\eta_m)$ :

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} = \frac{N_e}{N_i} \quad (4.8)$$

Analizando la ecuación del parámetro de la eficiencia mecánica ( $\eta_m$ ), por su definición matemática no es influenciada por la altitud ni por la disminución de la presión atmosférica de Puno, porque razonando intuitivamente al funcionar el motor de combustión interna Otto de aspiración natural en Puno, la variación de las magnitudes de la potencia indicada y la potencia efectiva serán siempre proporcionales, como si el funcionamiento fuera a otra altitud; lo que implica que la eficiencia mecánica ( $\eta_m$ ) no variará significativamente.

**v) Análisis de la densidad del aire ( $\rho_K$ )**

Por análisis teóricos y matemáticos desarrollados en el capítulo III se determinó que la influencia de la altitud geográfica de una ciudad es en principio sobre la disminución de la temperatura y presión atmosférica conforme se va incrementando la altitud; factor que influye a la densidad del aire y a su composición, afectando al proceso de combustión con respecto al proceso que se efectúa al nivel del mar, donde se considera la presión atmosférica normal.

En el funcionamiento de los motores de combustión interna Otto de aspiración natural en diversas condiciones ambientales, como la que presenta la geografía montañosa del Perú, en cada altitud varía la temperatura y la presión atmosférica lo que determina la variación o específicamente la densidad del aire ( $\rho_K$ ), lo que se demostrará en este análisis matemático.

Para analizar la influencia de la densidad del aire ( $\rho_K$ ) en la altitud sobre la



presión media efectiva ( $P_e$ ) y por ende sobre la potencia efectiva ( $N_e$ ); consideraremos como se procede en cálculos de ingeniería, supondremos al aire como un gas ideal perfecto, para determinar la variación de la densidad del aire como consecuencia de la altitud geográfica. La ecuación de los gases ideales está dada por la ecuación:

$$PV = RT$$

En la ecuación anterior “ $V$ ” es el volumen específico del gas, es decir la densidad, entonces operando en la ecuación anterior:

$$\rho_K = \frac{P}{gRT}$$

Donde:

$\rho_K$  = densidad del aire, en Kg/m<sup>3</sup>

$P$  = presión, en N/m<sup>2</sup>

$g$  = aceleración de la gravedad, 9,81 m/s<sup>2</sup>

$R$  = Constante del aire, 29,27 m/°K

$T$  = temperatura absoluta, en °K

En base a la ecuación anterior, determinamos la densidad del aire al nivel del mar y en la ciudad de Puno. Pero la presión atmosférica normal internacional al nivel del mar, las condiciones normales de comparación de las propiedades del aire son convencionalmente para la temperatura de 15°C (288°K), para la presión de 1,01 bar (1,033 Kg/cm<sup>2</sup>) y 40° de latitud. Calculando la densidad del aire al nivel del mar:

$$P = 760 \text{ mm Hg} = 101320,68 \text{ N/m}^2$$

$$T = 15^\circ\text{C} = 288^\circ\text{K}$$



Reemplazando en la ecuación:

$$\rho_K = \frac{101340,68 \frac{N}{m^2}}{9,81 \frac{m}{s^2} \times 29,27 \frac{m}{^\circ K} \times 288^\circ K}$$

$$\rho_K = 1,225 \text{ Kg/m}^3$$

Por consiguiente, la densidad del aire al nivel del mar para la presión atmosférica normal internacional es de 1,225 Kg/m<sup>3</sup>.

Para la determinación de la densidad del aire ( $\rho_K$ ) en la ciudad de Puno, se utilizaron las propiedades del aire medidas en el laboratorio de Física de la Escuela Profesional de Físico matemáticas de la UNAP.

$$P_{at} = 490,727 \text{ mmHg} = 65435,01 \text{ N/m}^2$$

$$T = 18^\circ C = 291^\circ K$$

Reemplazando en la ecuación:

$$\rho_K = \frac{65435,01 \text{ N/m}^2}{9,81 \frac{m}{s^2} \times 29,27 \frac{m}{^\circ K} \times 291^\circ K}$$

$$\rho_K = 0,783 \text{ Kg/m}^3$$

Considerando las dos densidades calculadas, al nivel del mar 1,225 Kg/m<sup>3</sup>, calcularemos la disminución de la densidad del aire por la influencia de la altitud:

$$\Delta\rho_K = 1,225 - 0,783 = 0,442 \text{ Kg/m}^3$$

Esta disminución de la densidad del aire  $\Delta\rho_K = 0,442 \text{ Kg/m}^3$  es significativa, debido a la altitud de Puno.

Calculando ésta disminución de la densidad del aire ( $\Delta\rho_K$ ) en porcentaje don respecto



al nivel del mar, considerando la altitud de Puno de 3827 m.s.n.m.

$$1,225 \text{ Kg/m}^3 \longrightarrow 100\%$$

$$0,442 \text{ Kg/m}^3 \longrightarrow X\%$$

$$X\% = \frac{0,442 \text{ Kg/m}^3 \times 100\%}{1,225 \text{ Kg/m}^3}$$

Operando:

$$X\% = 36,08\%$$

Esta disminución de la densidad del aire en porcentaje en la ciudad de Puno:

$$\Delta\rho_K(\%) = 36,08\%$$

Como consecuencia de la influencia de la altitud de Puno, debido a la disminución de la temperatura y presión atmosférica, determinarán también la disminución de la presión media efectiva ( $P_e$ ) y, de la potencia efectiva ( $N_e$ ) del motor Otto en la misma proporción del 36,08%, considerando que los otros parámetros de funcionamiento del motor no tienen una influencia significativa desde el punto de vista de la ingeniería en las ecuaciones para calcular la presión media efectiva ( $P_e$ ) y la potencia efectiva ( $N_e$ ) del motor; aspectos que se demostraron en el análisis teórico efectuado a dichos parámetros de funcionamiento.

Entonces, la potencia efectiva de un motor de combustión Otto de aspiración natural en la ciudad de Puno, cuya altitud sobre el nivel del mar, influye significativamente en la disminución de la presión atmosférica la que determina que el principal parámetro de funcionamiento que influye en la disminución de la potencia efectiva ( $N_e$ ) es la densidad del aire ( $\rho_K$ ), cuya disminución en la altitud





con respecto al nivel del mar nos permite calcular matemáticamente la potencia efectiva del motor en Puno ( $N_{e_p}$ ) con respecto a la potencia efectiva al nivel del mar ( $N_{e_o}$ ):

$$N_{e_p} = \frac{\rho_{K_p}}{\rho_{K_o}} \cdot N_{e_o}$$

Donde:

$N_{e_p}$  = potencia efectiva en Puno.

$N_{e_o}$  = potencia efectiva al nivel del mar

$\rho_{K_p}$  = densidad del aire en Puno

$\rho_{K_o}$  = densidad del aire al nivel del mar.

Reemplazando los valores de las densidades:

$$N_{e_p} = \frac{0,783}{1,225} \cdot N_{e_o}$$

$$N_{e_p} = 0,64 \cdot N_{e_o}$$

Expresando porcentualmente, la potencia efectiva de un motor de combustión interna Otto de aspiración natural funcionando en Puno es aproximadamente 64% de la potencia efectiva del motor funcionando al nivel del mar.

La pérdida de potencia efectiva del motor es de 36% por influencia de la altitud a la que está situada Puno, que determina una importante disminución de la presión atmosférica que tiene un efecto notable sobre la composición del aire y la disminución de la densidad del aire ( $\rho_K$ ) parámetro de funcionamiento fundamental que influye en la disminución de la potencia efectiva.



## 4.2. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la caracterización de la altitud de Puno son confiables porque están sustentados en metodologías empleadas de instituciones de renombre y de confiabilidad técnica mundial como la International Normal Atmosphere (INA), American Society of Mechanical Engineers (ASME) y Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI); cuyos cálculos de la presión atmosférica establecieron que conforme aumente la altitud de la presión atmosférica disminuye aproximadamente en un 10% por cada 1000 m de altitud, lo cual fue demostrado analíticamente y; con respecto al error conceptual de que en la altitud hay menos oxígeno se demostró también analíticamente que la composición del aire hasta una altitud de 20 Km es casi constante y no varía, es decir que el porcentaje de oxígeno es el mismo, lo cual se fundamenta en que a mayor altitud la presión atmosférica disminuye, lo que trae consigo la disminución de la densidad del aire.

Los resultados del análisis teórico sobre los parámetros de funcionamiento de un motor Otto de aspiración son aceptables y de confiabilidad garantizada por que se fundamenta en una teoría desarrollada por investigadores de la Cátedra de Motores de automóviles y tractores del Instituto De Automóviles y Carreteras de Moscú, teoría plasmada en el libro Motores de Automóvil del Doctor en Ciencias Técnicas M.S. Jóvaj de la Editorial MIR – Moscú, bibliografía empleada en el desarrollo de la investigación.



## V. CONCLUSIONES

En el proyecto de investigación los resultados fueron satisfactorios en los objetivos propuestos, estableciendo las siguientes conclusiones:

1. Se caracterizó la altitud de Puno, empleando las metodologías de la International Normal Atmosphere (INA), de la American Society of Mechanical Engineers (ASME) y la del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Concluyéndose que la altitud de Puno determina la disminución de la presión atmosférica y la temperatura de la atmósfera, factores climatológicos que provocan la disminución de la densidad del aire, obteniéndose para la presión atmosférica  $0,622 \text{ Kg/cm}^2$  (457,6186 mmHg) y en base a la ASME 490,7151 mmHg; demostrándose que la presión atmosférica disminuye aproximadamente 10% por cada 1000 metros de altitud. Conclusiones importantes de la caracterización de la altitud es que la densidad del aire en Puno disminuye en 36,08% con respecto al nivel delmar y, que la variación de la composición del aire es mínima hasta una altitud de 20 Km y que los porcentajes de oxígeno y nitrógeno son de 19,91% y 79,36% respectivamente en Puno (3827 m.s.n.m.).
2. Del estudio analítico de los parámetros de funcionamiento de un motor Otto de aspiración natural se concluyó que la potencia efectiva no es afectada por los parámetros: cilindrada del motor ( $i \cdot V_h$ ), carrera del pistón por ciclo ( $\tau$ ) y frecuencia de rotación ( $n$ ) los cuales no dependen de la altitud de Puno y; que el parámetro de la presión media efectiva ( $P_{me}$ ) es el único influenciado negativamente por la altitud y, como consecuencia la potencia ( $P_e$ ) del motor Otto.
3. El único parámetro que es influido por la altitud de Puno es la presión media efectiva,



que depende de la relación entre el poder calorífico ( $H_o$ ) y la cantidad teórica de aire necesario ( $l_o$ ) relación igual a 3; de la relación entre la eficiencia indicada ( $\eta_i$ ) y el coeficiente de exceso de aire ( $\alpha$ ) relación aproximadamente constante en función de la velocidad de rotación ( $n$ ); el coeficiente de llenado no influye porque varía entre 0,75 – 0,85 y; la eficiencia mecánica ( $\eta_m$ ) no depende de la altitud; por consiguiente el único parámetro es la densidad del aire ( $\rho$ ) que influye en la presión media efectiva y por ende en la potencia efectiva. La densidad del aire disminuye de 1,225 Kg/m<sup>3</sup> al nivel del mar a 0,783 Kg/m<sup>3</sup> en Puno, lo que determina una pérdida de potencia efectiva del motor de 36%.



## VI. RECOMENDACIONES

1. El proyecto de investigación desarrollado consiste en un análisis teórico matemático de los parámetros de funcionamiento de un motor Otto, para determinar qué parámetros son influenciados por la altitud de Puno y que implican como consecuencia la pérdida de la potencia efectiva del motor, nos condujeron a conclusiones teóricas significativas sobre el funcionamiento de motores en la altitud; por lo que se recomienda que este trabajo sirva como fundamento y como marco referencial para realizar la investigación experimentalmente, más teniendo en cuenta que ya se analizó qué parámetros son afectados por la altitud de Puno y que determinan en la práctica pérdida de potencia del motor; para lo cual es prioritario la adquisición de un módulo de Banco de Motores para propiciar el desarrollo de la investigación experimental en el área de los motores de combustión importante en la formación académica integral de los estudiantes de Ingeniería Mecánica.
2. Se recomienda como ulterior investigación a emprender, teniendo como marca referencial el trabajo desarrollado en la tesis, el mismo objetivo de la tesis pero desarrollarlo en un motor que utilice combustible diésel o gas natural, recomendación que también alcanzaría a la adquisición del módulo de Banco de motor diésel para la capacitación de docentes y estudiantes en la investigación formativa, aspecto fundamental en la Universidad de hoy día.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bardález, A. (2012). Estudio del efecto de la altitud y la utilización de mezclas BX sobre el funcionamiento de motores encendidos por compresión. Tesis Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- García, L. (2013). Efecto de la altura en el desempeño de un vehículo a gasolina. Tesis de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Goñi, J. (2019). Máquinas hidráulicas y térmicas, Perú. Fondo Editorial Universidad de Lima.
- Hernández, R. (2017). Metodología de la Investigación, México. Editorial McGraw Hill.
- Jóvaj, M. (2018). Motores de Automóvil, Editorial MIR – Moscú.
- Lapuerta, M. & Armas, O. & Agudelo, J. (2016). Estudio del efecto de la altitud sobre el comportamiento de motores de combustión interna. Información tecnológica, Vol. 17, N° 5. 2016, pág.: 21-30, La Serena – Chile.
- López, E. (2018). Efectos producidos por el cambio de presión atmosférica debido a la altitud y su relación con la pérdida de potencia en los motores de combustión interna ciclo Otto Mitsubishi 4G94, Tesis de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Lucius, A. (2014). Motores de Explosión, México, Editorial Hobby.
- Miranda, L. & Medina, E. (2019). Investigando en ingeniería, Arequipa, Editorial Universidad Nacional de San Agustín.
- Ortiz, E. (2015). Motores de Combustión Interna, México, Editorial CECSA.



- Schuket, F. (2018). Máquinas de combustión, Barcelona, Editorial Labor S.A.
- Seymour, J. (2018). El laboratorio del Ingeniero Mecánico. Madrid. Editorial Hispano Americana S.A.
- Shigley, J. & Mischke, C. (2015). Diseño en Ingeniería Mecánica. México. Editorial McGraw Hill.
- Velasco, C. & Velasco J. (2014). Efectos de la altitud sobre la combustión. Revista Metalúrgica N° 35-2014. Universidad Técnica de Oruro, Bolivia.
- Llañez, E. & Rocha (2019). Estratificación de un motor de inyección directa a gasolina al variar la altitud, Artículo científico vol. 12 Num. 30 Universidad Estatal de Milagro, Ecuador.
- López, D. (2018). Factores que afectan al rendimiento del motor: temperatura y altura. Revista actualidad del motor.
- Arroyo, E. & Cevallos, A. (2021). Estudio del efecto de la altitud sobre las emisiones de gases de escape de motores de combustión interna con encendido provocado. Revista Ingeniería y Desarrollo vol. 38, Barranquilla, Ecuador.
- García, J. (2022). La potencia: ¿Cómo le afecta la altura y la presión en los motores de combustión interna? Revista Garaje Hermético, Febrero 12, México.
- Muñoz, L. (2019). Efecto de la altura en el desempeño de un vehículo a gasolina. Tesis Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Colombia.
- Lima, R. (1996). Análisis de los efectos de la altitud en el funcionamiento de los motores de automoción, dosificación e ignición. Tesis de la Universidad Politécnica de



Catalunya, España.

Córdova, E. (2013). Estudio de un motor de combustión interna para determinar sus parámetros de funcionamiento en el laboratorio. Tesis de la Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

Erazo, D. & Viteri, A. (2017). Análisis termodinámico de los parámetros indicados de un motor de ciclo Otto aspiración natural con sistema de inyección electrónica en función de la altitud sobre el nivel del mar. Tesis Facultad de Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Nacional, Quito.

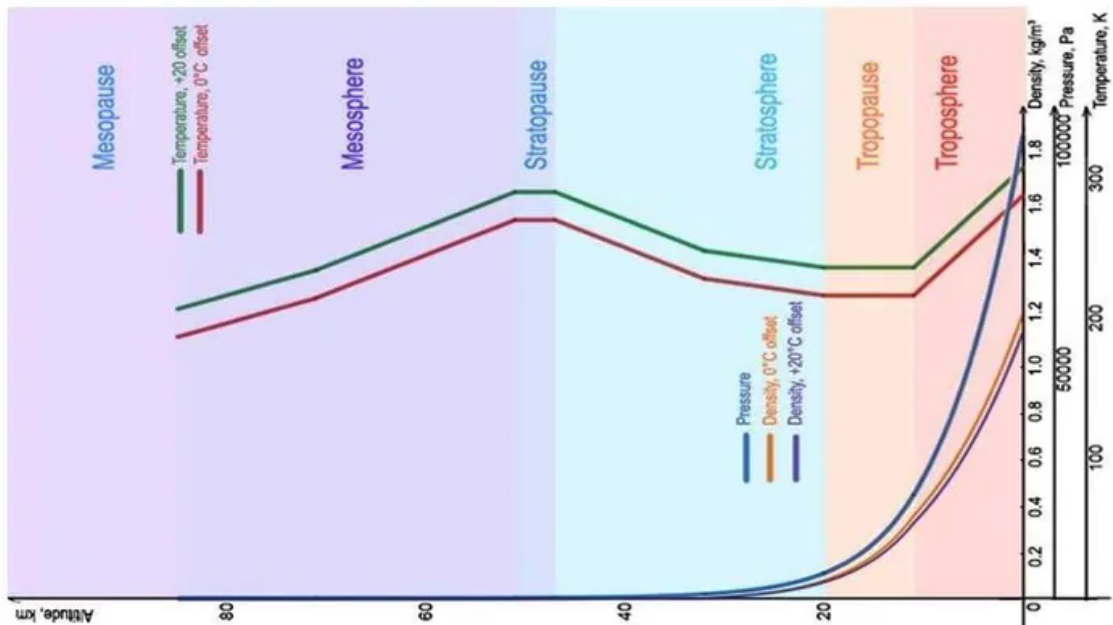
Peralta, G. (2013). Efectos de la altitud sobre los motores de combustión interna. Prezi.com, Aplicación online.



## ANEXOS

**Anexo A:** Propiedades de la Atmósfera Estándar Internacional (ISA) en función de la altitud.

ALTITUDE (Feet)	TEMP. (°C)	PRESSURE			PRESSURE RATIO $\delta = P/P_0$	DENSITY $\sigma = \rho/\rho_0$	Speed of sound (kt)	ALTITUDE (meters)
		hPa	PSI	In.Hg				
40 000	-56.5	188	2.72	5.54	0.1851	0.2462	573	12 192
39 000	-56.5	197	2.58	5.81	0.1942	0.2583	573	11 887
38 000	-56.5	206	2.99	6.10	0.2038	0.2710	573	11 582
37 000	-56.5	217	3.14	6.40	0.2138	0.2844	573	11 278
36 000	-56.3	227	3.30	6.71	0.2243	0.2981	573	10 973
35 000	-54.3	238	3.46	7.04	0.2353	0.3099	576	10 668
34 000	-52.4	250	3.63	7.38	0.2467	0.3220	579	10 363
33 000	-50.4	262	3.80	7.74	0.2586	0.3345	581	10 058
32 000	-48.4	274	3.98	8.11	0.2709	0.3473	584	9 754
31 000	-46.4	287	4.17	8.49	0.2837	0.3605	586	9 449
30 000	-44.4	301	4.36	8.89	0.2970	0.3741	589	9 144
29 000	-42.5	315	4.57	9.30	0.3107	0.3881	591	8 839
28 000	-40.5	329	4.78	9.73	0.3250	0.4025	594	8 534
27 000	-38.5	344	4.99	10.17	0.3398	0.4173	597	8 230
26 000	-36.5	360	5.22	10.63	0.3552	0.4325	599	7 925
25 000	-34.5	376	5.45	11.10	0.3711	0.4481	602	7 620
24 000	-32.5	393	5.70	11.60	0.3876	0.4642	604	7 315
23 000	-30.6	410	5.95	12.11	0.4046	0.4806	607	7 010
22 000	-28.6	428	6.21	12.64	0.4223	0.4976	609	6 706
21 000	-26.6	446	6.47	13.18	0.4406	0.5150	611	6 401
20 000	-24.6	466	6.75	13.75	0.4595	0.5328	614	6 096
19 000	-22.6	485	7.04	14.34	0.4791	0.5511	616	5 791
18 000	-20.7	506	7.34	14.94	0.4994	0.5699	619	5 486
17 000	-18.7	527	7.65	15.57	0.5203	0.5892	621	5 182
16 000	-16.7	549	7.97	16.22	0.5420	0.6090	624	4 877
15 000	-14.7	572	8.29	16.89	0.5643	0.6292	626	4 572
14 000	-12.7	595	8.63	17.58	0.5875	0.6500	628	4 267
13 000	-10.8	619	8.99	18.29	0.6113	0.6713	631	3 962
12 000	-8.8	644	9.35	19.03	0.6360	0.6932	633	3 658
11 000	-6.8	670	9.72	19.79	0.6614	0.7156	636	3 353
10 000	-4.8	697	10.10	20.58	0.6877	0.7385	638	3 048
9 000	-2.8	724	10.51	21.39	0.7148	0.7620	640	2 743
8 000	-0.8	753	10.92	22.22	0.7428	0.7860	643	2 438
7 000	+1.1	782	11.34	23.09	0.7716	0.8106	645	2 134
6 000	+3.1	812	11.78	23.98	0.8014	0.8359	647	1 829
5 000	+5.1	843	12.23	24.90	0.8320	0.8617	650	1 524
4 000	+7.1	875	12.69	25.84	0.8637	0.8881	652	1 219
3 000	+9.1	908	13.17	26.82	0.8962	0.9151	654	914
2 000	+11.0	942	13.67	27.82	0.9298	0.9428	656	610
1 000	+13.0	977	14.17	28.86	0.9644	0.9711	659	305
0	+15.0	1013	14.70	29.92	1.0000	1.0000	661	0
-1 000	+17.0	1050	15.23	31.02	1.0366	1.0295	664	-305





## Anexo B: Propiedades de la Atmósfera Estándar.

### Unidades SI

Altitud (m)	Temperatura (°K)	Presión (KPa)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Velocidad del sonido (m/s)
0	288.2	101.3	1.125	340
500	284.9	95.43	1.167	338
1000	281.7	89.85	1.112	336
2000	275.2	79.48	1.007	333
4000	262.2	61.64	0.81194	325
6000	249.2	47.21	0.6602	316
8000	236.2	35.65	0.5258	308
10000	223.3	26.49	0.4136	300
12000	216.7	19.40	0.3119	295
14000	216.7	14.17	0.2278	295
16000	216.7	10.35	0.1665	295
18000	216.7	7.563	0.1216	295
20000	216.7	5.528	0.0889	295
30000	226.5	1.196	0.0184	302
40000	250.4	0.287	4.00x10 <sup>-3</sup>	317
50000	270.7	0.0789	1.03x10 <sup>-3</sup>	330
60000	255.8	0.0225	3.06x10 <sup>-4</sup>	321
70000	219.7	0.00551	8.75x10 <sup>-5</sup>	297
80000	180.7	0.00103	2.00x10 <sup>-5</sup>	269

### Unidades inglesas

Altitud (ft)	Temperatura (°F)	Presión (lb/ft <sup>2</sup> )	Densidad (slugs/ft <sup>3</sup> )	Velocidad del sonido (ft/s)
0	59.0	2116	0.00237	1117
1 000	55.4	2014	0.00231	1113
2000	51.9	1968	0.00224	1109
5 000	41.2	1760	0.00205	1098
10 000	23.4	1455	0.00176	1078
15 000	5.54	1194	0.00150	1058
20 000	-12.3	973	0.00127	1037
25 000	-30.1	785	0.00107	1016
30 000	-48.0	628	0.000890	995
35 000	-65.8	498	0.000737	973
36 000	-67.6	475	0.000709	971
40 000	-67.6	392	0.000586	971
50 000	-67.6	242	0.000362	971

Jean-François DULHOSTE – Escuela de Ingeniería Mecánica - ULA



**Anexo C: Variación de la Densidad del Aire en Función de la Altitud.**



Altitud (Mt)	D E N S I D A D ( Kg / Mt <sup>3</sup> )				
	0°C	5°C	10°C	15 °C	25 °C
0	1,28	1,25	1,23	1,21	1,17
500	1,21	1,19	1,17	1,15	1,11
1000	1,14	1,12	1,1	1,08	1,05
1500	1,07	1,06	1,04	1,02	0,98
2000	1,01	0,99	0,97	0,96	0,92
2500	0,94	0,92	0,91	0,89	0,86
3000	0,87	0,86	0,84	0,83	0,8
3500	0,81	0,79	0,78	0,76	0,74
4000	0,74	0,73	0,71	0,7	0,68
4500	0,67	0,66	0,65	0,64	0,62
5000	0,61	0,6	0,58	0,57	0,56

## Anexo D: Apunamiento de motores

[ NOTA TÉCNICA ]

# Apunamiento de motores

Los motores, al igual que el cuerpo humano, necesitan respirar. Todo motor toma aire del ambiente, lo utiliza para realizar la mezcla con el combustible, y producir luego la combustión. Cuando se lo somete a alturas por encima del nivel del mar comienza a sufrir la falta de oxígeno. En esta nota le brindamos algunas recomendaciones para que el motor de su auto no se apune.



El apunamiento en los motores consiste en una pérdida de potencia que se manifiesta a grandes alturas. El fenómeno se debe a que, con el aumento en la altura (al subir una montaña, por ejemplo), la presión atmosférica es menor, con lo cual el aire es menos denso. Dicho de otra forma, en un mismo volumen de aire hay menos oxígeno, y esto también afecta a los motores, que necesitan aumentar el ritmo respiratorio para compensar los efectos que produce esta falta de oxígeno en el aire.



La falta de oxígeno en altura afecta notablemente a los motores restándoles potencia.

En los motores, el oxígeno reacciona con el combustible para producir la combustión; ésta tiene ciertas

características según las proporciones de combustible (nafta o gas oil) y comburente (oxígeno). La condición óptima para dicha combustión se produce cuando las proporciones de combustible y oxígeno cumplen la denominada relación estequiométrica, esto significa que la cantidad de combustible es la ideal para que se consuma todo el oxígeno. ¿Y cuáles son los valores de esta relación? Para la nafta es de 14,7:1; es decir 14,7 partes de aire (en masa) por cada parte de nafta (en masa). Para el caso de los motores diésel es de 14,5:1.

#### Mezcla rica, mezcla pobre

Seguramente habrá escuchado hablar de la mezcla rica y la pobre. Una mezcla rica es aquella que está levemente por encima de la estequiométrica: hay más combustible para una misma cantidad de aire. Este es el caso del motor que se ahoga; en cambio una mezcla pobre se da cuando ocurre lo contrario. Ambas influyen en la marcha del motor.

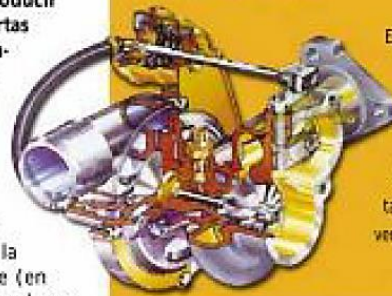
No siempre la mezcla que ingresa al cilindro debe ser la estequiométrica, ya que varía según las condiciones de marcha. Por ejemplo, se requiere una mezcla rica cuando el motor está frío o en aceleraciones bruscas. Recordemos que una mezcla rica durante mucho tiempo logrará bajar la temperatura de la cámara de

Actualmente la mayoría de los automóviles poseen dispositivos electrónicos que ayudan a regular la riqueza de la mezcla según el motor.

#### Acerca del turbocompresor

El turbocompresor es un dispositivo de sobrealimentación que produce el ingreso del aire a una presión por encima de la atmosférica; o sea que hace ingresar un mayor volumen de aire compensando, en cierta medida, la pérdida de potencia.

Sin embargo esto no quiere decir que su vehículo tendrá las mismas prestaciones tanto a grandes alturas como a nivel del mar. Lo que sí le asegura es que no tendrá una excesiva pérdida de potencia.



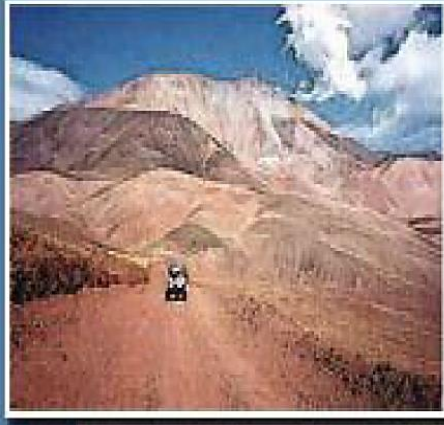
Es muy importante que sea prudente y no trate de exigir por demás al motor, dado que al ser menos denso el aire, el turbocompresor puede llegar a girar a revoluciones tan altas que originen daños severos en el sistema.

combustión en un motor naftero, mientras que en el diésel ocurre lo contrario; en ambos casos la potencia del motor se verá penalizada y podremos sentir que "el motor no tira", especialmente al exigirlo.

#### La función de la electrónica

En la actualidad la mayoría de los autos poseen dispositivos electrónicos que ayudan a regular la riqueza de la mezcla según el motor. Entre estos encontramos el **sensor de presión atmosférica** y el **sensor de oxígeno remanente en los gases de escape**, conocido como **sonda lambda**, que evita que el motor se lave. Este término se refiere al exceso de combustible que, no sólo pierde potencia por mezcla rica, sino que minimiza la acción del aceite lubricante entre el pistón y la ca-

## Apunamiento de motores



Existe un hecho físico que el hombre no puede gobernar y es la diferencia de presión que se genera con la altura.

misa de motor, incrementando el desgaste de ambos componentes, condición dada en alturas significativas donde el oxígeno presente en el aire que ingresa es insuficiente.

tro de valores tabulados y preservar el lubricante de cárter, evitando el lavado.

Ningún motor, por más que posea excelentes características, puede mantener en altura la misma potencia que a nivel del mar.

Con esto podemos concluir que, aunque la computadora que gestiona el funcionamiento de un motor tiene características sobresalientes, de ningún modo puede lograr que tenga la misma potencia que a nivel del mar, aunque si logra mantener los índices de polución den-

### La física es indiscutible

En conclusión, existe un hecho físico que el hombre no puede gobernar y es la diferencia de presión que se genera con la altura. Lo que si puede modificar es la cantidad de combustible inyectado para realizar la mezcla adecuada a quemar en el cilindro. De este modo se obtendrá un buen funcionamiento del motor, a pesar de la variación en las condiciones del entorno en donde circula el vehículo.



Andrés Perchiale  
crahtest-tesis@cesvi.com.ar



### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo GROVER VELARDE DUEÑAS, identificado con DNI 46637953 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERIA MECANICA ELECTRICA,

Informe que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

“ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA ALTITUD DE PUNO SOBRE LA POTENCIA EFECTIVA DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA OTTO DE ASPIRACIÓN NATURAL”

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

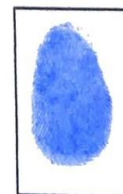
Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 20 de Julio del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella



### AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo GROVER VELARDE DUEÑAS, identificado con DNI 46637953, en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado  
INGENIERIA MECANICA ELECTRICA,

Informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

**"ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA ALTITUD DE PUNO SOBRE LA POTENCIA EFECTIVA DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA OTTO DE ASPIRACIÓN NATURAL"**

Para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio

Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 20 de Julio del 2023

  
FIRMA (obligatoria)



Huella