



**ANÁLISIS TÉRMICO DE UN MOTOR MONOCILÍNDRICO DE 9HP  
ESTACIONARIO**

**JUAN SEBASTIÁN BÁEZ GÓMEZ.  
MICHAEL STEVEN SUÁREZ MANCERA.**

**UNIVERSIDAD ECCI.  
FACULTAD INGENIERÍA.  
INGENIERÍA MECÁNICA.  
BOGOTÁ D.C, COLOMBIA.  
2021.**

**ANÁLISIS TÉRMICO DE UN MOTOR MONOCILÍNDRICO DE 9HP  
ESTACIONARIO**

Tesis de Investigación presentado como requisito para optar al título de:  
**Ingeniero Mecánico.**

Director:  
**MSc. Ing. VLADIMIR SILVA LEAL.**

Línea de investigación  
I+D+i denominada Energía y Transporte.  
Grupo de investigación:

**JUAN SEBASTIÁN BÁEZ GÓMEZ.  
MICHAEL STEVEN SUÁREZ MANCERA.**

**UNIVERSIDAD ECCI.  
FACULTAD INGENIERÍAS.  
INGENIERÍA MECÁNICA.  
BOGOTÁ D.C, COLOMBIA.**

**2021.**

**NOTA DE ACEPTACIÓN:**

---

---

---

---

---

---

---

***Firma del presidente del jurado***

---

***Firma del jurado***

Bogotá, D.C. Julio de 2021.

## **Dedicatoria**

*Dedicado principalmente a mis padres Gabriela y Genaro que me han apoyado durante este arduo camino, animándome de corazón durante este proceso Y formándome de una manera sinigual. A mi hermana Sindy Katherine y a mi tía Bárbara por ser personas muy especiales y por brindarme un gran apoyo además del gran cuidado que han tenido.*

*A mi tutor el ingeniero MSc Vladimir Silva quien es una persona formidable y una inspiración, así como el ingeniero José Montaña y la ingeniera Gladis Bejarano de quienes he aprendido bastantes cosas que me han ayudado a formar tanto como ingeniero y como persona, al igual que a mí compañero Michael quien es una persona muy dedicada que me ha acompañado desde el inicio de esta larga travesía.*

*"Enfrenta los obstáculos a medida que se presenten,  
no pierdas energía temiendo lo que pueda haber en el futuro"*

*Isabel Allende.*

## **Dedicatoria**

*La presente tesis está dedicada principalmente a Dios todo poderoso, por darme la vida, la salud, la fuerza y las herramientas para lograr este objetivo.*

*A mi mamita María Victoria y mi papito José Javier por darme la vida, el apoyo, las enseñanzas, por los valores, los regaños y los consejos que sirvieron para convertirme en la persona que soy hoy en día. Gracias por hacer parte de mi vida y por permitirme ser parte de su orgullo.*

*A mis hermanas Carol Johanna y Angie Brineth por su apoyo incondicional a lo largo de este proceso, por que, sin ellas, no lo hubiera logrado.*

*A mis abuelos Rafael, Rosa y Margarita y a mi tío Rubén Darío, que, aunque ya no están presentes, sé que desde el cielo ustedes me ayudaron a conseguir y culminar este objetivo.*

*A al MSc Ing. Vladimir Silva por la confianza entregada, por incluirme en este maravilloso proyecto, compartir su conocimiento y tiempo. Muchas gracias por guiarme en el camino de la investigación.*

*A los Ingenieros mecánicos Gladys Bejarano Tenza y José Montaña Galán; que se convirtieron en grandes amigos y fueron parte fundamental en el desarrollo del proyecto. Gracias por sus palabras, consejos y enseñanzas que fueron de gran ayuda para convertirme en una mejor persona y con orgullo Ingeniero Mecánico.*

*A mis compañeros y amigos presentes y pasados, quienes sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, alegrías y tristezas y a todas aquellas personas que durante estos cinco años estuvieron a mi lado apoyándome y lograron que este sueño fuera realidad.*

## **Agradecimientos.**

Principalmente a Dios por darnos la existencia, salud, sabiduría, conocimiento, fuerza, la persistencia y excelentes compañeros de grupo de trabajo para poder cumplir con un objetivo más en nuestras vidas.

A nuestros padres y hermanas que siempre han estado presentes en los momentos difíciles dándonos su apoyo y ánimo para seguir adelante y poder superar los obstáculos que se presenten en el camino de la vida.

A nuestro gran director de tesis MSc. Ing. Vladimir Silva Leal por creer, apoyarnos, confiar en nosotros, compartir su profesionalismo y darnos la oportunidad de pertenecer a este maravilloso grupo de investigación. Gracias por disipar el miedo a las cosas que no podíamos entender, por enseñarnos no sólo a comprenderlas, sino a realizarlas; Gracias por convencernos de que podemos ser mejores.

A la Ingeniera Gladys Esperanza Bejarano Tenza y el Ingeniero José Isaías Montaña Galán, por convertirse en más que compañeros de trabajo, en grandes amigos. Gracias por el apoyo brindado a lo largo del proyecto y además por aportar su tiempo, dedicación, conocimiento y experiencia. Gracias por sus enseñanzas aportadas, ya que nos ayudaron a madurar y a crecer como personas y profesionales.

## **RESUMEN.**

El objetivo de este proyecto de investigación está encaminado en el desarrollo del análisis termodinámico de un banco de pruebas compuesto por un motor mono cilíndrico estacionario de 9 hp en un régimen nominal de 3600 rpm, un generador de corriente alterna capaz de proporcionar 4 kilovatios y que cumple la función de freno eléctrico, un banco ventilado de 10 resistencias de 400 vatios cada una, un tablero de control del banco y un tablero de instrumentos de medición.

El motor mono cilíndrico de cuatro tiempos es destinado a operar con gasolina corriente y gas licuado de petróleo (GLP), además de presentar un mecanismo interno que cumple la función de la variación del ángulo de encendido y el cual es fundamental para llevar a cabo la evaluación y comportamiento de los principales parámetros para establecer la eficiencia energética y el impacto causado por las emisiones generadas cuando se emplea cada uno de los combustibles.

### **Palabras clave**

Banco de pruebas, motor mono cilíndrico, generador, variador del ángulo de encendido, eficiencia energética.

## **ABSTRACT**

The objective of this research project consists in the development of the thermodynamic analysis of a test bench composed of a stationary nine hp mono cylindrical engine at a nominal speed of 3600 rpm, an alternating current generator capable of providing 4 kilowatts and complying with the electric brake, a ventilated bank of 10 resistors of 400 watts each, a bank control panel, and a measuring instrument panel.

The mono-cylindrical four-stroke engine is designed to operate with ordinary gasoline and liquefied petroleum gas (LPG). In addition to presenting an internal mechanism that fulfills the function of varying the ignition angle, and is essential to carry out an evaluation and behavior of the main parameters to establish energy efficiency and the impact produced by the emissions generated when each of the fuels is used.

### **Keywords**

Test bench, single cylinder engine, generator, ignition angle variator, energy efficiency.

## CONTENIDO

	pág.
<b>Dedicatoria .....</b>	<b>4</b>
<b>Dedicatoria .....</b>	<b>5</b>
<b>Agradecimientos .....</b>	<b>6</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>7</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>8</b>
<b>Lista de ilustraciones .....</b>	<b>14</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>16</b>
<b>Lista de Gráficas .....</b>	<b>19</b>
<b>1 Capítulo .....</b>	<b>20</b>
1.1 Introducción. ....	20
1.2 Alcance .....	22
1.3 Objetivo General .....	23
1.4 Objetivos Específicos.....	23
1.5 Metodología .....	23
1.6 Planteamiento del Problema .....	26
1.6.1 Formulación del problema .....	26
1.6.2 Descripción del problema .....	26
1.6.3 GLP en Colombia .....	27
1.6.4 GLP Vehicular .....	28

<b>2 Capítulo.....</b>	<b>30</b>
2.1 Estado de Arte y Revisión Bibliográfica .....	30
2.2 Banco de prueba.....	30
2.2.1 Tipo de bancos de prueba.....	31
2.3 Motor mono cilíndrico.....	31
2.3.1 Ciclo termico del motor de combustion interna.....	32
2.3.2 Ciclo real del motor de combustion interna por encendido probocado .....	35
2.3.3 Combustión y fenómeno de detonación en motores de encendido provocado. ....	37
2.3.4 Variables que afectan la aparición de la autoinflamación en la combustión.....	40
2.3.5 Avance y retraso de chispa .....	41
2.3.6 Parámetros básicos de Motores de combustión interna alternativos.....	42
2.3.7 Parámetros geométricos .....	43
2.3.8 Parámetros de funcionamiento.....	46
2.3.9 Trabajo, potencia y presión de bombeo, fricción y auxiliares. ...	56
2.3.10 Parámetros efectivos .....	57
2.3.11 Técnicas Experimentales .....	61
2.3.12 Transductores .....	62
2.3.13 Medidas de parámetros específicos.....	65
2.3.14 Parámetros usuales y normalizados .....	69
2.3.15 Variables de operación que afectan a los parámetros de salida del motor .....	70
2.4 Pérdidas de Calor .....	72
2.4.1 Convección.....	73
2.4.2 Conducción. ....	74
2.4.3 Radiación. ....	74
2.5 Unidades electrógenas .....	75

2.5.1	Combustibles empleados para las unidades electrógenas.....	75
2.5.2	Características del combustible.....	77
2.5.3	Número de octano.....	78
2.6	Gasolina.....	78
2.6.1	Componentes de la gasolina.....	79
2.6.2	Contenido de Gomas.....	79
2.6.3	Contenido de azufre.....	80
2.6.4	Contenido de aromáticos.....	81
2.6.5	Contenido de benceno.....	82
2.6.6	Poder calorífico de la gasolina.....	82
2.6.7	Propiedades fisicoquímicas.....	82
2.7	GLP.....	83
2.7.1	Características del GLP.....	84
2.7.2	Propiedades fisicoquímicas del GLP.....	85
2.8	Normatividad Nacional e Internacional para Motores de Combustión interna.....	85
<b>3</b>	<b>Capítulo.....</b>	<b>87</b>
3.1	Sitio de Pruebas.....	87
3.2	Partes del Banco de Prueba.....	88
3.3	Reconocimiento del equipo.....	89
3.3.1	Tablero de instrumentos de medición.....	89
3.3.2	Probeta de Gasolina.....	90
3.3.3	Motor mono cilíndrico.....	91
3.3.4	Cordón de arranque.....	92
3.3.5	Variador de combustible.....	92
3.3.6	Tubo de escape.....	93
3.3.7	Caja de control de resistencias.....	93
3.3.8	Resistencias de prueba.....	94
3.3.9	Generador eléctrico.....	94

3.4 Evaluación de variables de interés.....	95
3.4.1 Variables Fijas.....	95
3.4.2 Variables Medibles.....	95
3.5 Análisis del ángulo óptimo de operación para cada combustible.....	97
3.5.1 Ángulo óptimo para Gasolina.....	97
3.5.2 Ángulo óptimo para GLP.....	102
3.6 Número de replicas.....	105
<b>4 Capítulo.....</b>	<b>106</b>
4.1 Análisis mediante la operación del equipo con combustible gasolina.....	106
4.2 Análisis de las emisiones generadas por la operación del equipo con combustible gasolina.....	111
4.3 Análisis del calor perdido por las emisiones generadas por la operación del equipo con combustible gasolina.....	114
4.4 Análisis mediante la operación del equipo con combustible GLP.....	117
4.5 Análisis de las emisiones generadas por la operación del equipo con combustible GLP.....	121
4.6 Análisis del calor perdido por las emisiones generadas por la operación del equipo con combustible GLP.....	124
4.7 Transferencia de Calor.....	126
4.8 Transferencia de calor por aletas.....	131
4.9 Transferencia de calor por radiación.....	134
4.10 Parámetros analizados del motor.....	136
<b>5 Capítulo.....</b>	<b>137</b>
5.1 Revisión del equipo.....	137
5.2 Encendido con gasolina.....	138
5.3 Pruebas.....	141
5.3.1 Para una carga del 0%.....	141
5.3.2 Para una carga del 20%.....	144

5.4	Transcurso de Gasolina a GLP.....	147
5.5	Pruebas con GLP.....	149
5.5.1	Para una carga del 0%.....	149
5.5.2	Para una carga del 20%.....	151
<b>6</b>	<b>Análisis de Resultados. ....</b>	<b>154</b>
6.1	Consumo de combustible.....	154
6.2	Consumo de combustible específico.....	155
6.3	Calor Liberado. ....	156
6.4	Balance energético Gasolina .....	156
6.5	Distribución energética en el sistema con GLP.....	160
6.6	Monóxido de Carbono.....	162
6.7	Dióxido de carbono .....	163
6.8	Oxígeno.....	164
6.9	Hidrocarburos.....	164
6.10	Factor Lambda.....	165
6.11	Consumo del flujo masico de los combustibles.....	166
6.12	Eficiencia Eléctrica .....	168
<b>7</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>170</b>
<b>8</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>172</b>
<b>9</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>174</b>
<b>10</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>183</b>

## LISTA DE ILUSTRACIONES.

	pág.
<i>Ilustración 1. Etapas de la metodología.</i> -----	24
<i>Ilustración 2. Participación de la demanda de energía eléctrica.</i> -----	26
<i>Ilustración 3. Banco de pruebas gunt hamburg.</i> -----	30
<i>Ilustración 4. Motor monocilindro.</i> -----	32
<i>Ilustración 5. Ciclo térmico Motor 4 tiempos.</i> -----	33
<i>Ilustración 6. Diagrama Ideal Presión Volumen para el ciclo Otto</i> -----	34
<i>Ilustración 7. Ciclo de Otto real.</i> -----	36
<i>Ilustración 8. Diagrama de distribución, Ciclo real del motor Otto.</i> -----	36
<i>Ilustración 9. Diferencia entre ciclos del motor.</i> -----	38
<i>Ilustración 10. Desigualdad de Combustión.</i> -----	39
<i>Ilustración 11. Daño producido por detonación en un pistón.</i> -----	40
<i>Ilustración 12. Esquema motor de combustión interna alternativo</i> -----	43
<i>Ilustración 13. Comparación entre cilindros de distinto S/D, con la misma cilindrada e igual relación de compresión volumétrica.</i> -----	45
<i>Ilustración 14. Ciclo indicado de un motor de cuatro tiempos, mostrando los lazos de alta y baja presión (bombeo).</i> -----	54
<i>Ilustración 15. Desglose de perdidas mecánicas en un motor.</i> -----	56
<i>Ilustración 16. Balance de energía.</i> -----	73
<i>Ilustración 17. Variación de la relación de compresión con el índice de octano (izquierda) y valores del consumo especifico mínimo y de la presión media efectiva máxima con el índice de octano (derecha).</i> -----	77
<i>Ilustración 18. Propiedades fisicoquímicas.</i> -----	83
<i>Ilustración 19. SENA, Centro de Tecnologías del Transporte.</i> -----	87
<i>Ilustración 20. Esquema general del banco de pruebas.</i> -----	88
<i>Ilustración 21. Partes del banco de pruebas.</i> -----	89
<i>Ilustración 22. Tablero de Instrumentos del Banco de Pruebas.</i> -----	90

<i>Ilustración 23. Probeta de Gasolina del Banco de Pruebas.</i>	90
<i>Ilustración 24. Motor monocilíndricos Honda 270GX.</i>	91
<i>Ilustración 25. Cordón de arranque de motor monocilíndricos.</i>	92
<i>Ilustración 26. Palanca de variador de combustible.</i>	92
<i>Ilustración 27. Tubo de Escape de motor de Banco de Pruebas.</i>	93
<i>Ilustración 28. Caja de control de resistencias de carga eléctrica.</i>	93
<i>Ilustración 29. Caja de resistencias.</i>	94
<i>Ilustración 30. Generador 4000 Vatios de corriente alterna.</i>	95
<i>Ilustración 31. Banco de Pruebas empleando gasolina y GLP.</i>	96
<i>Ilustración 32. Diagrama de selección de ángulo de encendido.</i>	98
<i>Ilustración 33. Reglilla de medición de ángulo de encendido.</i>	101
<i>Ilustración 34. Revisión del ángulo de encendido lampara estroboscópica.</i>	101
<i>Ilustración 35. Límites máximos de emisiones permisibles para vehículos accionados con gasolina en velocidad de crucero y en condición de marcha mínima, ralentí o prueba estática.</i>	
<i>Ilustración 36. Regulador de presión y contador de consumo de GLP.</i>	102
<i>Ilustración 37. Diagrama de selección de ángulo de encendido.</i>	103
<i>Ilustración 38. Límites máximos de emisiones permisibles para vehículos convertidos a gas natural vehicular o GLP en velocidad de crucero y en condiciones de marcha mínima, ralentí o prueba estática.</i>	105
<i>Ilustración 39. Modelo toma de dimensiones en aletas.</i>	131

## LISTA DE TABLAS.

pág.

<i>Tabla 1. Ventajas e inconvenientes de cada tipo de motor según la relación S/D.</i>	44
<i>Tabla 2. Valores máximos habituales de régimen y velocidad lineal media de pistón.</i>	47
<i>Tabla 3. Valores del poder calorífico inferior de combustibles comunes.</i>	51
<i>Tabla 4. Valores de poder calorífico inferior de combustibles 15°C y 1 atm.</i>	51
<i>Tabla 5. Dosado estequiométrico de combustibles representativos.</i>	53
<i>Tabla 6. Rendimiento efectivo máximos y consumos específicos (referidos a gasolina y gasoil) de distintos tipos de motor.</i>	58
<i>Tabla 7. Valores orientativos de presión media de distintos tipos de motor.</i>	59
<i>Tabla 8. Parámetros específicos.</i>	63
<i>Tabla 9 Métodos de medida de emisiones contaminantes</i>	69
<i>Tabla 10. Capacidades caloríficas de diferentes combustibles.</i>	76
<i>Tabla 11. Características fisicoquímicas del GLP.</i>	84
<i>Tabla 12. Propiedades fisicoquímicas del GLP.</i>	85
<i>Tabla 13. Descripción de los elementos del esquema.</i>	89
<i>Tabla 14. Datos técnicos de motor de combustión interna analizado.</i>	91
<i>Tabla 15. Especificaciones de reglaje, Motor Honda GX270.</i>	97
<i>Tabla 16. Resultados de prueba en régimen ralentí Gasolina.</i>	99
<i>Tabla 17. Resultados de prueba en régimen crucero (3600RPM) gasolina.</i>	99
<i>Tabla 18. Resultados de prueba en régimen crucero (3600RPM) gasolina con carga 100%.</i>	99
<i>Tabla 19. Resultados de prueba en régimen ralentí GLP.</i>	103
<i>Tabla 20. Resultados de prueba en régimen crucero (3600RPM) GLP.</i>	104
<i>Tabla 21 Resultados en régimen crucero (3600RPM) GLP con carga 100%.</i>	104
<i>Tabla 22. Resultados de prueba con combustible gasolina.</i>	107
<i>Tabla 23. Resultado Caudal de gasolina.</i>	108

<i>Tabla 24. Resultado del Flujo másico de gasolina.....</i>	<i>108</i>
<i>Tabla 25. Resultado del Calor Liberado.....</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 26. Resultados de la Potencia eléctrica generada.....</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 27. Consumo específico de combustible al freno.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 28. Resultado de la eficiencia eléctrica.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 29. Resultados de emisiones de la primer replica Gasolina.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 30. Masa atómica de las moléculas de la combustión.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 31. Resultados de masa de moléculas producidas.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 32. Flujo másico de emisiones.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 33. Fracciones molares en función del porcentaje de carga.....</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 34. Capacidad Calorífica de los productos de las emisiones generadas por la combustión de gasolina. ....</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 35. Cp de la mezcla en función del porcentaje de carga.. ....</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 36. Temperatura de las emisiones con respecto al grado de carga.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 37. Calor Perdido por Emisiones. ....</i>	<i>117</i>
<i>Tabla 38. Resultados de prueba con combustible GLP.....</i>	<i>117</i>
<i>Tabla 39. Resultado del Flujo másico de GLP.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabla 40. Resultado del Calor Liberado.....</i>	<i>119</i>
<i>Tabla 41. Resultados de la Potencia eléctrica generada. ....</i>	<i>119</i>
<i>Tabla 42. Consumo específico de combustible al freno.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 43. Resultado de la eficiencia eléctrica.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 44. Resultados de emisiones de la primer replica GLP. ....</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 45. Masa atómica de las moléculas de la combustión GLP. ....</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 46. Resultados de masa de moléculas producidas del GLP. ....</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 47. Flujo másico de emisiones producto de combustión GLP.....</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 48. Fracciones molares emitidas por el GLP. ....</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 49. Cp de la mezcla de emisiones de GLP . ....</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 50. Temperatura de las emisiones de GLP.....</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 51. Calor Perdido por Emisiones. ....</i>	<i>126</i>
<i>Tabla 52. Transferencia de calor por convección. ....</i>	<i>134</i>

<i>Tabla 53. Transferencia de Calor Total.....</i>	<i>135</i>
<i>Tabla 54. Parámetros Geométricos del motor del banco de pruebas. ....</i>	<i>136</i>
<i>Tabla 55. Parámetros Operativos del motor del banco de pruebas. ....</i>	<i>136</i>
<i>Tabla 56. Resistencias por activar con respecto a la carga.....</i>	<i>146</i>
<i>Tabla 57. Datos de Replicas Combustible Gasolina.....</i>	<i>178</i>
<i>Tabla 58. Datos de Replicas Combustible GLP. ....</i>	<i>178</i>

## LISTA DE GRÁFICAS.

	Pág.
<i>Gráfica 1. Contenido de gomas en gasolina.</i> .....	80
<i>Gráfica 2. Contenido de azufre en gasolina.</i> .....	81
<i>Gráfica 3. Consumo de Combustible.</i> .....	155
<i>Gráfica 4. Consumo Especifico en función del porcentaje de carga.</i> .....	155
<i>Gráfica 5. Calor Liberado y/o Potencia entregada por el combustible.</i> .....	156
<i>Gráfica 6. Balance energético en gasolina con carga del 0%.</i> .....	157
<i>Gráfica 7. Balance energético en gasolina con carga del 20%.</i> .....	157
<i>Gráfica 8. Balance energético en gasolina con carga del 40%.</i> .....	158
<i>Gráfica 9 Balance energético en gasolina con carga del 60%.</i> .....	158
<i>Gráfica 10. Balance energético en gasolina con carga del 80%.</i> .....	159
<i>Gráfica 11. Balance energético en gasolina con carga del 100%.</i> .....	160
<i>Gráfica 12. Distribución energética empleando GLP carga al 0 y 20%.</i> .....	160
<i>Gráfica 13. Distribución energética empleando GLP carga al 40 y 60%.</i> .....	161
<i>Gráfica 14. Distribución energética empleando GLP 80 y 100%.</i> .....	162
<i>Gráfica 15. Monóxido de Carbono.</i> .....	163
<i>Gráfica 16. Dióxido de Carbono.</i> .....	163
<i>Gráfica 17. Oxígeno.</i> .....	164
<i>Gráfica 18. Hidrocarburos.</i> .....	165
<i>Gráfica 19. Factor Lambda.</i> .....	166
<i>Gráfica 20. Flujo Másico del combustible.</i> .....	167
<i>Gráfica 21. Flujo Másico Aire.</i> .....	167
<i>Gráfica 22. Flujo Másico Emisiones.</i> .....	168
<i>Gráfica 23. Eficiencia Eléctrica en función de la carga de generación.</i> .....	169

# 1 Capítulo

## INTRODUCCIÓN.

La energía eléctrica en el mundo ha sido de gran importancia para el avance tecnológico y social de la humanidad. Este avance está ligado a la exorbitante cantidad de combustibles fósiles que ha estado presente en nuestro planeta. Colombia es un país que se caracteriza por existencia de grandes pozos petroleros como lo son: campo Rubiales, Castilla, Chichimene, Quifa entre otros distribuidos a lo largo del territorio nacional [1]. Esta extracción masiva de crudo da como resultado la producción de derivados de petróleo como lo son: gasolina, Diesel, Gas natural, metano, GLP (Gas licuado de petróleo), etc. El GLP o Gas Licuado de Petróleo es uno de los combustibles más importantes para la sociedad colombiana debido a sus propiedades, logra ser de gran ayuda en los estudios energéticos del país.

La generación de energía en Colombia ha evolucionado en las últimas décadas, logrando redes energéticas con más extensas y con mayor eficacia siendo por medios hidráulicos y térmicos los mayores tipos de generación[2]. La complejidad de la topografía colombiana ha sido un limitante para la extensión de la red eléctrica en zonas apartadas del territorio nacional cohibiendo así a comunidades apartadas del servicio eléctrico. El uso de los motogeneradores es una alternativa viable capaz de generar electricidad en estas zonas mejorando así su calidad de vida. Los motogeneradores son equipos con funcionamiento mecánico utilizados para la generación de energía eléctrica a partir de la transformación de energía mecánica, para ello una de las alternativas es el uso de la energía química que brinda la combustión de combustibles fósiles por medio del ciclo otto. Teniendo en cuenta este principio da cabida al uso de GLP o gas propano el cual por mucho tiempo fue

liberado a la atmosfera mediante el venteo (antorcha) en las diferentes refinerías generando efectos ambientales negativos.

La normatividad colombiana por medio de las normas NTC (Norma Técnica colombiana) limita las emisiones contaminantes de todo mecanismo que utilice combustibles fósiles, ya sea gasolina, Diesel o GLP. Esta exigencia es una medida para combatir el cambio climático que afecta a la humanidad. Según la resolución 910 del 2008 es importante evaluar los datos de las emisiones a través del analizador de gases de escape el cual permite evaluar gases como HC (hidrocarburos), CO (monóxido de carbono), CO<sub>2</sub> (Dióxido de carbono), O<sub>2</sub> (Oxígeno) presentes durante la combustión[3].

## 1.2 ALCANCE.

En los últimos años, gracias a las plantas de generación de energía eléctrica se ha logrado suplir la necesidad de proporcionar electricidad en algunas zonas remotas donde no hay presencia de redes eléctricas que mitiguen la falta de energía; Las zonas no interconectadas (ZNI) comprenden alrededor del 66% del territorio nacional, donde se incluyen 16 departamentos, 6 capitales departamentales, 54 cabeceras municipales y 1259 localidades [4]. Por esta razón muchas personas optan por adquirir estas unidades electrógenas para poder trabajar sus electrodomésticos.

Estas plantas están compuestas básicamente de un generador de corriente alterna que proporciona la energía suficiente para alimentar la residencia, y un motor de combustión interna de encendido provocado, que acciona el generador y el cual presenta un ángulo de encendido fijo que cumple con las características específicas del combustible a trabajar (gasolina, gas natural)[5]

Con el aumento de precios de los combustibles y de la demanda de energía en el territorio colombiano, se opta por emplear combustibles alternativos para disminuir los costos de funcionamiento de los moto generadores; por este motivo, en la presente investigación se emplea el gas licuado de petróleo (GLP) como combustible alternativo en el banco de pruebas de la Universidad ECCI, gracias a las características peculiares de este gas, ya que presenta un octanaje y un poder calorífico superior que el de gasolina, por esta razón se ve la necesidad de llevar a cabo el análisis del comportamiento térmico del motor mono cilíndrico cuando es sometido a pruebas con GLP y gasolina corriente evaluando los diferentes parámetros para determinar la eficiencia energética de cada combustible.

### **1.3 OBJETIVO GENERAL.**

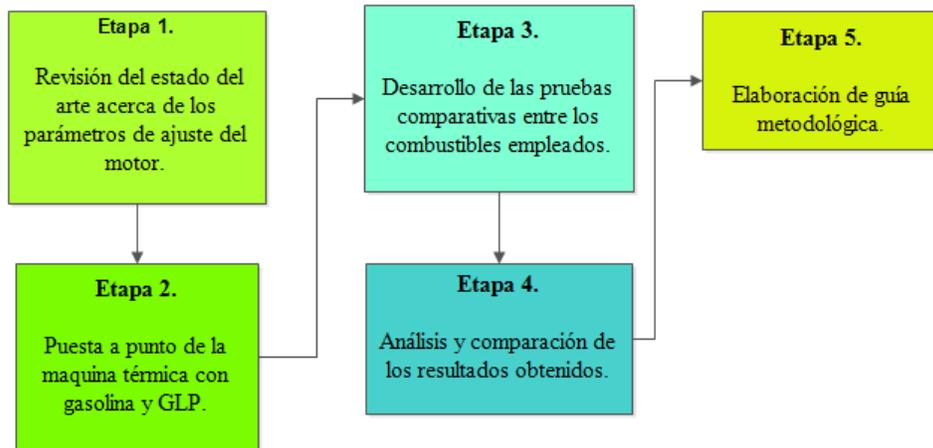
Analizar el comportamiento térmico de un motor mono cilíndrico de 9 HP estacionario, dedicado a gasolina cuando es sometido a pruebas con GLP y gasolina corriente, en función del régimen nominal de generación (3600 RPM).

### **1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Realizar una revisión del estado del arte sobre los parámetros de ajuste y puesta a punto de un motor mono cilíndrico carburado de encendido provocado.
- Desarrollar pruebas comparativas entre línea base gasolina corriente y GLP (Gas licuado de petróleo) para diferentes configuraciones de avance de encendido del motor en estudio.
- Analizar el comportamiento térmico para el caso de cada combustible determinando la mejor condición de eficiencia térmica en cada uno.
- Construir una guía metodológica para el desarrollo de pruebas de comportamiento térmico del motor utilizando diferentes combustibles.

### **1.5 METODOLOGÍA.**

El proyecto tiene como finalidad el análisis del comportamiento termodinámico de un banco de pruebas, donde por medio de 5 etapas que se muestran en la *Ilustración 1* se cumplirán los objetivos estipulados.



*Ilustración 1. Etapas de la metodología.*  
Fuente: Autor.

La primera etapa consistió en realizar una revisión del estado del arte acerca de los parámetros de ajuste y puesta a punto del motor de encendido provocado del banco de pruebas de la universidad ECCI, el cual presenta un dispositivo que permite el adelanto o atraso de la chispa, además se estudiaron las características del combustible de trabajo gasolina y el combustible alternativo GLP.

En la segunda etapa se llevó a cabo el ajuste y puesta punto del motor, donde se determinó el ángulo óptimo de encendido para cada combustible (gasolina y GLP), mediante la comparación de los parámetros de consumo de combustible, la potencia de generación y los resultados obtenidos por el analizador de gases al momento de variar el ángulo de encendido por medio del adelanto o retraso de la chispa de ignición en un intervalo de 20 a 40°, y teniendo en cuenta la resolución número 910 del 2008, por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes terrestres [6].

Una vez determinado el ángulo de encendido para los dos combustibles a trabajar, se lleva a cabo la tercera etapa, en la cual se realizaron las pruebas comparativas utilizando gasolina y GLP, donde se procedió a variar parámetros de funcionamiento del banco de pruebas y se estudiaron otros criterios importantes como el consumo

del combustible, la relación aire – combustible, los gases de escape y la eficiencia energética del sistema.

De esta manera en la cuarta etapa con los datos obtenidos, se analizaron por medio de un modelo matemático graficando los resultados para comprender el comportamiento de las variables estudiadas con el fin de poder evaluar la eficiencia térmica del banco y a la vez comparar los resultados conseguidos por los dos combustibles empleados determinando con cuál de ellos es más viable trabajar.

En la quinta etapa se realizó una guía metodológica que describe el manejo y el paso a paso que se debe llevar para el desarrollo de las réplicas en el banco de pruebas, con el fin de analizar el comportamiento del banco al emplear dos tipos de combustibles (GLP y gasolina), donde los estudiantes puedan aplicar los conocimientos recopilados de materias como termodinámica, transferencia de calor y maquinas térmicas, para dar explicación a los fenómenos que se presentan en la práctica con los datos suministrados por el equipo.

Este banco quedara ubicado en el laboratorio de inyección y sincronización de la Universidad ECCI, debido a que en este espacio presenta mejor ventilación para evacuar de forma más optima las emisiones producidas, además, están en disposición los equipos necesarios para lograr recopilar los datos de los contaminantes a través del analizador de gases y la herramienta necesaria para realizar cualquier tipo de mantenimiento al banco.

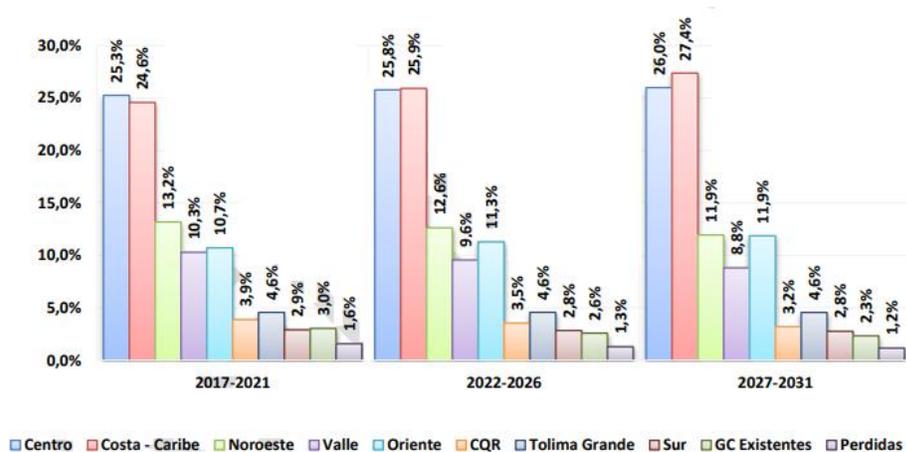
## 1.6 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.6.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

- ¿Es posible sustituir el combustible líquido (gasolina) por un combustible gaseoso (GLP), en el motor mono cilíndrico conservando un comportamiento similar generado al combustible de operación?

### 1.6.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

El constante crecimiento de la población ha causado un aumento en la demanda de energía en el país el cual va a continuar en acenso según la Unidad de Planeación Minero Energético (UPME) donde se estima un crecimiento anual en el consumo de energía de 2.72% en el intervalo de tiempo del 2017 – 2031 [7], como se puede visualizar en la *ilustración 2*; por ende, el aumento del consumo de combustibles comunes como lo son la gasolina y el diésel van de forma desenfrenada causando precipitadamente el agotamiento de los yacimientos de las energías fósiles, lo cual a su vez provoca la proliferación de emisiones contaminantes como el CO, HC, NOx SOx, que son gases altamente contaminante y perjudiciales para la salud[8].



*Ilustración 2. Participación de la demanda regional de energía eléctrica (GWh-año). Fuente: [7].*

Por este motivo se recurre a utilizar combustibles alternativos como el gas licuado de petróleo (GLP), el cual es un derivado del proceso de refinación del crudo y se caracteriza por sus propiedades fisicoquímicas que le permiten mezclarse con otros combustibles y lograr reducir las emisiones contaminantes; convirtiéndolo en una alternativa de generación de energía limpia y rentable en comparación a otros combustibles fósiles [9].

### **1.6.3 GLP en Colombia.**

En los últimos años, en Colombia se han investigado nuevas fuentes energéticas provenientes del petróleo tales como los combustibles gaseosos de los cuales se resalta el gas natural y el GLP, los cuales disminuyen los costos de la producción en las refinerías petroleras [10]. La demanda de combustible del país se aproxima a un 68% procedentes de las fuentes fósiles, donde solo un 3% pertenece al GLP, siendo un combustible alternativo que podría suplir los combustibles convencionales como el diésel o la gasolina [1].

Determinando que el consumo del GLP es relativamente bajo en comparación de otros combustibles fósiles, se pueden plantear nuevas alternativas de consumo, como la generación de energía eléctrica para zonas no interconectadas (ZNI), la combinación con otros combustibles para disminuir las emisiones contaminantes o como combustible para motores de combustión interna [1].

Los combustibles convencionales como el diésel y la gasolina son empleados por muchas personas en zonas no interconectadas que no cuentan con energía eléctrica para accionar las unidades electrógenas que por lo general se conforman de un MCI y un generador eléctrico, con el fin de poder proporcionar a sus hogares electricidad y de esta forma tener una vida más digna [5]. Pero por el alza del precio de los combustibles en los últimos años, muchas personas optan por vivir sin este

recurso primordial, por tal motivo al emplear el GLP como combustible de los motogeneradores, ajustando los parámetros de operación del motor, permite obtener energía de una forma más limpia, rentable y de óptima calidad [5].

#### **1.6.4 GLP vehicular.**

El GLP presenta varios puntos a favor de ser empleado como combustible para vehículos por el simple hecho de reducir las emisiones contaminantes generadas por el proceso de combustión ya que reduce el consumo específico de combustible hasta un 28.38% en comparación con otros carburantes [11], gracias principalmente a sus propiedades fisicoquímicas [1].

En los vehículos de carga pesada, se presenta una gran desventaja al utilizar al GLP como combustible, debido a que los tanques que se necesitan para el almacenamiento del gas ocuparían bastante volumen y generarían una carga extra representada en pérdidas [9].

En países como Alemania, Francia, Inglaterra y España destinaron el GLP como combustible para vehículos que prestan el servicio particular con el objetivo de reducir la contaminación atmosférica. De igual forma los vehículos que utilizan GLP como fuente de funcionamiento fueron ensamblados para trabajar con otras fuentes fósiles, pero gracias al bajo costo de conversión, los beneficios que trae utilizar el gas y al bajo costo que presenta, aumenta la inclinación de utilizar GLP por encima de otros combustibles [9].

En Colombia por la incertidumbre ambiental que se ha venido presentado en los últimos años entorno a la escases y alza de los precios de los combustibles, se están buscando nuevas opciones mediante el uso de combustibles alternativos como el biodiesel de aceite de palma, etanol a base de caña de azúcar, biogás o GLP los cuales se puede producir o hallar en el territorio colombiano con el fin de

suministrar como fuente de energía a los vehículos que transitan por el país disminuyendo la contaminación por emisiones [1].

Además, al emplear GLP como combustible base, el poder entregado por este carburante está por encima del 95% de potencia generado por la gasolina y de igual forma las emisiones producidas por el GLP son menos contaminantes donde los niveles de emisión del HC y CO pueden reducirse en gran medida, pero los niveles de NO<sub>x</sub> incrementan levemente, permaneciendo dentro de los límites establecidos por las normativas ambientales [12]; además, el GLP no contiene azufre ni plomo.

## 2 Capítulo: Estado de Arte y Revisión Bibliográfica

En este capítulo se recopila la información bibliográfica relevante enfocada en el principio y los parámetros de funcionamiento de los motores monocilíndricos de cuatro tiempos de encendido provocado.

### 2.1 Banco de prueba.

Es un dispositivo empleado para evaluar y comprobar parámetros y variables de funcionamiento de los motores de combustión interna a nivel de investigación con el fin de describir un ambiente de desarrollo que está protegido de los riesgos de las pruebas en un ambiente de producción[13]. Por lo cual para el estudio es necesario acoplar al motor a un freno dinamométrico por medio de juntas que permitirá el análisis de parámetros operativos como el consumo de combustible, potencia, velocidad angular, entre otros [14].



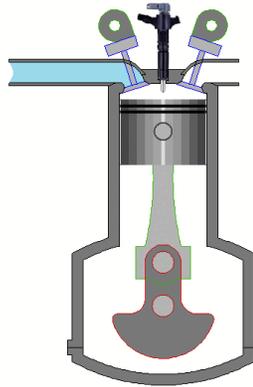
*Ilustración 3. Banco de pruebas gunt hamburg.  
Fuente: [14].*

### 2.1.1 Clases de bancos de prueba.

- **Bancos para ensayos transitorios:** Para los ensayos transitorios el elemento fundamental es el dinamómetro, que le da el funcionamiento bajo varios parámetros de marcha importantes [14].
- **Banco de rodillos:** Disponen rodillos los cuales simulan la interacción de las ruedas del vehículo. Disponen de hasta 4 rodillos empotrados en el piso. El motor está conectado al freno dinamométrico para disipar la potencia de entrega del motor [14].
- **Banco dinámico:** Se emplea un freno acoplado directamente al motor. este freno dinamométrico permite simular perfectamente el comportamiento del vehículo en carretera [14].
- **Rueda dinamométrica:** Para este banco se reemplazan con dinamómetros las ruedas del vehículo para así simular de una mejor manera el vehículo en situaciones de curvas, deslizamiento o derrape de las ruedas[14].
- **Banco de prueba inerciales:** Se caracterizan por que presentan una masa inercial que opone resistencia cuando el motor está en aceleración[14].
- **Banco de prueba híbridos:** Es un banco de prueba que posee una masa inercial importante conectada con un dinamómetro para producir carga en régimen fijo [14].

### 2.2 Motor mono cilíndrico.

Es una maquina térmica compuesta por un pistón el cual opera con diferentes combustibles como diésel, gas natural vehicular, gasolina entre otros, además, pueden ser diseñados para trabajar en ciclos de 2 y 4 tiempos, su principal uso se ha dado en el sector moto ciclístico, cuentan con la ventaja de una fácil fabricación a un costo económico bajo. Estos motores a comparación de los motores poli cilíndricos comúnmente usados tienen un menor rendimiento, pero se da una mejor refrigeración [15].



*Ilustración 4. Motor monocilindro.*  
*Fuente: [15].*

En este tipo de motores, el cigüeñal se conforma de varias partes con el objetivo de permitir el montaje de la biela (generalmente es una sola pieza forjada), y por lo general va unida tanto al pistón como al cigüeñal mediante rodamientos. El encendido se realiza por medio de un volante magnético el cual se encuentra sobre el cigüeñal [15].

### **2.2.1 Ciclo termico del motor de combustion interna:**

Para la obtencion del trabajo en un motor de combustion interna a gasolina se da por un ciclo termico realizado por en el cillindro. Este ciclo se realiza en 2 o 4 tiempos.

El ciclo de trabajo mas realizado en los motores es el de 4 tiempos como se muestra en la *ilustración 5*. y los cuales se dividen en:

- Carrera de admision.
- Carrera de compresion.
- Combustion y carrera de expansion.
- Carrera de escape.

Este ciclo significa 2 revoluciones en el cigüeñal [16].

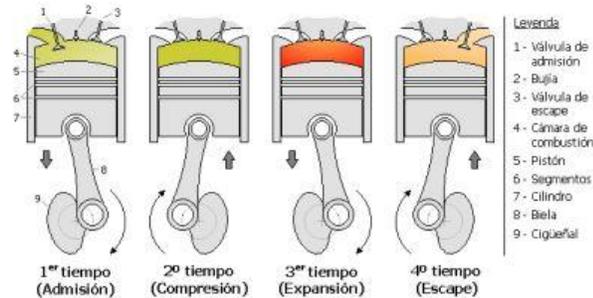


Ilustración 5. Ciclo térmico Motor 4 tiempos.  
Fuente: [16].

### 2.2.1.1 Carrera de admisión:

En este tiempo, el pistón desciende desde el PMS (Punto muerto superior) hacia el PMI (Punto muerto inferior) provocando una depresión que facilita el ingreso de la mezcla estequiométrica aire-combustible hacia el interior del cilindro por medio de la apertura de la válvula de admisión [17].

### 2.2.1.2 Carrera de compresión:

En la carrera de compresión las válvulas de admisión y escape deben ir cerradas y el pistón asciende por acción de la inercia, comprimiendo la mezcla de aire-combustible que se encuentra al interior del cilindro, el pistón recorre desde el PMI hacia el PMS reduciendo el volumen inicial y aumentando la presión y la temperatura de la mezcla [17].

### 2.2.1.3 Carrera expansión:

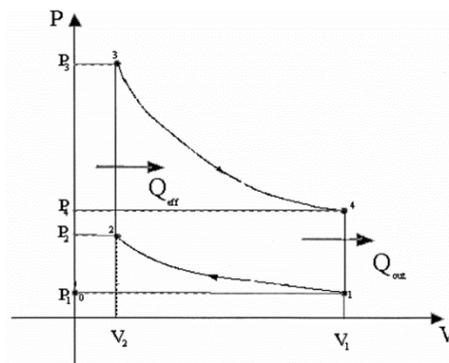
En esta fase, para los motores con ciclo Otto se suministra por medio de un subsistema eléctrico de distribución un alto voltaje a la bujía que se encuentra en

contacto directo con la mezcla comprimida, generando una chispa que se da en los electrodos, permitiendo la ignición del aire-combustible que empuja al pistón por medio de la expansión del volumen, transformando de esta manera la energía química del combustible, en energía mecánica[18].

#### 2.2.1.4 Carrera de escape:

Esta última carrera del pistón da lugar a la liberación de los gases producidos por la combustión. Esto se hace por el paso del pistón del PMI al PMS y por la apertura de las válvulas de escape. El movimiento del pistón impulsa los gases de escape donde gracias a la apertura de las válvulas sale por la tubería al ambiente [18].

El ciclo termodinámico del cual es basado el funcionamiento del motor de cuatro tiempos, es denominado ciclo Otto y se visualiza el comportamiento en el diagrama ideal PV (presión-volumen) de la *ilustración 6*.



*Ilustración 6. Diagrama Ideal Presión Volumen para el ciclo Otto*  
Fuente: [19].

Este ciclo termodinámico ideal se conforma de las etapas que se describen a continuación:

- **Etapa de admisión:** Ocurre del punto 0 a el punto 1, donde se realiza el llenado interno del cilindro dando paso a los gases en un proceso isobárico [19].
- **Etapa de compresión:** Tiene lugar del punto 1 a el punto 2, se caracteriza por comprimir el gas de una forma relativamente veloz sin dejar que haya contacto directo con el ambiente, por lo cual no hay pérdidas de calor y se considera un proceso adiabático [19].
- **Etapa de adición de calor:** Sucede del punto 2 a el punto 3, en este proceso se le adiciona calor ( $Q_{ff}$ ) al gas comprimido, por lo general este calor es adicionado por una bujía mediante el salto de corriente en los electrodos; este proceso al ser ideal no genera desplazamientos por lo cual el volumen permanece constante lo cual se denomina un proceso isocórico [19].
- **Etapa de expansión:** Esta etapa se da del punto 3 al punto 4, donde el gas ideal producido por la adición de calor no realiza un intercambio de energía con las paredes internas del cilindro, convirtiéndose en un proceso adiabático [19].
- **Etapa de Liberación de calor:** Ocurre de punto 4 al punto 1, mediante la rápida salida de las emisiones generadas del interior del cilindro por el conducto de escape, lo cual genera la liberación de calor ( $Q_{out}$ ) en un proceso isocórico [19].
- **Etapa de escape:** Se presenta del punto 1 al punto 0, por medio del desplazamiento del pistón desde el PMI al PMS para expulsar las emisiones que están presentes al interior del cilindro por lo que la presión se mantiene constante, por lo cual se conoce como un proceso isobárico [19].

### 2.2.2 Ciclo real del motor de combustion interna por encendido probocado.

El ciclo de Otto real, que se aprecia En el diagrama de la *ilustración 7*, se logra apreciar de color rojo el comportamiento aproximado que presenta un motor de cuatro tiempos en la realidad, determinando que los procesos que son adiabáticos

en el ciclo ideal, en el ciclo real esos procesos son isentrópicos, además en los ciclos de adición y liberación del calor, el volumen no se mantiene constante. Estas variaciones se presentan por la distribución del sistema [20].

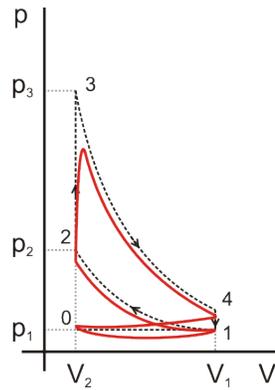


Ilustración 7. Ciclo de Otto real.  
Fuente: [20].

En el funcionamiento real de motor, se presentan variaciones en las aperturas y cierre de las válvulas, como se aprecia en el diagrama de distribución en la ilustración 8 [21].

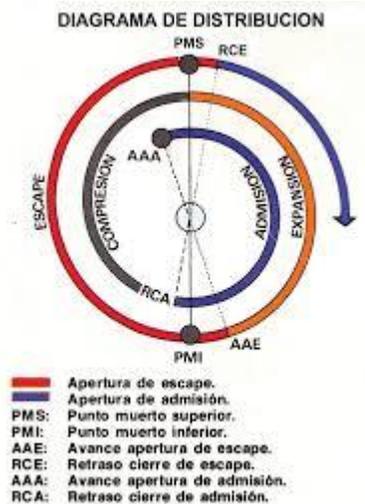


Ilustración 8. Diagrama de distribución, Ciclo real del motor Otto.  
Fuente: [21].

**2.2.2.1 AAA Avance de la apertura de la admisión:** En este punto, la válvula de admisión empieza a abrir a  $18^\circ$ , antes de que el pistón alcance el PMS, consiguiendo de esta forma el beneficio de la inercia de los gases aspirados

generando la entrada de una mayor cantidad de flujo masico en el interior del cilindro, así como limpiar los gases quemados [21].

**2.2.2.2 RCA Retardo al cierre de admisión:** Se presenta a  $57^\circ$  donde el pistón en su carrera descendente al llegar al PMI, aprovecha la inercia de los gases que están ingresando al interior del cilindro, que sigue introduciéndolos aun cuando el pistón ya inicia su acenso en la carrera de compresión [21].

**2.2.2.3 AAE Avance a la apertura del escape:** La válvula de escape no se abre en el PMI exactamente, sino antes de una forma parcial a  $60^\circ$ ; para evitar que se originen fenómenos de choque por los gases procedentes de la combustión [21].

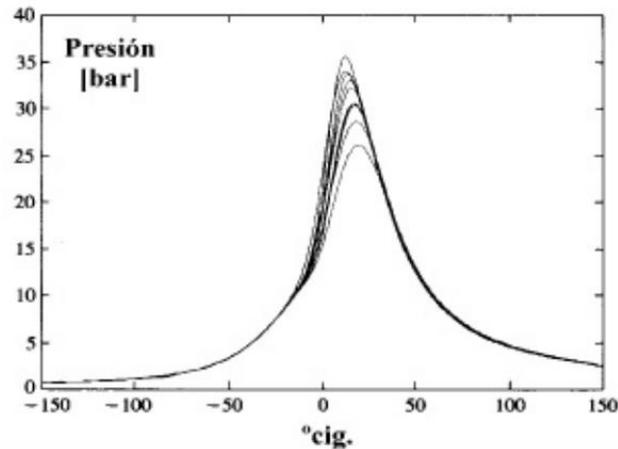
**2.2.2.4 RCE Retraso de cierre del escape:** El pistón al llegar nuevamente al PMS, después de la carrera de escape, los gases continúan saliendo del cilindro, por lo cual es necesario cerrar la válvula de escape 19 grados después de que el pistón alcance el PMS con el objetivo de evitar que al interior del cilindro queden residuos de gases [21]

### **2.2.3 Combustión y fenómeno de detonación en motores de encendido provocado.**

Dentro de la cámara de combustión de los motores de encendido provocado, la ignición de la mezcla aire-combustible se genera por un agente externo el cual en la mayoría de los casos es el sistema de encendido eléctrico mediante la bujía, produciendo la incineración en un pequeño volumen el cual se propaga de forma constante por toda la cámara de combustión [22].

La dispersión cíclica es la diferencia entre ciclos del motor que se presenta en el funcionamiento de los MEP, según el autor F. Payri no es una anomalía de acuerdo con lo presentado en el libro “Motores de combustión interna alternativos” [23]. En

la *Ilustración 9* se puede observar el cambio de presión en la cámara mediante la variación del ángulo girado por el cigüeñal para distintos ciclos de un motor en condiciones iguales de carga y funcionamiento.



*Ilustración 9. Diferencia entre ciclos del motor.  
Fuente: [22].*

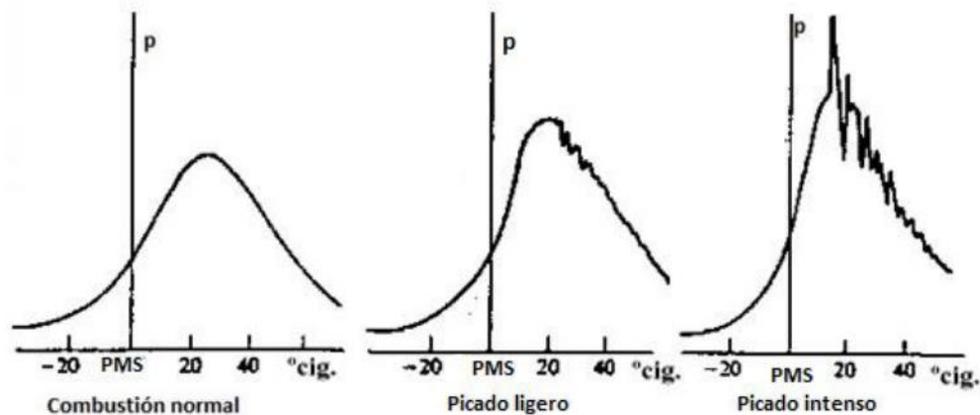
La diferencia entre ciclos del motor es generada por la relación aire-combustible y la turbulencia del fluido que se presenta en la zona del alrededor de la bujía causando variación en la velocidad de la combustión.

A medida que avanza la ignición de la mezcla en la combustión habitual se presenta un aumento de presión a causa de que los productos generados ocupan un mayor volumen en comparación con los reactivos, por ende también se presenta un aumento en la temperatura por el incremento de presión en la masa de la mezcla que aún no ha sido incinerada [22].

La combustión que no es habitual es generada por la autoinflamación del combustible y se desarrolla porque parte de la mezcla combustible-aire se auto enciende antes de que la alcance el frente de llama, por lo cual a este fenómeno se le denomina detonación [22].

Cuando se presenta el autoencendido de la mezcla internamente en la cámara de combustión provoca un aumento repentino de temperatura y presión en el área que se produce generando una onda de choque que se propaga a velocidad del sonido y produciendo un ruido característico en virtud de la onda de presión denominado picado de biela [22].

En la *Ilustración 10* se evidencia la desigualdad en el proceso de combustión, demarcando mediante una línea perpendicular con respecto a los grados del cigüeñal el punto muerto superior [22].



*Ilustración 10. Desigualdad de Combustión, graficas de presión y cigüeñal. Fuente: [22].*

Las consecuencias de que en un MEP se presente el autoencendido del combustible es que por la onda de presión se genera fisuras y ruptura en la capa límite térmica que protege las paredes metálicas de la cámara a causa de que se crea una zona de transición de temperaturas, la cuales pueden llegar a superar los 2000 K generando una fusión del material [22].

En la *ilustración 11* se visualiza un pistón que fue expuesto trabajo forzado donde sufrió a casusa del autoencendido del combustible, picado de biela y sobrecargas mecánicas y térmicas.



*Ilustración 11. Daño producido por detonación en un pistón.  
Fuente: [22].*

#### **2.2.4 Variables que afectan la aparición de la autoinflamación en la combustión.**

Mediante el proceso de combustión, el tiempo de retraso juega un papel fundamental ya que favorece que haya detonación [23], por lo cual se presenta la siguiente lista de los principales factores que influyen para el desarrollo de este fenómeno:

- Alto grado de carga: Por un dosado próximo al estequiométrico ligeramente rico y el incremento de temperatura.
- Mayor avance de encendido: El ángulo de avance de la chispa al ser superior respecto al PMS, generara que se haya incinerado mayor cantidad de combustible antes de que el pistón suba completamente causando a su vez elevación de presión y temperatura.
- Alta temperatura del refrigerante.
- Alta relación de compresión por el incremento de presión y temperatura.
- Mayor temperatura y presión ambiente.

De igual forma, los principales factores que ayudan a mitigar el picado de biela son los siguiente:

- Alto régimen de giro: Se incrementa internamente la turbulencia y se reduce el tiempo de transferencia de calor.
- Mayor Turbulencia: Ayuda a mejorar la propagación de la llama y reduce el riesgo de autoencendido.
- Mayor humedad ambiente: Permite que la temperatura de la combustión sea más baja al igual que reduce el dosado.
- Menor recorrido de frente de llama: Reducción de las dimensiones de la cámara de combustión e implementación de un mayor número de bujías para disminuir el tiempo en que la llama llega a toda la cámara.
- Mayores Pérdidas de calor [22].

### **2.2.5 Avance y retraso de chispa:**

El avance y retraso del encendido se da cuando la chispa aparece con adelanto en ángulos y tiempo. Generalmente en los motores de combustión interna a gasolina se observó mediante pruebas experimentales buscando el máximo par denominado como centrado de la combustión o MBT (mínimum spark advance for best torque) y se halla muy cerca del límite de autoencendido.

Las pruebas realizadas se basaron en los datos suministrados por el analizador de gases debido a que al variar el ángulo de encendido altera la magnitud de los componentes químicos. Con el uso de los analizadores se logra verificar los residuos de la combustión tanto los del GLP como los de la gasolina.

El avance se da en grados y se varia para analizar los cambios que presentan los parámetros del motor. Este avance va de la mano con el nivel de octanos en el combustible ya que entre mayor sean estos, mayor es el avance [24].

El GLP extraído en Colombia presenta 110 octanos, mientras que la gasolina corriente tiene 83 octanos.

### 2.2.5.1 Tipos de avance de encendido:

- **Avance de encendido electrónico:** Este tipo de avance funciona por medio de la electrónica gracias a la implementación de computadoras y sensores que registran varias variables para elegir el momento apropiado para mandar la chispa de encendido y de esta forma garantizar una combustión óptima [24]. El motor monocilíndricos presenta este tipo de avance de encendido por medio un sensor CKP y un módulo eléctrico.
- **Avance de encendido por vacío:** Es un sistema clásico, el cual ajusta el avance de encendido dependiendo de la cantidad de aire que recibe el motor, donde al haber un menor ingreso de aire se demora en realizar la combustión, por lo cual necesita producir un poco antes la chispa para aprovechar de forma correcta la combustión [24].
- **Avance de encendido centrífugo:** Este sistema se caracteriza por depender de las revoluciones por minuto (RPM) del motor mediante el giro de pesos centrífugos o platinos, donde el elemento en el que están ubicados por fuerza centrífuga se desplaza hacia afuera, de esta forma cuanto más rpm trabaje el motor, el sistema más debe anticipar el encendido de las bujías para que el combustible se queme en el momento adecuado [24].

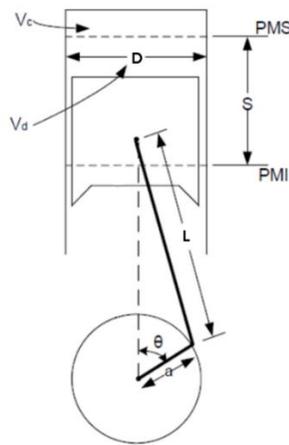
### 2.2.6 Parámetros básicos de Motores de combustión interna alternativos.

Después de la creación de los motores de combustión interna alternativos (MCIA), en muchos países se han llevado investigaciones acerca de es esta máquina térmica con el fin de mejorar el rendimiento de operación, por lo cual en el momento de la fabricación se debe tener en cuenta los parámetros básicos que se clasifican

en 3 tipos, los parámetros geométricos, de funcionamiento, los indicados y efectivos [25].

### 2.2.7 Parámetros geométricos.

Este tipo de parámetros se encarga de caracterizar geoméricamente las dimensiones de las principales partes de un motor como se muestra en *ilustración 12* las cuales son las dimensiones del cilindro, el sistema de renovación de carga y el mecanismo biela-manivela [25].



*Ilustración 12. Esquema de un motor de combustión interna alternativo.*  
Fuente: [25].

#### 2.2.7.1 Diámetro del cilindro.

El diámetro del cilindro representado en la *ilustración 12* con la letra  $D$ , recibe también el nombre de calibre, sus dimensiones deben ser ligeramente superiores a las del pistón con el fin de minimizar el rozamiento de estas dos partes, no obstante, en la mayoría de los cálculos se toma el valor del diámetro del cilindro como un valor representativo entre el cilindro y la sección del pistón. Es uno de los parámetros que caracteriza de una mejor forma el tamaño de un motor. [25].

### 2.2.7.2 Carrera del pistón.

La carrera del pistón se representa en la *ilustración 12* con la letra  $S$ , y es el recorrido que realiza el pistón dentro del cilindro entre dos posiciones denominadas puntos muertos, el punto que se encuentra ubicado a una mayor cercanía de la culata recibe el nombre del punto muerto superior (PMS), y el punto que está más alejado, recibe el nombre de punto muerto inferior (PMI). Conociendo la longitud de la manivela ( $l$ ), es posible calcular la carrera con la siguiente ecuación [25].

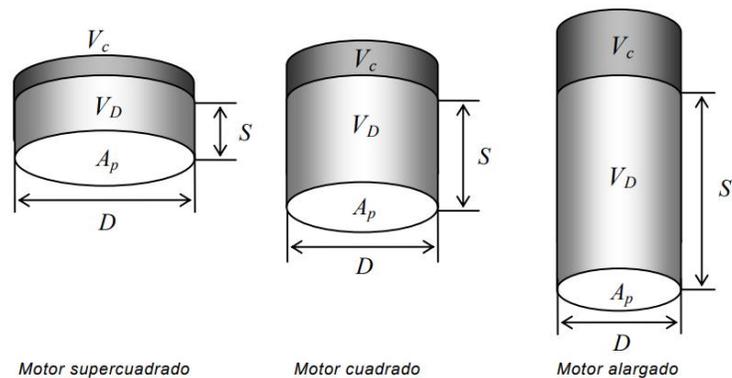
$$S = 2l \text{ Ecu. 1}$$

### 2.2.7.3 Relación carrera-diámetro.

La relación que existe entre el diámetro del cilindro y la carrera del pistón ( $S/D$ ) es un parámetro que permite la clasificación de los motores en 3 tipos, supercuadrados, cuadrados, y alargados como se muestra en la *ilustración 13*, según el resultado numérico de la relación ( $S/D$ ) sea menor, igual o mayor que la unidad como se ve en la *Tabla 1* [25].

*Tabla 1. Ventajas e inconvenientes de cada tipo de motor según la relación S/D.*  
Fuente: [25].

Denominación	S/D	Ventajas	Inconvenientes
Súper cuadrados	<1	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mucho espacio para el número de válvulas.</li><li>• Pueden girar a altas revoluciones.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cámara poco compactada.</li><li>• Muchas pérdidas de calor.</li></ul>
Cuadrados	=1	Las bielas son más cortas.	Cigüeñal robusto.
Alargados	>1	Cámara compacta.	No puede girar muy deprisa.



*Ilustración 13. Comparación entre cilindros de distinto  $S/D$ , con la misma cilindrada e igual relación de compresión volumétrica.  
Fuente: [26].*

#### **2.2.7.4 Longitud de la manivela.**

Es el elemento que se articula con la biela en un extremo, la muñequilla, de la que recibe los esfuerzos que, ejercidos a causa de la expansión de gases, y en el extremo contrario transmite el torque al eje cigüeñal por lo cual permite la transformación del movimiento de translación y rotación de la biela en un movimiento circular en torno al eje cigüeñal [26].

#### **2.2.7.5 Longitud de la biela.**

Es el elemento que transmite el trabajo obtenido por la expansión de gases desde el embolo hasta el cigüeñal, sus dimensiones deben ser lo más cortas posibles para reducir la altura del motor, en la *ilustración 12* se representa como  $L$ . [26].

#### **2.2.7.6 Sección del pistón.**

La sección transversal del pistón debe ser un poco menor que el diámetro del cilindro, el área transversal del pistón sirve para determinar factores como la presión ejercida y la cantidad de válvulas que se pueden adaptar [26].

### **2.2.7.7 Cilindrada unitaria.**

Es una relación del volumen desplazado por el pistón y la carrera recorrida por el mismo desde el PMI hasta el PMS, denominándose cilindrada unitaria [26].

### **2.2.7.8 Relación de Compresión.**

Es el número que representa la medida del número de veces que es mayor el volumen que ocupa la mezcla al final de la admisión, respecto al volumen final de la compresión, por lo cual si se aumenta el volumen del cilindro, la relación de compresión aumenta pero si solo se aumenta el volumen de la cámara de compresión, la relación de compresión disminuirá [26].

$$R_c = \frac{V_u + V_c}{V_c} \text{ Ecu. 2}$$

Donde  $R_c$  es la relación de compresión,  $V_u$  es el volumen unitario y  $V_c$  es el volumen de la cámara de compresión

### **2.2.8 Parámetros de funcionamiento.**

Los motores de combustión interna alternativos (MCIA) vienen diseñados de tal forma que presentan un amplio rango de variación que les permite adaptarse a las condiciones de operación, por lo cual los parámetros de funcionamiento precisan las condiciones de trabajo del motor a partir de variables que pueden medirse de manera experimental o de forma en que el sistema de control registra las señales de los sensores para poder fijar el punto de funcionamiento deseado en el motor [26].

### 2.2.8.1 Régimen y velocidad lineal media del pistón.

El régimen de giro o velocidad angular del motor  $n$  es la cantidad de revoluciones por unidad de tiempo, dato que permite determinar la frecuencia de repetición de ciclo de operación.

Por los diferentes tipos y tamaños de los motores alternativos que existen, el rango de régimen de giro es bastante amplio como se muestra en la *Tabla 2*, por lo que se debe utilizar la velocidad lineal media del pistón entre los puntos muertos. Teniendo en cuenta que el pistón recorre dos carreras (s) por revolución y se utiliza la siguiente ecuación [26].

$$C_m = 2Sn \text{ Ecu. 2}$$

*Tabla 2. Valores máximos habituales de régimen y velocidad lineal media de pistón.  
Fuente: [26].*

Motor MEP	n (rpm)	$C_m$ (m/s)	Motor MEC	N (rpm)	$C_m$ (m/s)
Competición (F1)	18000	25	Automóvil	5000	15
Motocicletas 4T	13500	19	Industrial/ Vehículo pesado	2200	13
Automóvil	7500	20	2T gran tamaño	200	8
2T pequeño tamaño	20000	19			

### 2.2.8.2 Grado de carga.

Es una relación entre lo que proporciona el motor y lo máximo que puede dar. Por lo general se suele aplicar al torque en el eje, a la potencia e incluso al caudal de combustible. Respecto a la potencia, es la proporcionada por medio de unas

condiciones de operación, comparado con el máximo posible del motor al régimen de trabajo, para determinar el grado de carga se utiliza *Ecuación 3* [26].

$$\alpha = \frac{N_e}{N_{e,max}} \quad \text{Ecu. 3}$$

Donde  $\alpha$  representa el grado de carga,  $N_e$  representa el torque obtenido  $N_{e,max}$  es el torque máximo a ese régimen.

La regulación del grado de carga se calcula de manera distinta dependiendo el tipo de motor estudiado:

- **MEC:** Para identificar el grado de carga se debe conocer la cantidad inyectada más o menos de combustible, esto modifica la calidad de la mezcla cambiando la relación entre la masa del combustible y el aire, es por lo tanto una regulación cualitativa, de esta manera se define el grado de carga en MEC por el coeficiente de gastos de combustible, expresada por la siguiente ecuación [26].

$$\alpha = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_{f,max}} \quad \text{Ecu. 4}$$

Donde  $\alpha$  representa el grado de carga,  $\dot{m}_f$  representa el flujo de combustible obtenido y  $\dot{m}_{f,max}$  es el flujo de combustible máximo a ese régimen.

- **MEP Convencionales:** Mediante el cierre de la válvula mariposa en el cuerpo de admisión, el consumo de mezcla admitida disminuye, generando una caída de presión mientras que la temperatura se mantiene constante, definiendo el grado de carga en estos motores por medio de la siguiente ecuación[26].

$$\alpha = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{a,max}} \quad \text{Ecu. 5}$$

Donde  $\alpha$  representa el grado de carga,  $\dot{m}_a$  representa el flujo másico de aire registrado y  $\dot{m}_{a,max}$  es el flujo de másico de aire máximo a ese régimen de operación.

- **MEP de mezcla estratificada:** Principalmente se regula la carga de manera distinta a las condiciones de trabajo. El control del grado de carga en estos motores cuando son sometidos a cargas bajas y medias es similar a los MEC, pero cuando es sometido a alta carga, la mezcla es homogénea y opera como un MEP convencional [26].

### 2.2.8.3 Gasto de aire y rendimiento volumétrico.

El gasto de aire es la cantidad de masa que circula en unidad de tiempo (flujo másico), en el transcurso de circulación de este aire se le puede agregar combustible durante el proceso de admisión, o de igual forma recircular los gases de escape recibiendo el nombre de EGR (recirculación de gases de emisión).

Parte del gasto del aire se puede dar en el tiempo de admisión y en el de escape, ya que, en motores con elevado cruce de válvulas o por sobre presión en la admisión con respecto al escape se pierde una cantidad determinada de aire limpio denominado este efecto como cortocircuito [26].

En la operación de los motores de dos tiempos es fundamental que se de este efecto, porque, si no hay cortocircuito, la masa de aire admitida por cilindro y ciclo evoluciona al interior del motor al cerrar las válvulas o lumbreras de admisión, de igual manera hay que tener en cuenta que hay que añadir los gases que puedan quedar en el interior del cilindro del ciclo anterior, donde el pistón en el PMS no corre todo el volumen.

La capacidad de aspiración de un motor está cuantificada por la cilindrada total, se puede llenar con la densidad del aire del lugar donde se aspira el motor, para evaluar la eficiencia de este proceso se define un parámetro adimensional nombrado rendimiento volumétrico que es el gasto medio dividido por el gasto de referencia del motor [26].

$$\eta_{v} = \frac{\dot{m}_{real}}{\dot{m}_{ref}} \text{ Ecu. 6}$$

Donde  $\eta_v$  representa la eficiencia volumétrica,  $\dot{m}_{real}$  representa el gasto medio que admite el motor y  $\dot{m}_{ref}$  representa el gasto de referencia.

#### **2.2.8.4 Gasto de combustible y poder calorífico.**

Los motores trabajan mediante el proceso de combustión, donde liberan la energía contenida en los enlaces químicos en forma de energía térmica, causando una expansión en el interior del cilindro y de esta forma genera el trabajo mecánico, por lo cual es necesario conocer la cantidad de energía liberada si se hace la suposición de una combustión completa y perfecta, se puede calcular como el producto del gasto de combustible y el poder calorífico del combustible, que es la cantidad de calor liberada por unida de masa del combustible, el cual es medido en un dispositivo denominado calorímetro, por lo tanto la ecuación quedaría de la siguiente manera [26].

$$\dot{Q}_{lib} = \dot{m}_f PCI \text{ Ecu. 7}$$

Donde  $\dot{Q}_{lib}$  es la potencia térmica liberada,  $\dot{m}_f$  es el gasto de combustible y  $PC$  es el poder calorífico del combustible.

En el proceso de combustión, se suele generar moléculas de agua que posee un elevado calor latente de vaporización, generando dos poderes caloríficos:

- Poder calorífico superior (PCS): se produce cuando los gases producto de la combustión se encuentran a una temperatura inferior a la de la condensación, por lo cual se asume que el agua formada durante la combustión condensa totalmente, logrando que el calor latente de vaporización se encuentre disponible para ser utilizado [26].
- Poder calorífico inferior (PCI): sucede cuando el agua que proviene de la oxidación del combustible no condensa, de esta forma no es posible liberar el calor latente de la molécula de agua [26].

En los combustibles para poder conocer el poder calorífico, se debe conocer su composición química, en la *Tabla 3* se muestran el poder calorífico inferior en algunos combustibles habituales.

*Tabla 3. Valores del poder calorífico inferior de combustibles comunes.  
Fuente: [26].*

Combustible	H <sub>2</sub>	Gas natural	Propano	Gasolinas	Gasóleos	Fuel-oíl	etanol
PCI [MJ/kg]	121	45-47.7	46.4	42.7-43.5	42.5-43	>39.7	26.9

Por lo general, las aplicaciones del PCI (Poder Calorífico Inferior), están expresadas en unidad de energía por unidad de masa de combustible, pero al momento de trabajar con un gas, la variable realmente significativa puede ser volumen y no la masa por lo cual en la *Tabla 4* se pueden ver los valores de PCI expresados por unidad de volumen [26].

*Tabla 4. Valores de poder calorífico inferior de combustibles comunes a 15°C y 1 atm.  
Fuente: [26].*

Combustible	H <sub>2</sub>	Gas natural	Propano	Gasolinas	Gasóleos	Fuel-oíl	etanol
PCI [MJ/l]	10.3 × 10 <sup>-3</sup>	30.6 × 10 <sup>-3</sup> 32.4 × 10 <sup>-3</sup>	88.6 × 10 <sup>-3</sup>	29-29.6	36-36.4	>37.7	21.2

### 2.2.8.5 Dosado.

El en los motores, la principal fuente de oxígeno es el aire atmosférico el cual se mezcla con el combustible de tal forma que exista una equivalencia estequiométrica generando de esta manera la relación másica entre el aire y el combustible denominándose dosado absoluto [26].

$$F = \frac{m_f}{m_a} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} = \frac{m_{f,cc}}{m_{a,cc}} \text{ Ecu. 8}$$

Donde  $F$  es la relación aire combustible,  $\dot{m}_f$  es el flujo másico de combustible de combustible y  $\dot{m}_a$  es el flujo másico de aire.

Cuando en la combustión, todo el oxígeno y el combustible se queman de forma progresiva sin dejar residuos, se denomina el dosado químicamente correcto o estequiométrico  $F_e$  en la *Tabla 5* se encuentran algunos dosados estequiométricos de diferentes combustibles. Al dividir  $F_e$ , se puede encontrar el dosado relativo de la siguiente manera [26].

$$F = \frac{F}{F_e} \begin{cases} F_r < 1: \text{dosado pobre} \\ F_r = 1: \text{dosado estequimetrico} \\ F_r > 1: \text{dosado rico} \end{cases} \text{ Ecu. 9}$$

El término de dosado rico o pobre, depende del valor de lambda  $\lambda$  que es el inverso del dosado relativo y determina la falta o el exceso de combustible para producir una combustión estequiometria [26].

$$\lambda = \frac{1}{F_r} \text{ Ecu. 10}$$

Tabla 5. Dosado estequiométrico de combustibles representativos.  
Fuente: [26].

Combustible	H <sub>2</sub>	Gas natural	Propano	Gasolinas	Gasóleos	Fuel-oíl	Etanol
Fe	1/34	1/17	1/15.6	1/14.6	1/14.5	1/13.8	1/9

### 2.2.8.6 Presión de admisión.

La presión que se maneja en el cuerpo de admisión  $P_{col}$  es un parámetro importante en el llenado del cilindro, ya que en los motores MEP su reducción permite controlar el grado de carga del motor. Mediante el uso de la sobrealimentación producida por un compresor volumétrico o turbocompresor se incrementa la presión en el colector de admisión, logrando de esta forma aumentar la potencia. Si la temperatura en el colector se mantiene constante, la densidad de la masa de aire que entra a sobrepresión crecerá proporcionalmente, de igual forma se puede aumentar la cantidad de flujo másico de combustible. La  $P_{col}$  permite calcular el grado de sobrealimentación de un motor [25].

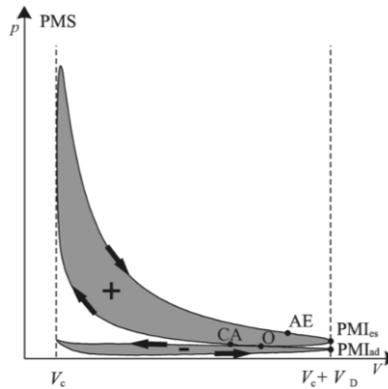
$$P_{col} = \frac{P_{col}}{P_{atm}} \text{ Ecu. 11}$$

### 2.2.8.7 Parámetros indicados y efectivos.

Este tipo de parámetros cumplen la función de caracterizar las prestaciones y emisiones de un motor en parámetros indicados y efectivos en un determinado punto de operación. Los parámetros indicados abarcan lo que ocurre dentro del cilindro, y los efectivos están relacionados con lo que sucede en eje del motor [25].

### 2.2.8.8 Parámetros Indicados.

Este tipo de parámetros también se denominan diagrama de indicador, y en él se analiza la presión instantánea en la cámara en el transcurso del ciclo de trabajo en función del volumen del cilindro como se muestra en la *ilustración 14*.



*Ilustración 14. Ciclo indicado de un motor de cuatro tiempos, mostrando los lazos de alta y baja presión (bombeo). Fuente: [26].*

### 2.2.8.9 Trabajo indicado.

Es el trabajo que se obtiene por la expansión de gases sobre la sección del pistón, viene definido por la integral del lazo de alta presión entre el punto muerto inferior de admisión y el de escape, siendo de esta forma un trabajo positivo.

$$W_i = \int_{PMI_{ad}}^{PMI_{es}} P dV > 0 \text{ Ecu. 12}$$

Donde  $PMI_{ad}$  es el punto muerto inferior de admisión,  $PMI_{es}$  es el punto muerto inferior de escape  $P$  es la presión al interior del cilindro en función del volumen.

#### **2.2.8.10 Potencia indicada.**

Es el producto del trabajo indicado por unidad de tiempo, se puede calcular de forma unitaria por cilindro o a un motor completo donde el trabajo  $W_i$  es la suma de los trabajos indicados de los demás cilindros [26].

$$N_i = inW_i \text{ Ecu. 13}$$

Donde  $N_i$  es la potencia indicada,  $i$  es el tipo de ciclo,  $n$  es el régimen de giro,  $W_i$  la suma de los trabajos de todos los cilindros.

#### **2.2.8.11 Rendimiento indicado.**

Es la relación que hay entre la potencia indicada y desarrollada por el motor, y la potencia térmica de combustible, donde se puede calcular de manera referida a un solo cilindro o calculada en todo el motor, donde la potencia  $N_i$  es la de todos los cilindros [26].

#### **2.2.8.12 Presión media indicada.**

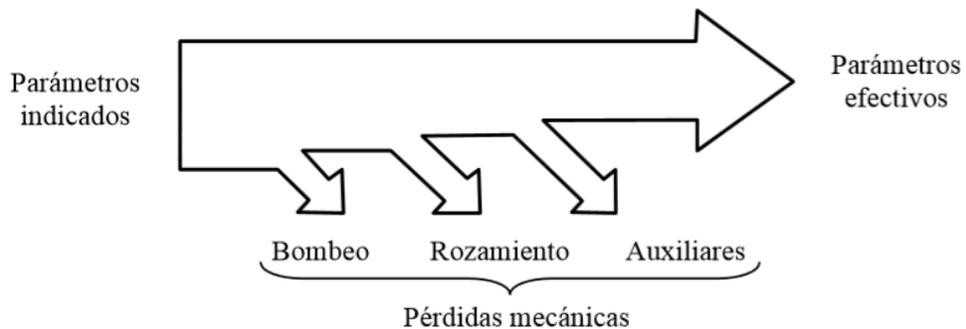
La presión media indicada (PMI) es aquella presión constante que durante una carrera va a producir un trabajo igual al trabajo indicado [26].

$$pmi = \frac{W_i}{V_D} \text{ Ecu. 14}$$

Donde  $pmi$  es la presión media indicada,  $W_i$  la suma de los trabajos de todos los cilindros y  $V_D$  es el volumen desplazado.

### 2.2.8.13 Pérdidas mecánicas.

Mediante la transmisión de la energía obtenido por la combustión, existe una serie de pérdidas de energía como se muestra en la *ilustración 15*, que se dan por el rozamiento de las piezas, por el arrastre de dispositivos esenciales para su funcionamiento y de accesorios, cuyo resultado representa el trabajo efectivo, que es el trabajo obtenido en el eje del motor y es menor que el trabajo indicado [26].



*Ilustración 15. Desglose de pérdidas mecánicas en un motor.  
Fuente: [26].*

### 2.2.9 Trabajo, potencia y presión de bombeo, fricción y auxiliares.

Teniendo en cuenta que la presión de escape suele ser superior a la presión de admisión, el trabajo de lazo inferior es negativo y se denomina trabajo de bombeo, ya que, es un trabajo necesario para la renovación de carga.

En los motores sobrealimentados, por el efecto del compresor, la presión de admisión es mayor que la presión de escape por lo que el trabajo en esta clase de motores es positivo, con la siguiente ecuación es posible determinar el trabajo de bombeo de un cilindro; si se quiere conocer el trabajo de bombeo de todo el motor, se calcula el bombeo en cada cilindro y se suman [26].

$$W_b = \int_{P_{MI_{es}}}^{P_{MI_{ad}}} p \, dV < 0 \text{ Ecu. 15}$$

### **2.2.10 Parámetros efectivos.**

Son los parámetros que abarcan con el estudio del eje del motor, donde incluye el ciclo cerrado, el bombeo y las pérdidas por fricción y auxiliares [26].

#### **2.2.10.1 Par efectivo.**

El par motor ( $M_e$ ) es un parámetro importante ya que indica conocer la capacidad tractora que confiere el motor para accionar los dispositivos para el correcto funcionamiento y auxiliares [26].

#### **2.2.10.2 Potencia efectiva.**

Se calcula teniendo en cuenta el par efectivo que el motor es capaz de entregar en función del régimen de giro  $n$ .

$$N_e = M_e \omega \quad \text{Ecu. 16}$$

$$\omega = 2\pi n \quad \text{Ecu. 17}$$

Donde  $M_e$  es el torque,  $\omega$  es la frecuencia  $n$  es la velocidad angular.

La potencia máxima que un motor es capaz de entregar da una idea de las características y prestaciones de un motor, de esta forma se denomina potencia específica a la potencia máxima por unidad de cilindrada [kW/l] o por unidad de masa [kW/kg]. [26].

#### **2.2.10.3 Trabajo efectivo.**

El trabajo efectivo se calcula restando las pérdidas mecánicas del trabajo indicado o teniendo en cuenta la potencia efectiva [26].

$$W_e = W_i - W_{pm} = \frac{N_e}{in} \text{ Ecu. 18}$$

#### 2.2.10.4 Rendimiento efectivo.

Es una relación entre la potencia efectiva desarrollada por el motor y la potencia térmica del combustible, en la *Tabla 6* se muestran algunos ejemplos de rendimiento que está dada por la siguiente ecuación [26].

$$\eta_e = \frac{N_e}{\dot{m}_f PCI} \text{ Ecu. 19}$$

Donde  $\eta_e$  es el rendimiento efectivo,  $N_e$  es la potencia efectiva desarrollada y  $\dot{m}_f PCI$  es la potencia térmica del combustible.

*Tabla 6. Rendimiento efectivo máximos y consumos específicos (referidos a gasolina y gasoil) de distintos tipos de motor.*

*Fuente: [26].*

Motor MEP	$\eta_e$ [%]	$\&_{ef}$ [g/kWh]	Motor MEC	$\eta_e$ [%]	$\&_{ef}$ [g/kWh]
Motocicletas 4T	32	260	Automóvil (IDI)	35	240
Automóvil	35	240	Automóvil (DI sobrealimentado)	44	190
2T pequeño tamaño	25	335	Industrial/vehículo pesado	47	180
			2T gran tamaño	55	150

#### 2.2.10.5 Rendimiento mecánico.

El rendimiento mecánico es una forma de analizar las pérdidas mecánicas mediante la proporción de trabajo indicado [26].

$$\eta_m = 1 - \frac{W_{pm}}{W_i} = 1 - \frac{N_{pm}}{N_i} \text{ Ecu. 20}$$

### 2.2.10.6 Presión media efectiva.

Es una presión constante generada en el tiempo de expansión la cual produce un trabajo igual al trabajo efectivo ( $pme$ ), y se calcula mediante la siguiente ecuación. En la *Tabla 7* se muestra los valores orientados de la presión media en motores poli cilíndricos [26].

$$pme = \frac{W_e}{V_T} = \frac{N_e}{in V_T} \text{ Ecu. 21}$$

*Tabla 7. Valores orientativos de presión media efectiva máxima de distintos tipos de motor. Fuente: [26].*

Motor MEP	Pme [bar]	Motor MEC	Pme [bar]
Competición	16	Automóvil (IDI)	12
Atmosféricos (4T)	13	Automóvil (DI sobrealimentado)	23
Sobrealimentados	17	Industrial/ Vehículo pesado	23
2T pequeño tamaño	12	2T gran tamaño (sobrealimentado)	20

### 2.2.10.7 Consumo específico.

Otra forma para hallar el rendimiento efectivo se realiza por medio del consumo específico, el cual se define como el consumo de combustible en unidad de tiempo en relación con la potencia producida en motor y se calcula mediante la siguiente ecuación [26].

$$\&_{ef} = \frac{\dot{m}_f}{N_e} \text{ Ecu. 22}$$

En la *Tabla 6* se muestran algunos valores del consumo específico  $\&_{ef}$  en diferentes motores.

### 2.2.10.8 Emisiones.

Para el cálculo de las emisiones en los MCI se presentan los parámetros más habituales.

- El índice  $i$  que es la relación del gasto de la especie contaminante y el gasto de combustible quemado o la masa en el mismo intervalo de tiempo, permite expresar la cantidad contaminante formada por la masa del combustible consumido y se expresa con la siguiente ecuación [26].

$$EI_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_f} = \frac{m_i}{m_f} \text{ Ecu. 23}$$

- Otro parámetro significativo son las emisiones específicas las cuales expresan las emisiones por unidad de potencia efectiva suministrada, se calculan mediante la siguiente expresión [26].

$$EE_i = \frac{\dot{m}_i}{N_e} \text{ Ecu. 24}$$

- Para determinar las emisiones producidas por la combustión se implementa la masa emitida contaminante por unidad de energía liberada por el combustible, obteniendo la siguiente ecuación [26].

$$\frac{\dot{m}_i}{\dot{Q}_{lib}} = \frac{EI_i}{PCI} \text{ Ecu. 25}$$

- Por último, en automóviles ligeros se utiliza la cantidad de contaminante emitida por la distancia recorrida por el auto, para conocer las emisiones generadas y se calcula de la siguiente forma [26].

$$\frac{\dot{m}_i}{L} = EE_i \frac{N_e}{u} \text{ Ecu. 26}$$

- Donde  $N_e$  es la potencia efectiva suministrada por el motor, cuando el automóvil se desplaza a una velocidad  $u$  [26].

### 2.2.11 Técnicas Experimentales.

Las técnicas experimentales desarrollan estatutos y pruebas que sirven de evaluación de parámetros de funcionamiento de estos. Estas pruebas o ensayos se toman teniendo en cuenta el tipo de análisis requerido, el tipo de motor y sus piezas [26].

Estos ensayos a los motores se dividen en cuatro grandes tipos:

- **Ensayos de control de calidad:** Evalúa el acabado del motor, sus partes, la presentación al ser fabricado, todo antes de llegar al consumidor. En este ensayo se da de dos formas distintas dependiendo el número de unidades fabricadas, y valores estipulados por el fabricante. Algunas pruebas llagan a analizar la duración de este y de los elementos que lo acompañan [26].
- **Ensayos de homologación:** Este ensayo se basa en la prueba de las características legales del motor como lo son las emisiones y presentaciones. Estos ensayos son realizados teniendo en cuenta los parámetros dados en las normas internacionales: SAE, DIN, ISO, UNE, etc. La mayoría de las ocasiones se realizan estas pruebas por petición del usuario basándose en la normatividad internacional [26].
- **Ensayo de investigación y desarrollo:** son utilizados para la medición de parámetros teniendo en cuenta el proceso del motor a investigar. Este análisis experimental es de gran complejidad y en la mayoría de las ocasiones de gran intensidad gracias a sus variados análisis [26].

- **Ensayos de combustión:** Una de las características fundamentales de este tipo de ensayo es que debe estar el motor en funcionamiento normal ya sea en régimen estacionario o en régimen transitorio, esto para la obtención de las curvas características del motor y las pérdidas durante cambios de marcha. Estas pruebas reflejan las verdaderas condiciones de funcionamiento del motor [26].
- **Ensayos sin combustión:** Se dan por medio del arrastre gracias a un motor eléctrico para estudiar principalmente las pérdidas mecánicas [26].
- **Ensayos sobre modelos:** Se desarrollan sobre modelos disponibles, similares a las brindadas para el cliente y se dan en condiciones controladas. Uno de los problemas es la poca similitud de resultados con respecto a las condiciones normales para ello se buscan similitudes entre variables estudiadas [26].

### 2.2.12 Transductores.

El transductor es un elemento o conjunto que transforma las señales o magnitudes físicas en una manejable y medibles. Los transductores se dividen generalmente en tres etapas las cuales son:

1. **Etapa de detección (Sonda):** La sonda es un elemento que cuantifica la señal física, este elemento genera una señal mecánica o señal eléctrica a partir del resultado físico [26].
2. **Etapa intermedia (captador):** Se genera en esta etapa la respuesta eléctrica de la señal física para ser analizada con mayor facilidad, esta respuesta inicial debe ser acondicionada para que la señal se lea de manera correcta. Esta adecuación se realiza por medio de amplificaciones o filtrado de datos [26].

3. **Etapa final:** Se controla y almacena la señal generada para su correspondiente estudio [26].

### 2.2.12.1 Medidas en ensayos convencionales de motor.

La realización de una prueba en el motor da como resultado una diversidad de parámetros a medir, teniendo en cuenta lo anterior se da a conocer dos parámetros importantes para la realización de los ensayos en los motores los cuales son:

- Grado de carga.
- Régimen de giro.

Los parámetros específicos son aquellos que no dan información del motor directamente, estos dan características e información sobre el proceso del motor [26].

*Tabla 8. Parámetros específicos.  
Fuente: [26].*

<b>Parámetro por medir</b>	<b>Parámetro derivado</b>	<b>Instrumentación</b>
Par efectivo	Presión media efectiva	Balanza, célula de carga
Régimen de giro	Velocidad lineal medida del pistón, potencia efectiva	Tacómetros ópticos, magnéticos, mecánicos
Consumo de combustible	Consumo específico, rendimiento efectivo	Medidores volumétricos y gravimétricos
Medios: Temperatura  Presión  Gas de aire  Contaminantes gaseosos	Control, determinación del gasto másico de aire  Rendimiento volumétrico	Termopar, termo resistencias, termistor Columna de líquido, captador piezorresistivo Tobera, diafragma, flujo laminar, anemómetro Infrarrojos, quimioluminiscencias, ionización de llama

Partículas		Túnel o mini túnel de dilución. Bosch
Humos		
Instantáneos: Presión	En cilindro: presión media, potencia y rendimiento indicado, rendimiento mecánico, presión máxima. En colectores: gasto instantáneo.	Captador piezoeléctrico, muelle
Angulo de giro	Variación del volumen del cilindro	Captador piezoeléctrico, piezorresistivo Codificador angular óptico, magnético
Humos		Hartridge

#### 2.2.12.2 Medida de gasto de combustible.

La medida de gasto de combustible es muy importante para determinar el consumo específico del motor, para determinar el gasto se mide una cantidad determinada de combustible gastada en un tiempo específico funcionando el motor de manera estable. [26].

En los motores de combustión interna alternativos se recomienda en tiempos de 30 a 60 segundos. Para la medida del gasto de combustible se utilizan generalmente dos métodos:

- **Método gravimétrico:** Determina el tiempo empleado por el motor en consumir una cantidad conocida de combustible almacenado en un depósito medido por una balanza [26].
- **Método volumétrico:** determina el tiempo completo del motor en consumir una cantidad determinada de combustible existente en una probeta aforada.

Esta tarea es muy delicada por la calibración de la balanza o de la probeta y por la nula ausencia tanto de fugas como burbujas de aire en el sistema [26].

### **2.2.13 Medidas de parámetros específicos.**

#### **2.2.13.1 Medida de presión**

Esta variable es fundamental para el control del sistema, es medida en colector de admisión y escape, es importante para la lubricación, inyección y estimación de aire admitido por el motor. En los ensayos de motores estacionarios generalmente se utiliza la medida tanto de presiones medias como presiones instantáneas [26].

Para la medida de presiones medias se utilizan transductores mecánicos que funcionan mecánicamente con muelles, resortes, manómetros, o transductores eléctricos de tipo piezorresistivos, además se utilizan las columnas de agua o mercurio por su simplicidad, costo y auto calibración [26].

- Captador piezorresistivo: se basa en la variación de su resistencia cuando este se deforma por acción de la presión[26].
- Captador piezoeléctrico: se carga eléctricamente gracias a la presión, permiten medir variaciones de presiones relativas.

#### **2.2.13.2 Medida de temperatura**

Esta magnitud física se mide mediante termómetros de mecánicos de líquidos o gas, eléctricos los cuales son termopares, termo resistencias, termistores u ópticos [26].

Esta medida de temperatura en los procesos del motor es una de las más complejas e imprecisas de tomar, para realizar dicha medida se tiene en cuenta la transferencia de calor entre el elemento a medir y el elemento de medida. Por las dificultades al medir estas temperaturas se utiliza la medición por medio de termómetros eléctricos para obtener una medida media; para esta medida se utilizan:

- **Termo resistencias:** Son resistencias metálicas cuyo valor varía linealmente con la temperatura, estas resistencias están hechas de platino, cobre, níquel y wolframio [26].
- **Termopares:** Son los capacitores más utilizados para medir temperatura ya que consisten en la fuerza electromotriz generada por la diferencia de temperatura entre dos terminales, consiste en una unión caliente la cual está en contacto con una fría que se mantiene a una temperatura de referencia [26].
- **Termistores:** se tratan de elementos con alta sensibilidad, los cuales se caracterizan por tener una alta velocidad de respuesta especialmente en tamaños reducidos [26].

### 2.2.13.3 Medida de gasto de aire

Al igual que la medida de temperatura se caracteriza por su dificultad, esta medida es altamente importante ya que el motor es una máquina que trabaja con aire directamente. La exacta dificultad de cuantificación de la masa de ingreso al motor es fundamental para el diagnóstico de la combustión del motor de combustión interna alternativa (MCIA).

El método más simple es hacer fluir el aire por un elemento de medida en el cual se produzcan diferencias de presiones en el fluido las cuales puedan ser medida por transductores. Una de las principales dificultades son las pulsaciones del fluido para evitar esto se emplean amortiguaciones para atenuar estos pulsos [26].

El segundo método consiste en la instalación de un depósito de remanso acoplado a la admisión del motor el cual es capaz de amortiguar las oscilaciones producidas por el proceso de admisión[26].

En la SAE (Sociedad de Ingenieros de Automoción americana) proponen una expresión para realizar el cálculo del volumen de remanso todo en Lt (Litros):

$$Vrem \geq K \frac{Vd}{n \sqrt{\frac{z}{2}}} \text{ Ecu. 27}$$

Donde:

K: 90000 para motores sobrealimentados o 180000 para motores de aspiración.

Vd: cilindrada unitaria en litros.

n: régimen de giro en rpm.

z: Numero de cilindros.

#### **2.2.13.4 Medida de emisiones de escape**

Es una de las variables fundamentales en los ensayos de MCI, para esto se requieren técnicas con mucha precisión y sofisticadas, para esto los instrumentos de medida requieren una calibración y mantenimiento continuo. Los analizadores para medida de gases de escape deben ser muy sensibles para la toma de las pequeñas partículas y evitar la interferencia de otros gases en la muestra [26].

Los gases más importantes al realizar las mediciones en los motores de combustión interna son:

- **Monóxido de carbono (CO):** Es un gas inodoro, incoloro, explosivo y altamente tóxico; Al ser inhalado en el cuerpo humano crea un bloqueo en el transporte de oxígeno por parte de los glóbulos rojos en el sistema sanguíneo. Es mortal, incluso en bajas concentraciones del aire que se respira [27].
- **Hidrocarburos sin quemar (HC):** Son partículas no quemadas del combustible debido a una combustión incompleta por falta de oxígeno (mezcla rica) o por una velocidad relativamente baja en la inflamación de la mezcla (mezcla pobre). Al ser inhalado en el cuerpo humano puede causar irritación en los órganos sensoriales o incluso cáncer como por ejemplo el benceno [27].
- **Óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>):** Es un gas producto de la combinación de nitrógeno y oxígeno el cual se caracteriza por ser incoloro, insípido e inodoro, producido al presentarse una alta temperatura, alta presión y exceso de oxígeno durante la combustión del motor. Al estar expuesto al ambiente, se oxida formándose el dióxido de nitrógeno y tomando un color pardo rojizo, el cual al ser inhalado provoca una fuerte irritación de los órganos respiratorios [27].
- **Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>):** Es una emisión generada al ser quemados los combustibles que contienen carbono, ya que durante esa operación se combina con el oxígeno aspirado obteniendo el CO<sub>2</sub> [27].
- **Oxígeno:** Se genera en la combustión a causa de una mezcla pobre e incompleta [27].

Para las medidas de los principales componentes en los gases de escape se utilizan diversas técnicas las cuales se resumen en:

*Tabla 9 Métodos de medida de emisiones contaminantes  
Fuente: [26].*

Gases	Técnica
CO y CO <sub>2</sub>	Absorción de radiación infrarroja
NO <sub>x</sub>	Quimioluminiscencia Absorción de radiación infrarroja
HC	Ionización de llama Absorción de radiación infrarroja
Partículas	Túnel de partículas
Humos	Humos Bosch Humos Hartridge

Las técnicas mostradas en la anterior tabla son especiales para detectar con mejor precisión la cantidad de gases en la muestra. En este proyecto se empleó un analizador de gases de referencia ETS GASBOX marca Texa el cual trabaja mediante el análisis orsat registrando el CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub> y λ.

#### **2.2.14 Parámetros usuales y normalizados.**

Cuando se estudia un MCI, se deben tener en cuenta algunas características importantes de funcionamiento como lo es el par motor, la potencia y el consumo específico con el fin de saber si el motor es apto para una aplicación detalla. Además, para realizar la comparación de diferentes tipos de motores, se recurre a la correspondiente normalización para evaluar los parámetros enunciados anteriormente en las curvas características [26].

Cuando se realiza la evaluación de los parámetros de salida se presenta aplicaciones como la cogeneración donde se pone en énfasis el calor residual generado por cada proceso de evacuación de calor en el motor, logrando de esta

manera implementar en el análisis curvas líneas de isotermodura de gases de escape, isotermodura del refrigerante entre otras [26].

Los parámetros de entrada de los MCIA permiten describir actuaciones para conocer los intervalos típicos de variación, correspondiente a las condiciones en las que el motor responde de forma adecuada. La principal variable de operación es el régimen de giro, en la cual se suele presentar intervalos amplios de funcionamiento y tiene que ser complementada por el grado de carga para definir las condiciones de operación del motor [26].

### **2.2.15 Variables de operación que afectan a los parámetros de salida del motor.**

En el estudio que se lleva a cabo en los MCIA se presentan las principales variables de operación que afectan el funcionamiento en los diferentes tipos de motores.

#### **2.2.15.1 Variable de dosado.**

En los MEP, se producen variaciones en el dosado que afectan en el funcionamiento del motor, principalmente en el desarrollo de la combustión y sobre el rendimiento efectivo, además, afecta implícitamente las temperaturas tanto de los gases de escape como el agua de refrigeración.

Mediante un balance de energía aplicado a un motor que se muestra a continuación, se obtiene la relación útil para determinar la temperatura del gas ( $T_{es}$ ) de escape, dando respuesta a la dependencia con respecto a parámetros como la temperatura de admisión ( $T_{ad}$ ), el dosado ( $F$ ), el rendimiento efectivo ( $\eta_e$ ) y el flujo de combustible ( $\dot{m}_f$ ), de igual forma se hace la consideración de que las sustancias involucradas se trabajan como un gas perfecto [26].

$$T_{es} \approx T_{ad} + \frac{PCI}{C_{p,es} \left( \frac{1+F}{F} \right)} \left\{ (1 - \eta_e) - \frac{\Delta h_{ci}}{PCI} - \frac{\dot{Q}_{ref}}{\dot{m}_f PCI} \right\} \text{ Ecu. 28}$$

El  $C_{p,es}$  representa el calor específico de los gases en el escape, el  $\dot{Q}_{ref}$  es la potencia térmica evacuada a través del circuito de refrigeración incluyendo las pérdidas mecánicas que se disipan en forma de calor, logrando de esta manera incluir el rendimiento efectivo dentro de la ecuación, el  $\Delta h_{ci}$  representa la pérdida de la entalpía relacionada a una combustión incompleta,  $PCI$  es el poder calorífico inferior del combustible [26].

### 2.2.15.2 Presión y temperatura de admisión.

Una variable importante en el control de carga de los MEP es la densidad del aire que ingresa al cilindro la cual depende de la temperatura y de la presión de admisión que es controlada por la válvula mariposa y mediante el grado de la sobrealimentación, generando de esta manera alcanzar condiciones de operación con presiones de admisión inferiores, iguales o inclusive superiores a la presión atmosférica. Al variar la presión de admisión, provoca alteraciones en la renovación de carga generando cambios de la división de gases residuales y por ende sobre la compresión.

Mediante el rendimiento volumétrico y el rendimiento indicado se puede obtener la información de la relación de la presión de admisión y potencia, o presión de admisión y consumo específico.

Al realizar un estudio en el proceso de renovación de carga se logra encontrar las posibles causas de la variación de la temperatura que se dan por medio de la transferencia de calor desde las paredes del bloque, la evaporización, del combustible y la sobrealimentación en el caso del que el motor este adaptado un turbocompresor [26].

### **2.2.15.3 Régimen de giro.**

El régimen de giro no es un parámetro completamente libre y se define como una variable de operación que depende del acoplamiento entre la potencia que brinda el motor y la resistencia al giro que ejerce el elemento accionado como puede ser la tracción en un automóvil, la hélice en vehículo aeronáutico o marino, o un generador eléctrico de una central térmica, entre otras.

Un MCIA presenta un amplio rango de regímenes de giro con funcionamiento adecuado, en el caso de que el motor alternativo trabaje en un régimen fijo va a depender de las exigencias de la maquinaria arrastrada y si presenta variaciones va a tener influencias significativas sobre la renovación de carga que van a estar reflejadas en el rendimiento volumétrico y sobre la combustión, de igual forma se relaciona con el aumento de fricción que será proporcional con el régimen de giro, provocando un rendimiento mecánico decreciente [26].

### **2.3 Pérdidas de Calor.**

La energía eléctrica que es producida por la unidad electrógena se deriva principalmente por el combustible consumido por el motor donde parte de esa energía se convierte en electricidad y el resto es disipado en forma de calor que se va en los gases de escape y por la transferencia de calor [28], tal como se aprecia en el balance de energía presentado en la *Ilustración 16*.

Donde se visualiza que solo el 30% de la energía entregada por el combustible, es utilizada para la generación de electricidad, un 10% se da en pérdidas de calor, y el 60% de energía restante se pierde por el sistema de refrigeración y por el calor cedido a las emisiones.

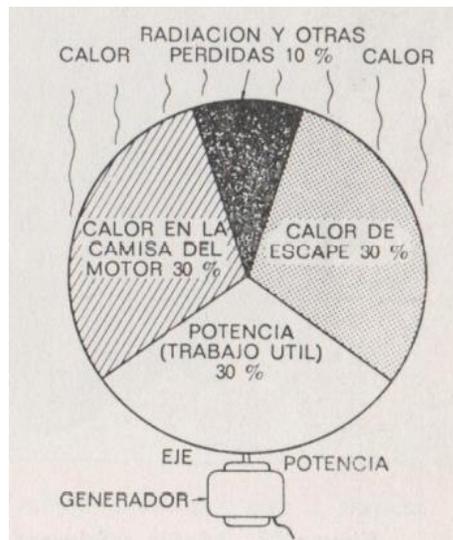


Ilustración 16. Balance de energía.  
Fuente: [28].

Las maquinas térmicas por más eficientes que puedan llegar a ser, siempre van a presentar pérdidas energéticas las cuales se dan principalmente por la transferencia de calor mediante métodos de convección, conducción y radiación.

### 2.3.1 Convección.

Es un mecanismo de transferencia de calor el cual consiste en la presencia de un movimiento masivo de un fluido que cumple la función de entregar o retira energía de un cuerpo que se encuentra en contacto directo con este [29]. Este mecanismo se puede dar de forma natural o de forma forzada.

- **Convección Natural:** Se presenta un flujo proveniente por la diferencia de temperaturas del fluido a causa de la gravedad, donde la densidad de un fluido expone un papel fundamental ya que si se presenta un incremento de temperatura, la densidad del líquido disminuirá debido a que la temperatura es inversamente proporcional a la densidad; pero al momento de atribuirle dentro de un campo gravitatorio la densidad que es alterada por la temperatura desarrolla fuerzas de flotación [30].

- **Convección Forzada:** El fluido en este caso es obligado a transcurrir por medios externos o internos a causa de acelerar la velocidad de la corriente natural del fluido por medio de sistemas de bombeo o la implementación de ventiladores [30].

Para el cálculo de la convección se emplea la ley de Newton de enfriamiento

$$\dot{Q}_{Conv} = hA(T_s - T_{\infty}) \text{ Ecu. 29}$$

El  $\dot{Q}_{Conv}$  es el calor transferido por unidad de tiempo, el  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección, el  $A$  es el área superficial de transferencia de calor, el  $T_s$  es la temperatura de la superficie y el  $T_{\infty}$  es la temperatura del fluido lejos de la superficie.

### 2.3.2 Conducción.

Consiste en la transferencia de energía en cuerpos sólidos debido a vibraciones por medio de electrones libres y en líquidos y gases debido a las colisiones y difusión, donde las partículas mayor cantidad energética transitan hacia las de menor energía como el resultado de la interacción directa entre ellas [29].

Para el cálculo de la convección se emplea la ley de Fourier de la conducción de calor en forma unidimensional

$$\dot{Q}_{Cond} = -kA \frac{dT}{dx} \text{ Ecu. 30}$$

Donde  $k$  es la conductividad térmica o la capacidad para conducir calor que tiene el material,  $dT/dx$  es el gradiente de temperatura,  $A$  es el área superficial de transferencia de calor.

### 2.3.3 Radiación.

Es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los

átomos o moléculas [29]. Este mecanismo de transferencia se caracteriza por ser el más rápido (velocidad luz), donde todos los cuerpos con una temperatura superior al cero absoluto emite radiación.

Para el cálculo de la radiación se emplea la ley de Stefan Boltzmann

$$\dot{Q}_{emitida} = \sigma A_s T_s^4 \text{ Ecu. 31}$$

El  $\sigma$  representa la constante de Stefan Boltzmann que equivale a  $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$  o  $0.1714 \times 10^{-8} \frac{BTU}{h \cdot ft^2 \cdot R^4}$ ,  $A_s$  es el área superficial y  $T_s$  es la temperatura de la superficie.

## **2.4 Unidades electrógenas.**

Es un mecanismo compuesto principalmente por un motor de combustión interna y un generador eléctrico, son denominados de varias formas de las cuales los nombres más conocidos son moto generadores, grupos electrógenos, generadores, centrales electricas o plantas de luz, su función principal es la generación de energía eléctrica para usos en áreas industriales o domésticas [31].

### **2.4.1 Combustibles empleados para las unidades electrógenas.**

La opción para escoger el combustible apropiado para el correcto funcionamiento de los motogeneradores depende de variables como el precio del combustible, el valor económico de mantenimiento, el uso a que se destina; entre otras [32].

Por lo general, el funcionamiento del motor de combustión interna que acciona el generador se da por medio del uso de combustibles fósiles comunes como la gasolina o el Diesel, pero gracias a los avances tecnológicos de los últimos años y las normativas estrictas que abordan las emisiones generadas por los MCIA, se han

empleado combustibles alternativos como el gas oíl, gas natural, gases licuados de petróleo (GLP) y los gases manufacturados [32].

De igual forma hay unidades electrógenas capaces de operar mediante la combinación de combustibles como la gasolina y gas, denominados sistemas bi fuel, dual o de carburación combinada; estos combustibles poseen características diferentes donde la capacidad calorífica que se establece en la *Tabla 10* es uno de los principales parámetros para escoger el carburante apropiado para el óptimo funcionamiento del equipo [28].

Estableciendo que la caloría es la unidad utilizada en el sistema internacional para la medición de la potencia caloría de un combustible, debido a que la caloría representa la cantidad de calor necesaria para poder elevar un grado centígrado la temperatura de un gramo de agua [28].

*Tabla 10. Capacidades caloríficas de diferentes combustibles.  
Fuente: [28].*

Combustible	Capacidad calorífica normal en kcal
Gas manufacturado (de carbón)	4.000 a 7.100 kcal/m <sup>3</sup>
Gas natural	7.600 a 9.800 kcal/m <sup>3</sup>
Gas licuado del petróleo (GLP)	22.300 kcal/m <sup>3</sup>
Gasolina	7.600 kcal/l
Gas-oil	9.300 kcal/l

## 2.4.2 Características del combustible.

Cuando un motor opera con gasolina, el índice de octano determina las condiciones de operación de un motor en relación con el proceso de combustión. El poder calorífico de la gasolina no varía por la cantidad presente de octanos, pero cuando se utiliza combustible con gran cantidad de octanos se debe variar el diseño del motor para aumentar la relación de compresión desarrollando presiones efectivas mayores y consumos específicos menores como se muestra en la *ilustración 17*. Al adicionar aditivos o trabajar con biocombustibles se provoca una variación de las propiedades específicas y afectan el desarrollo de la automatización y evaporación[26].

En la gráfica de la izquierda se evidencia como la relación de compresión depende del número de octanos que presenta un combustible donde a mayor relación de compresión, mayor debe ser el índice antidetonante.

De igual forma en la gráfica de la derecha, se aprecia como el consumo específico de combustible disminuye en relación con el aumento del índice de octano debido a que a mayor número de octano mayor presión media efectiva.

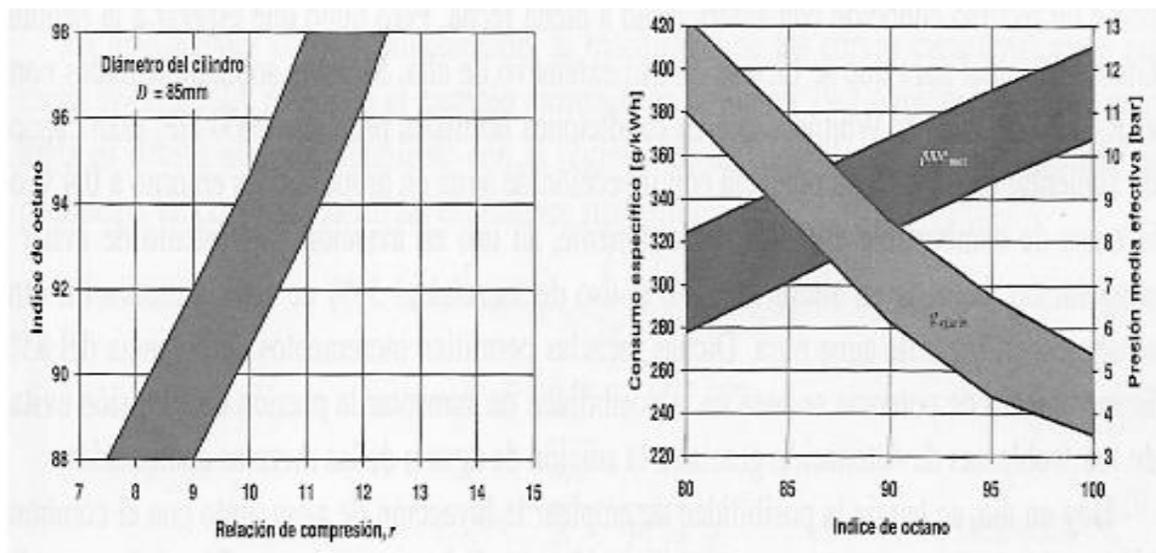


Ilustración 17. Variación de la relación de compresión con el índice de octano (izquierda) y valores del consumo específico mínimo y de la presión media efectiva máxima con el índice de octano (derecha).

Fuente: [26].

### **2.4.3 Índice de Octanaje.**

El parámetro del número de octano también conocido como octanaje es la resistencia que presenta un combustible a la detonación, el cual es calculado mediante una mezcla de iso-octano y n-heptano donde el octano presenta una mayor resistencia a la ignición en comparación con el heptano por lo cual se determina que el porcentaje en volumen del octano en la mezcla que presenta las mismas características detonantes define el número de octano del combustible estudiado [20].

Por ejemplo, al presentar una mezcla que se componga de un 10% de n-heptanos y un 90% de volumen de iso-octano, se afirma que en esa mezcla se presenta un número de octano de 90, por esta razón una mezcla de combustible que presente las mismas características detonantes que la mezcla mencionada anteriormente tendrá el mismo número de octano de 90 [20].

Teniendo en cuenta que hay combustibles que se caracterizan por tener una mayor resistencia a la detonación que el iso-octano, se le estipula un número de octano de 120 a una mezcla compuesta por iso-octano en una cantidad de 0.264 ml/L de tetraetilo de plomo [20].

### **2.5 Gasolina.**

También conocida con el nombre de nafta, es un combustible en estado líquido proveniente de la refinación del petróleo, el cual se compone de hidrocarburos y de octanos que es la resistencia a la explosión, donde en Colombia tiene índice de 80 a 83 octanos [33]. Su principal función es ser utilizada en los motores de combustión

interna de ignición por chispa con relación de compresión de 10:1 [34], y para motores de lanchas, sierras, podadoras, entre otros usos.

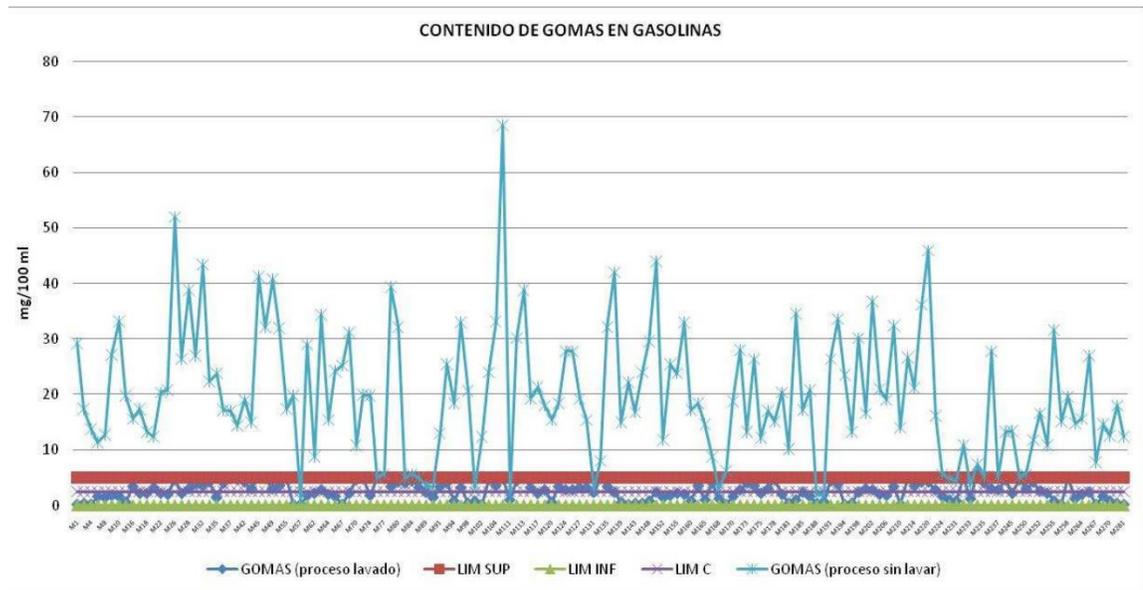
### **2.5.1 Componentes de la gasolina**

Principalmente la gasolina se compone de cadenas de carbonos e hidrógenos, pero también tiene contenido de gomas, azufre, contenido aromático y benceno.

Un estudio de los componentes de la gasolina (corriente y extra), realizado por la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, determinó el contenido de gomas y contenido de azufre obtenidos en 301 muestras muestreadas en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá basadas en las normas ASTM [35].

### **2.5.2 Contenido de Gomas**

Para estas pruebas se basó en la Norma Técnica Colombiana NTC 1380 y el método ASTM D-381. Donde se obtuvo dos resultados diferentes ya que algunas empresas como Terpel S.A., Exxon Mobil de Colombia o Texaco deben adicionar el paquete de aditivos y marcadores, con el fin de realizar el proceso de lavado, pero algunas empresas no cumplen este procedimiento, por lo cual los resultados obtenidos después de realizar el proceso de lavado muestran que todas las muestras cumplen con el estándar de calidad. Mientras que los resultados en el proceso sin lavar son diferentes, ya que se salen en su gran mayoría por fuera de especificaciones [35].



Gráfica 1. Contenido de gomas en gasolina.  
Fuente: [35].

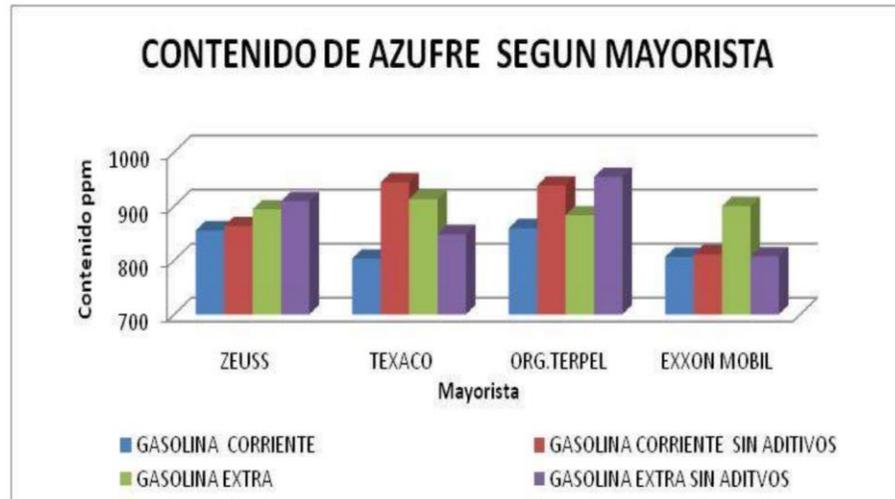
### 2.5.3 Contenido de azufre

Para estas pruebas, se basan en la normativa ASTM D-3227, de igual forma se tienen en cuenta las especificaciones de calidad de contenido de azufre en gasolinas que están basadas en la Norma Técnica Colombiana NTC 1380 [35].

Conociendo de igual forma que si la gasolina presenta un alto nivel de azufre, causa corrosión en las partes internas del motor y, además, al salir al ambiente produce lluvia acida [35].

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que la gasolina corriente tiene un contenido de azufre de 775 ppm, de igual forma la gasolina corriente sin aditivos tiene un promedio de azufre de 895 ppm, las muestras de gasolina extra presentan un contenido promedio de azufre de 876 ppm y para Gasolina extra sin

aditiva de 886 ppm [35]. Al implementar el proceso de hidrogenación, y mezclar el combustible con etanol para disminuir la cantidad de azufre presente en el combustible menores de 300 ppm o 0.03% en masa



Gráfica 2. Contenido de azufre en gasolina.  
Fuente: [35].

#### 2.5.4 Contenido de aromáticos

En la empresa productora de combustibles Ecopetrol realizo un estudio acerca del contenido de aromáticos o RVP (Reid Vapor Pressure) por su sigla en inglés, donde en la gasolina colombiana desde el año 90 cuando se produjo la eliminación del plomo, ha habido una mejora sustancial con la reducción de aromáticos [36].

Consiguiendo pasar de 11.5 a 9 % en el año 1991. En 1993 se logró pasar de 9 a 8.5%, hasta llegar 8% de RVP en 1997. En el 2005, se reguló una adición de Etanol del 10% y, para el 2010, el contenido de aromáticos, para la gasolina regular es de 28% y para la gasolina extra de 35% máximo en volumen. En el año 2009, Colombia

se posiciono en los mejores del mundo; donde la gasolina regular presentaba una cantidad del 20% la gasolina extra un 12.4% y gasolina Premium en 22% [36].

### **2.5.5 Contenido de benceno**

Las pruebas realizadas a las muestras de gasolina para el laboratorio de caracterización y evaluación de crudos del instituto colombiano del petróleo (ICP), demostraron que 79 muestras de gasolina corriente y extra cumplen con el contenido de benceno, según la resolución 1180 de 21 de junio de 2006. Donde la gasolina corriente no supera el 1% vol. Y la gasolina extra no alcanza a llegar a 2% [37].

### **2.5.6 Poder calorífico de la gasolina**

La empresa Gas y Energía S.A. se enfoca en satisfacer las necesidades energéticas, por lo cual trabaja con diferentes tipos de combustibles como el gas natural, Diesel, carbón mineral, gasolina, entre otros. Donde el poder calorífico de la gasolina que contiene de 80 a 83 octanos es de 20000.85 BTU/Lb [38].

### **2.5.7 Propiedades fisicoquímicas**

Para determinar las propiedades fisicoquímicas, se analizó el contenido de oxigenados, mediante la norma ASTM D-5599, Número de Octano de Investigación y Número de Octano del Motor con la norma ASTM D-2699/ ASTM D-2700, Presión de Vapor Reid -PVR- basados en la norma ASTM D-5191, curva de destilación con la norma ASTM D-86 y estabilidad a la oxidación utilizando la norma ASTM D 525 [39].

**Gasolina motor**

PROPIEDADES / CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	MÉTODO	ESPECIFICACIÓN	
			Mínimo	Máximo
Azufre	mg/kg	ASTM D-4294 ó ASTM D-2622		300
Corrosión lámina de cobre, 3 h a 50°C	Clasificación	ASTM D 130		1 (1)
Destilación:	°C	ASTM D 86		
10% vol. evaporado				70
50% vol. evaporado			77	121
90% vol. evaporado				190
Punto final de ebullición				225
Estabilidad a la oxidación a 100°C	minutos	ASTM D 525	240	
Goma existente	mg/100 ml	ASTM D 381		5
Índice de cierre de vapor, ICV	kPa	(2)		98
Índice antidetonante (3)	Octanos	ASTM D-2699 y ASTM D-2700 ó IR (4)	83	
Presión de vapor, RVP (5)	kPa (psia)	ASTM D-5191 ó ASTM D-323		55 (8.0)
Plomo	g/L	ASTM D-5059 ó ASTM D-3237		0,013
Benceno	mL/100 mL	ASTM D-5580 ó ASTM D-3606 ó ASTM D-6729		2
Aromáticos totales	mL/100 mL	ASTM D-5580 ó ASTM D-1319 ó método Plano (ASTM D-6729)		28
Aditivos dispersantes y detergentes (6)	mg/L			

Ilustración 18. Propiedades fisicoquímicas.

Fuente: [39].

## 2.6 GLP

El Gas Licuado de Petróleo (GLP), o también conocido como gas en cilindro o gas propano, es un combustible que proviene de la mezcla de dos hidrocarburos principales: el propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) y el butano (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) y otros en menor proporción. Se encuentra en estado gaseoso a presión atmosférica, pero al someterlo a presiones moderadas, pasa a un estado líquido. Es obtenido de la refinación del crudo del petróleo o del proceso de separación del crudo o gas natural en los pozos de extracción. Los gases que componen el GLP son los productos que se desprenden a lo largo del proceso, quedando libres de azufre, plomo y con bajo contenido de carbono, utilizando el gas como una energía limpia [40].

### 2.6.1 Características del GLP.

El GLP tiene 110 octanos, lo que le da características similares a la gasolina, pero produce menos contaminantes tóxicos como el monóxido de carbono (CO) y el ácido sulfuroso, por lo que ayuda a minimizar la contaminación del medio ambiente. Su poder calorífico supera otros combustibles como el gas natural y los alcoholes derivados de la biomasa, ya que es de 92000 BTU/GALON [40].

Los principales componentes del GLP se determinan mediante la cromatografía de gases, los cuales se visualizan en la *Tabla 11* [41].

*Tabla 11. Características fisicoquímicas del GLP*  
Fuente: [41].

<b>Compuesto (% peso)</b>	<b>GLP</b>
Nitrógeno	0.05
Etano	2.07
Propano	66.65
Iso-Butano	16.32
Butano	14.87
Iso-Pentano	0.04
Total	100.00
Densidad (kgNm <sup>-3</sup> )	2.039
LHV (kJ kg <sup>-1</sup> )	45879

Se debe tener en cuenta que la composición del GLP varía en función del lugar de la extracción, es decir que se puede presentar componentes pesados como pentanos y componentes livianos como los etanos por cual la calidad del GLP que es comercializado depende de las condiciones climáticas y la disponibilidad del sitio donde se realice la aplicación del combustible [32].

Conociendo que el GLP que se trabaja para esta investigación es rico en propano, se debe tener en cuenta que aproximadamente a los -43°C comienza a evaporarse las moléculas del propano, por tal razón son más comunes las aplicaciones con

este combustible gaseoso; De igual manera es de interés conocer que el butano presenta un punto de evaporación por encima de los 5°C, denotando que el butano no se evapora de igual forma que el propano [32].

## 2.6.2 Propiedades fisicoquímicas del GLP.

Mediante los datos establecidos del análisis de cromatografía registrados en la *tabla 10*. Se establecen parámetros como el factor de compresibilidad, el poder calorífico, la densidad al trabajar la mezcla como gas ideal y el peso molar, los cuales son relevantes para los posteriores cálculos y se presentan en la *Tabla 12* [32].

*Tabla 12. Propiedades fisicoquímicas del GLP.  
Fuente: [32].*

<b>Propiedad</b>	<b>Unidades</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Condiciones</b>
Factor de compresibilidad		0.979	0.978	
Poder calorífico superior	$\text{kJ Nm}^{-3}$	101578	104761	A 14.65 psia, 15.6°C
Poder calorífico inferior	$\text{kJ Nm}^{-3}$	93529	96497	A 14.65 psia, 15.6°C
Densidad gas ideal	$\text{Kg Nm}^{-3}$	1,986	2,048	A 14.65 psia, 15.6°C
Peso Molecular	$\text{g mol}^{-1}$	47.19	48.68	

## 2.7 Normatividad Nacional e Internacional para Motores de Combustión interna.

El procedimiento y desarrollo de las pruebas se lleva a cabo mediante lo establecido en las normas nacionales con numeral NTC 2016 y NTC 1930 las cuales establecen los métodos de ensayos para determinar diferentes variables de los motores de combustión interna y las normas internacionales ISO 8528 e ISO 15550 las cuales plantean los métodos de monitoreo de grupos generadores y cálculos de rendimiento de motores reciprocantes de combustión interna.

- **NTC 2016:** Esta norma establece el método que se debe llevar a cabo para el ensayo que permite la determinación de la potencia bruta de los motores de combustión interna [42].
- **NTC 1930:** Especifica un método para ensayar motores diseñados para vehículos automotores donde se aplica a la evaluación de su funcionamiento, principalmente con el propósito de presentar curvas de potencia y consumo específico de combustible bajo carga completa [43].
- **ISO 8528:** Se aplica a los grupos electrógenos accionados por motores alternativos de combustión interna para las instalaciones fijas y móviles con montaje rígido o elástico. Esta normativa es aplicable para uso terrestre y marítimo, donde se excluyen los grupos electrógenos utilizados en aeronaves o los utilizados para propulsar vehículos terrestres y locomotoras [44].
- **ISO 15550:** Establece las variables que se deben monitorear para poder realizar el análisis de comportamiento energético del motor sobre el motogenerador, resaltando que no se cumple estrictamente con las condiciones ambientales de temperatura y presión ya que la prueba se desarrolla en el taller del Centro de Tecnologías del transporte sin condiciones de laboratorio controladas [32].

### 3 Capítulo: Pruebas y Reconocimiento del Equipo.

En este capítulo se describe las partes del banco de ensayos de la Universidad ECCI; además se presenta el plan experimental del proceso de las réplicas desarrolladas basadas en las normativas NTC 2016 y NTC 1930, y los parámetros evaluados para analizar el comportamiento del motor cuando es sometido a pruebas experimentales con combustibles de gasolina corriente y GLP.

#### 3.1 Sitio de Pruebas.

El desarrollo de las pruebas se llevó a cabo en el Centro de Tecnologías del transporte en el municipio de Soacha en la ubicación de la Autopista Sur, Carrera 4 # 53-54, Zona industrial Cazuca, en el costado sur de la autopista sur, tal como se visualiza en la *Ilustración 19*. Ubicado a 2600 metros sobre el nivel del mar con condiciones ambientales de una temperatura ambiente promedio de 17°C, una presión de 75.2 kPa y un promedio de humedad relativa del 65%; según los datos reportados por el instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM).



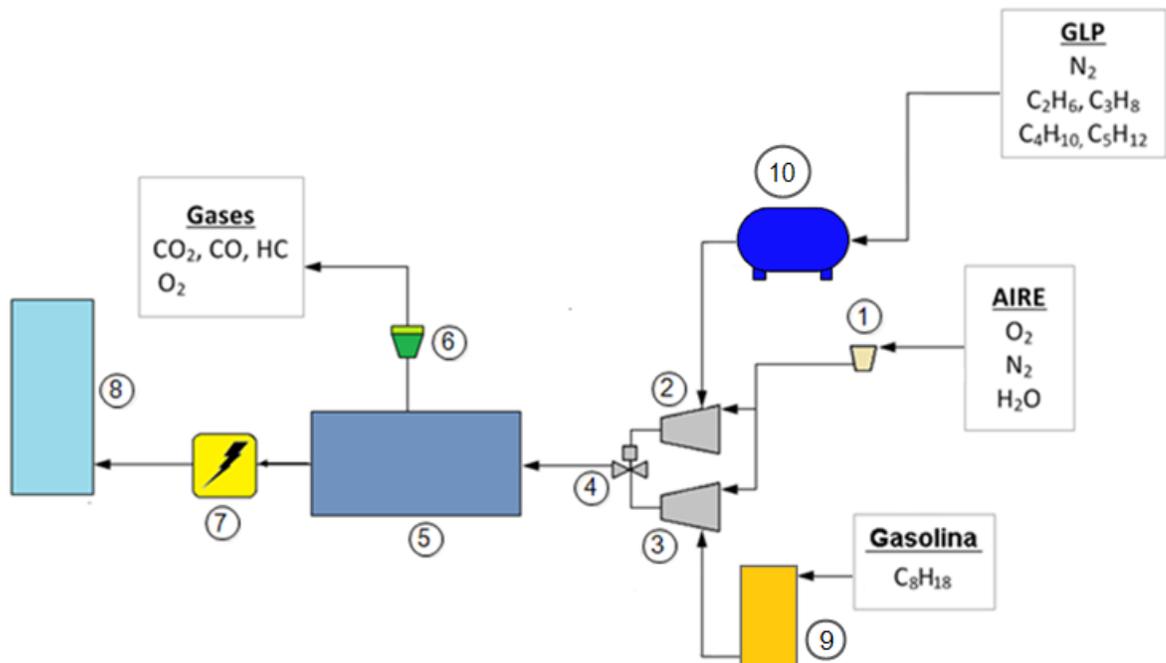
*Ilustración 19. SENA, Centro de Tecnologías del Transporte.*

Fuente:[45].

### 3.2 Partes del Banco de Prueba.

Con el fin de llevar a cabo el desarrollo de las pruebas experimentales para analizar energéticamente el comportamiento del motor mono cilíndrico del banco de pruebas cuando es sometido a trabajar con combustibles como la gasolina corriente y el GLP, se abordó el protocolo de pruebas planteado por las normas NTC 2016, NTC 1930, ISO 15550 e ISO 8528 [32].

A continuación, se presenta el esquema general del montaje del banco de pruebas, tal como se aprecia en la *ilustración 20*, y la descripción de las características de cada uno de los componentes de la unidad electrógena como se aprecia en la *ilustración 21*.



*Ilustración 20. Esquema general del montaje del banco de pruebas.*  
Fuente: Autor.

Tabla 13. Descripción de los elementos del esquema

Fuente: Autor.

N°	Descripción	N°	Descripción
①	Filtro de aire	⑥	Analizador de gases
②	Mezclado de GLP	⑦	Generador eléctrico
③	Carburador de gasolina	⑧	Banco de carga
④	Válvula de control de flujo	⑨	Probeta de Gasolina
⑤	Motor Honda GX 270CC	⑩	Tanque de GLP

### 3.3 Reconocimiento del equipo.

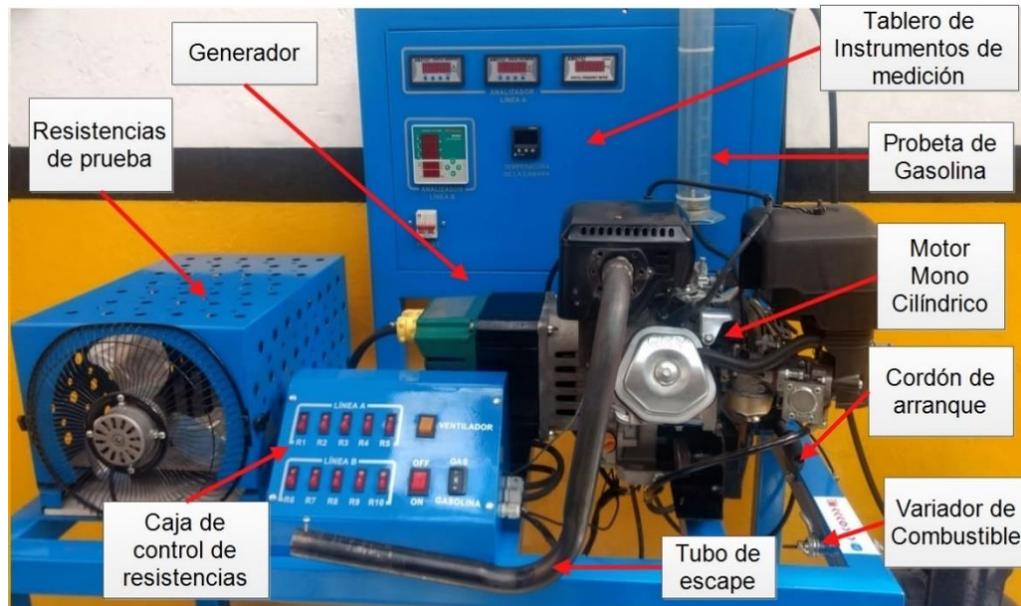


Ilustración 21. Partes del banco de pruebas.

Fuente: Autor.

#### 3.3.1 Tablero de instrumentos de medición.

Presenta las dimensiones de 70 por 73 cm, además de tener instalado internamente analizadores de redes (uno por fase), cada analizador presenta un voltímetro, un amperímetro y un frecuencímetro, así mismo se encuentra un medidor que está conectado a la termocupla.



*Ilustración 22. Tablero de Instrumentos del Banco de Pruebas.  
Fuente: Autor.*

### **3.3.2 Probeta de Gasolina**

Presenta un volumen de 500 centímetros cúbicos fabricada en polimeril de penteno y se emplea como medidor del consumo del combustible de gasolina.



*Ilustración 23. Probeta de Gasolina del Banco de Pruebas.  
Fuente: Autor.*

### 3.3.3 Motor mono cilíndrico

Es la maquina térmica de cuatro tiempos que acciona el generador mediante la combustión de GLP o gasolina corriente, presenta una cilindrada de 270 centímetros cúbicos y una potencia nominal de 9 caballos de fuerza, además de un mecanismo interno para la variación del ángulo de encendido.



*Ilustración 24. Motor monocilíndricos Honda 270GX.  
Fuente: Autor.*

*Tabla 14. Datos técnicos de motor de combustión interna analizado.  
Fuente: Autor.*

Marca	Honda
Modelo	GX 270
Cilindros	Uno, inclinado en 25°
Válvulas	Sobre la culata OHV
Carrera	58 mm
Relación de compresión	8,5:1
Potencia Máxima	9 HP a 3600 RPM
Torque Máximo	19.1 Nm a 2500 RPM
Consumo específico de combustible	2,4 L/h a 3600 RPM

### 3.3.4 Cordón de arranque

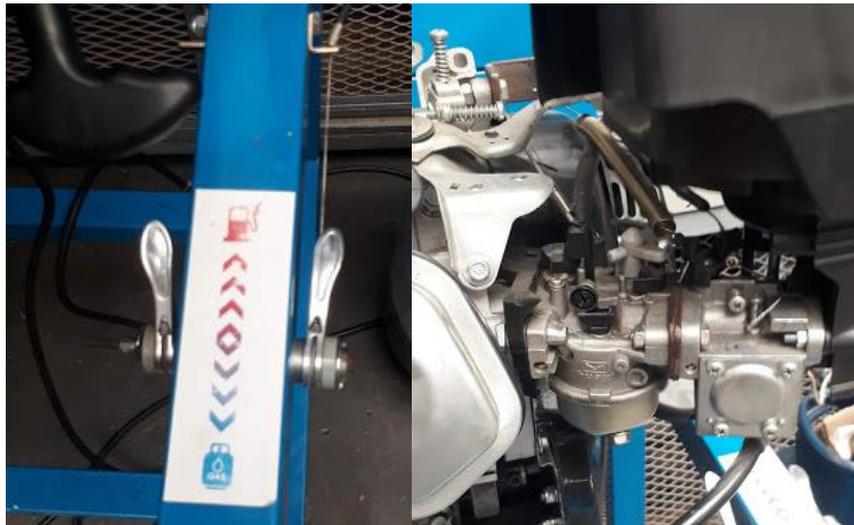
Se utiliza para encender el motor mediante el hale del cordón.



*Ilustración 25. Cordón de arranque de motor monocilíndricos.  
Fuente: Autor.*

### 3.3.5 Variador de combustible

Es la palanca que maneja el choque del carburador y el mezclador para permitir que el motor trabaje con GLP o con gasolina.



*Ilustración 26. Palanca de variador de combustible del carburador y mezclador.  
Fuente: Autor.*

### 3.3.6 Tubo de escape

Conducto donde se eliminan los gases restantes de la combustión.



Ilustración 27. Tubo de Escape de motor de Banco de Pruebas.  
Fuente: Autor.

### 3.3.7 Caja de control de resistencias

En el desarrollo de las pruebas para analizar el comportamiento del generador, se deben aplicar cargas eléctricas de igual magnitud por lo cual la caja de control cuenta con 10 interruptores de neón capaces de soportar 12 Amperios cada uno, y que se emplean para activar o desactivar las resistencias. El generador al tener doble fase, en la caja de control posee dos líneas de interruptores, una por cada fase.



Ilustración 28. Caja de control de resistencias de carga eléctrica.  
Fuente: Autor.

### 3.3.8 Resistencias de prueba

Se utilizan como freno de motor, son diez resistencias, cada una de 400 vatios a 110 voltios que al sumarlas consumen una potencia eléctrica que produce el motogenerador que es de 4000 vatios, están instaladas sobre una lámina de Eterboard con distancias equiláteras de dos filas de 5 cm; para su refrigeración cuenta con un ventilador que regula la temperatura de las resistencias.



*Ilustración 29. Caja de resistencias con ventilación de aire forzado.  
Fuente: Autor.*

### 3.3.9 Generador eléctrico.

Es de marca americana de Maxa 4000, genera un total de 4kV (4000 vatios) a doble fase de 110 – 220 V de corriente alterna, el cual se emplea por las características físicas y técnicas para el desarrollo de las pruebas con los combustibles de gasolina y GLP.



*Ilustración 30. Generador Maxa de 4000 Vatios de corriente alterna.  
Fuente: Autor.*

### **3.4 Evaluación de variables de interés.**

Mediante el análisis del banco de pruebas, se evalúan las variables que alteran el funcionamiento del motor, clasificándolas en tres grupos denominados variables fijas, variables medibles y variables calculadas con el fin de tantear el comportamiento al emplear los dos combustibles estudiados (gasolina y GLP).

#### **3.4.1 Variables Fijas.**

En este grupo se tiene en cuenta las condiciones ambientales suministradas por el IDEAM tales como la temperatura ambiente, presión y humedad relativa donde para condiciones de las réplicas se presenta una tolerancia en la presión de  $\pm 1\text{kPa}$ , para la temperatura ambiente de  $\pm 4^\circ\text{C}$  y en la humedad relativa  $\pm 8\%$ .

#### **3.4.2 Variables Medibles.**

En esta sección entran las variables que son cuantificadas mediante algún instrumento de medición las cuales para el análisis del motor se tomaron el consumo

de combustible, las emisiones producto de la combustión, la temperatura del bloque del motor, la temperatura de las emisiones, el voltaje, amperaje y frecuencia teniendo en cuenta que estos datos fueron registrados en intervalos de 1 minuto hasta llegar a los 5 minutos (300 segundos).

- **Consumo de Combustible:** El consumo de gasolina se midió mediante el método gravimétrico por medio de una probeta la cual está conectada mediante una manguera al carburador. El consumo de GLP se midió mediante un contador conectado a la salida de regulador de presión del tanque de GLP, como se aprecia en la siguiente ilustración.



*Ilustración 31. Banco de Pruebas empleando gasolina y GLP.  
Fuente: Autor.*

- **Emisiones generadas por la combustión:** Los gases producto de la combustión se tomaron a la salida del tubo de escape mediante el analizador de gases ETS GASBOX marca Texa. Tomando las variables en volumen de los componentes CO (%), CO<sub>2</sub> (%), O<sub>2</sub>(%),  $\lambda$  y HC (ppm).
- **Temperatura del bloque del Motor:** La toma de la temperatura del bloque del motor se dividió en nueve partes por cada cara y se midió mediante el uso de un pirómetro.

- **Temperatura de las emisiones:** Esta medida fue registrada empleando un pirómetro digital de marca Kaemeasu con rango de temperatura de -50°C a 1300°C que permitió la toma de la temperatura de las emisiones en la salida del múltiple de escape.
- **Voltaje, amperaje y frecuencia:** Estas variables fueron tomadas gracias al voltímetro, amperímetro y frecuencímetro ubicados en el tablero principal de banco.

### 3.5 Análisis del ángulo óptimo de operación para cada combustible.

#### 3.5.1 Ángulo óptimo para Gasolina.

Para el correcto funcionamiento del motor cuando es operado con gasolina en las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá, se calibraron las válvulas y el huelgo de la bujía según lo recomendado por el manual del fabricante como se aprecia en la *Tabla 15*.

Este proceso consistió en encender la maquina térmica esperando hasta que llegue a temperatura de operación, es decir que el aceite alcance 60°C y el bloque los 92°C, posteriormente se apagó y se retiró la bujía y la tapa de las válvulas para calibrar el huelgo del electrodo y la holgura de las válvulas.

*Tabla 15. Especificaciones de reglaje, Motor Honda GX270.  
Fuente:[46].*

Especificaciones de reglaje GX270		
ELEMENTO	ESPECIFICACIONES	MANTENIMIENTO
Huelgo de bujía	0,7 – 0,8 mm	Consulte la página: 12
Velocidad de ralentí	1.400 ± 150 min <sup>-1</sup> (rpm)	Consulte la página: 13
Holgura de válvulas (en frío)	ADMISIÓN: 0,15 ± 0,02 mm ESCAPE: 0,20 ± 0,02 mm	Consulte a su concesionario Honda autorizado
Otras especificaciones	No se requiere ningún otro ajuste.	

Posteriormente se continuo con el análisis del ángulo optimo mediante la metodología presentada en el diagrama de la *ilustración 32*.

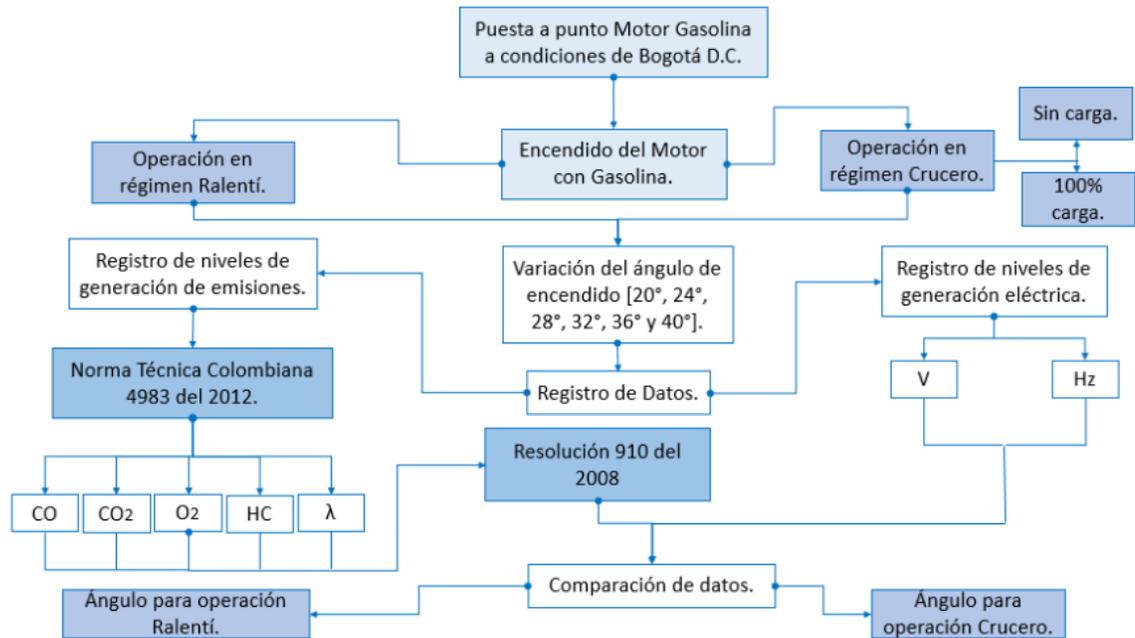


Ilustración 32. Diagrama de selección de ángulo de encendido con gasolina.  
Fuente: Autor.

Mediante la norma técnica colombiana (NTC) 4983 que permite la evaluación de gases de escape de vehículos automotores que operan con ciclo otto, el método de ensayo en marcha mínima (ralentí) y velocidad crucero [47], se llevó a cabo el proceso de medición de emisiones generadas cuando el motor opera a base de gasolina, variando el ángulo de encendido en un intervalo de 20 a 40 grados, con un incremento de 4 grados como se muestra en la *ilustración 33*, de esta forma se evaluaron los resultados mediante la resolución 910 del 2008 [3] Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes terrestres.

De esta forma se registraron los datos dejando trabajar el motor con cada ángulo analizado por un intervalo de 5 minutos y de esta manera se obtuvieron los resultados que se muestran en las siguientes tablas (*Tabla 16, Tabla 17 y Tabla 18*).

Tabla 16. Resultados de prueba en régimen ralentí Gasolina.

Fuente: Autor.

Prueba régimen ralentí Gasolina.								
°	V	Hz	HC (ppm)	$\lambda$	CO (%Vol)	O2 (%Vol)	CO2 (%Vol)	Consumo (ml)
20	90.3	47.8	549	1.08	1.94	6.17	9.38	12.5
24	93.4	48.1	238	1.27	1.11	5.35	12.19	10.5
28	94.1	48.5	152	1.17	1.20	4.31	13.25	7.5
32	90.5	48.2	151	1.17	1.28	4.29	13.32	8.25
36	93.3	47.3	148	1.18	1.19	4.64	13.34	10.0
40	94.0	48.0	154	1.16	1.19	4.02	13.24	10.5

Tabla 17. Resultados de prueba en régimen crucero (3600RPM) gasolina.

Fuente: Autor.

Prueba régimen crucero (3600RPM) Gasolina.								
°	V	Hz	HC (ppm)	$\lambda$	CO (%Vol)	O2 (%Vol)	CO2 (%Vol)	Consumo (ml)
20	76.2	55.00	2450	0.91	6.96	4.13	6.6	15.5
24	122.2	60.21	996	0.91	6.62	3.65	7.7	15.5
28	121.1	60.46	362	0.97	5.54	3.57	8.7	15.0
32	122.0	60.33	309	1,00	4.95	3.67	8.8	15.0
36	122.3	60.49	1132	1.02	4.00	4.23	9.3	15.5
40	121.6	60.44	377	1.05	4.04	4.03	9.7	16.0

Tabla 18. Resultados de prueba en régimen crucero (3600RPM) gasolina con carga 100%.

Fuente: Autor.

Prueba régimen crucero (3600RPM) Gasolina con carga 100%.										
°	V	A	Hz	HC (ppm)	$\lambda$	CO (%Vol)	O2 (%Vol)	CO2 (%Vol)	Consumo (ml)	kW
20	78.30	13.20	59.37	3278	0.46	12.98	5.73	4.29	45.0	1.033
24	79.17	14.12	59.71	1563	0.52	12.64	3.55	4.48	42.5	1.117
28	91.42	14.87	59.87	1238	0.57	12.61	2.84	4.60	42.5	1.359
32	95.37	15.56	60.04	892	0.65	12.47	1.76	4.75	44.0	1.483
36	87.10	15.30	60.10	991	0.64	12.78	1.95	5.23	41.0	1.332
40	82.00	13.10	59.43	1254	0.62	12.21	1.63	4.52	42.5	1.074

Al comparar los datos anteriores con la resolución 910 del 2008 [3], se determinó que el ángulo óptimo cuando el motor trabaja con gasolina es de 28° en régimen de

ralentí, ya que las emisiones de CO y HC se encuentran en los límites establecidos por dicha resolución, tal como se aprecia en *ilustración 33*.

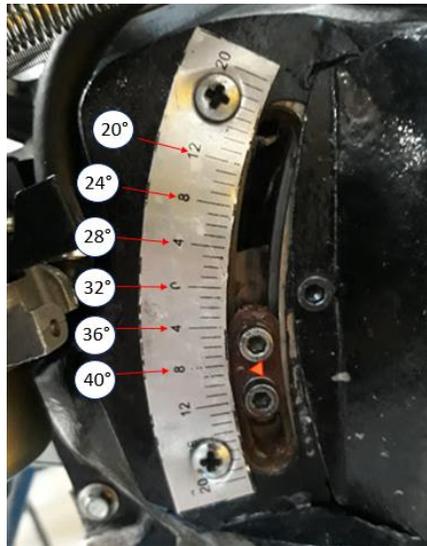
Tabla 1. Límites máximos de emisión permisibles para vehículos accionados con gasolina en velocidad de cruceo y en condición de marcha mínima, ralentí o prueba estática.

Año modelo	CO (%)	HC (ppm)
1970 y anterior	5,0	800
1971 – 1984	4,0	650
1985 – 1997	3,0	400
1998 y posterior	1,0	200

*Ilustración 33. Límites máximos de emisiones permisibles para vehículos accionados con gasolina en velocidad de cruceo y en condición de marcha mínima, ralentí o prueba estática. Fuente: [3].*

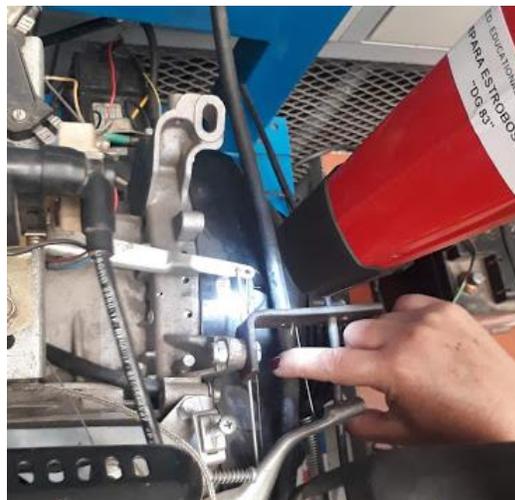
De igual forma trabajando el motor a régimen de cruceo con una velocidad angular constante de 3600 RPM se determina que el ángulo óptimo para trabajar el motor es de 32° en gasolina, ya que los resultados obtenidos mostrados en la *Tabla 17* y *Tabla 18*, establecen un valor de lambda de 1 en la prueba sin carga y se obtiene una mayor potencia eléctrica en la prueba con carga al 100% disminuyendo las emisiones de HC y CO, en comparación con los otros datos registrados, consiguiendo con este ángulo una combustión estequiométrica perfecta.

A continuación, se visualiza en la *ilustración 34* la distribución que presenta la reglilla del banco para desplazar el ángulo de encendido en un intervalo de 20 a 40° con incremento de 4°, para poder manejar el retraso o adelanto de la chispa de ignición.



*Ilustración 34. Reglilla de medición de ángulo de encendido.  
Fuente: Autor.*

De igual forma se comprobó mediante una lampara estroboscópica que se cumpliera el ángulo de encendido analizado para disminuir el margen de error que se puede presentar.



*Ilustración 35. Revisión del ángulo de encendido mediante lampara estroboscópica.  
Fuente: Autor.*

### 3.5.2 Ángulo óptimo para GLP.

Para el control de la presión de salida del cilindro de GLP, se adaptó un regulador variable para evitar fugas en el interior del mezclador por sobrepresión y para poder medir el consumo de combustible mediante un contador de gas, tal como se visualiza en la *ilustración 36*.



*Ilustración 36. Regulador de presión y contador de consumo de GLP.*  
Fuente: Autor.

Mediante el diagrama de la *ilustración 37*, se visualiza el procedimiento que se llevó a cabo para obtener los ángulos de interés, teniendo en cuenta la normatividad nacional vigente.

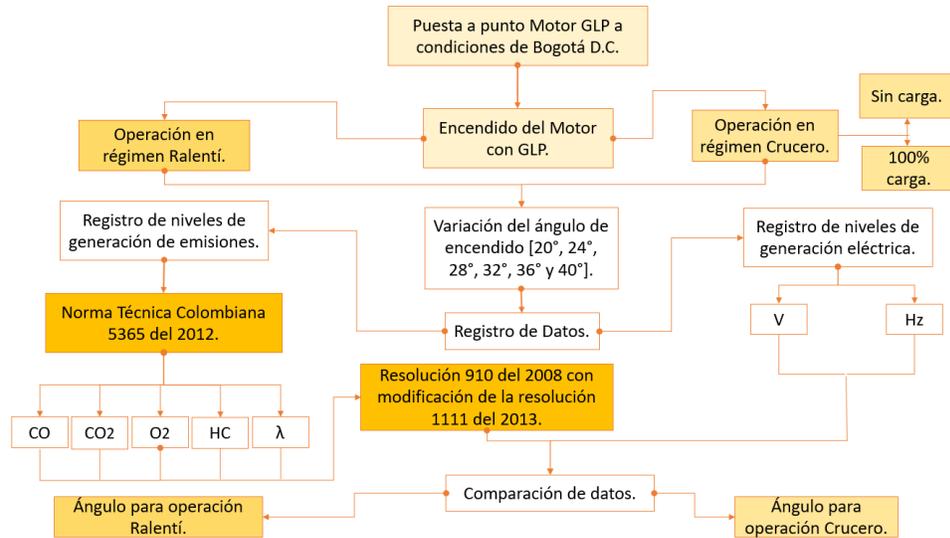


Ilustración 37. Diagrama de selección de ángulo de encendido con GLP.

Fuente: Autor.

Basados en el procedimiento planteado por la NTC 5365 Por la cual se realiza la evaluación de gases de escape de motocicletas, motociclos, moto triciclos, motocarros y cuatrimotos, accionados tanto con gas o gasolina [48], se realiza la medición de emisiones generadas cuando el motor opera con GLP, en un régimen de operación de ralentí y crucero variando el ángulo de encendido en un intervalo de 20 a 40 grados con incremento cada 4 grados, de esta forma se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

Tabla 19. Resultados de prueba en régimen ralentí GLP

Fuente: Autor.

Prueba régimen ralentí GLP.								
°	V	Hz	HC (ppm)	λ	CO (%Vol)	O2 (%Vol)	CO2 (%Vol)	Consumo (ml)
20	91,1	47,5	89	1,31	0,17	6,11	12,74	16
24	90,9	47,5	104	1,14	0,19	4,67	12,67	14
28	91,4	47,6	114	1,23	0,17	4,56	12,67	14
32	90,6	47,3	127	1,23	0,19	4,47	12,66	14
36	90,9	47,3	136	1,24	0,19	4,57	12,51	14
40	91,1	47,3	131	1,26	0,17	5,02	12,36	14

Tabla 20. Resultados de prueba en régimen crucero (3600RPM) GLP.  
Fuente: Autor.

Prueba régimen crucero (3600RPM) GLP sin carga.								
°	V	Hz	HC (ppm)	$\lambda$	CO (%Vol)	O2 (%Vol)	CO2 (%Vol)	Consumo (ml)
20	121.6	60.40	192	1,36	0,08	6,17	9.8	20
24	121.3	60.43	479	1,38	0,09	9.72	9.5	18
28	121.7	60.65	299	1,24	0,07	6.86	9.4	18
32	121.5	60.61	1008	1,43	0,07	7.59	8.7	20
36	121.4	60.34	1195	1,48	0,07	8.44	8.5	20
40	120.4	60.26	1714	1,50	0,08	9.38	7.7	22

Tabla 21 Resultados de prueba en régimen crucero (3600RPM) GLP con carga 100%.  
Fuente: Autor.

Prueba régimen crucero (3600RPM) GLP con carga 100%.										
°	V	A	Hz	HC (ppm)	$\lambda$	CO (%Vol)	O2 (%Vol)	CO2 (%Vol)	Consumo (ml)	kW
20	78,41	13,02	59,98	151	1,26	1,8	6,42	13,59	50	1,020
24	78,87	13,28	60,04	157	1,32	1,5	6,86	12,27	48	1,047
28	80,95	13,53	60,01	164	1,25	0,9	5,82	10,05	46	1,095
32	80,23	13,45	60,09	177	1,34	1,2	6,18	9,63	46	1,079
36	79,74	13,21	60,2	234	1,37	1,1	6,64	9,45	48	1,053
40	80,19	13,17	59,78	279	1,48	1,7	7,51	8,82	48	1,056

Comparando los datos registrados en la *Tabla 19* de los principales gases con las emisiones reglamentadas en la resolución 910 del 2008 [3] presentadas en la *ilustración 38*. Analizando los datos obtenidos en la prueba se observa que los valores registrados se encuentran dentro de los parámetros establecidos, por tal razón al comparar los resultados, se evaluó que el motor opera de una forma óptima en régimen de ralentí a 24°, ya que en este punto se evidencia una disminución de hidrocarburos.

Tabla 2. Límites máximos de emisión permisibles para vehículos convertidos a gas natural vehicular o GLP en velocidad de crucero y en condición de marcha mínima, ralentí o prueba estática.

Año modelo	CO (%)	HC (ppm)
1970 y anterior	5,0	800
1971 – 1984	4,0	650
1985 – 1997	3,0	400
1998 y posterior	1,0	200

*Ilustración 38. Límites máximos de emisiones permisibles para vehículos convertidos a gas natural vehicular o GLP en velocidad de crucero y en condiciones de marcha mínima, ralentí o prueba estática.*

*Fuente:[3]*

De igual forma al evaluar los resultados mostrados en la *Tabla 20* y *Tabla 21*, se evidencia que el motor presenta un mejor desempeño cuando opera con un ángulo de encendido de 28° a régimen crucero en 3600 RPM, debido a que se presenta una disminución en los niveles de emisiones generadas y un valor de lambda menor en comparación con los demás datos registrados, de igual forma se genera mayor cantidad de potencia.

### **3.6 Número de replicas.**

Conociendo los respectivos ángulos de trabajo, se desarrolló las réplicas donde se tuvo en cuenta el factor económico debido al alto precio de los combustibles, por tal razón se tomó la decisión de realizar tres replicas para gasolina y tres replicas para GLP, para comparar el comportamiento de los parámetros y variables disminuyendo el margen de error que se puede presentar.

## **4 Capítulo: Análisis Térmico.**

Este apartado se centra en el análisis y evaluación de los parámetros y variables medibles mediante sus respectivas ecuaciones para obtener el resultado denominadas variables calculadas. De esta forma se obtiene el flujo másico de combustible, flujo másico de aire, flujo másico de emisiones, potencia eléctrica, calor liberado, torque generado, eficiencia eléctrica y balance general de energía; describiendo el procedimiento paso a paso que se llevó a cabo para obtener los datos de interés.

Mediante la siguiente lista, se registró los datos no variables que se emplearon para conseguir los cálculos del estudio energético del banco de pruebas.

- Masa Molecular del aire.
- Densidad del aire.
- Densidad del GLP.
- Densidad de la Gasolina.
- Velocidad del eje del motor
- Cilindraje del motor.
- Factor de corrección de la potencia eléctrica.
- Poder calorífico Gasolina.
- Poder calorífico GLP.
- Frecuencia.

### **4.1 Análisis mediante la operación del equipo con combustible gasolina.**

Para versatilidad de la descripción del proceso, se expondrá los cálculos desarrollados en la primera corrida los cuales se basan con la misma metodología para todas las pruebas que se llevaron a cabo.

- Conociendo que las pruebas se ejecutaron con una velocidad del eje del motor de 3600 RPM, para efecto de los cálculos se realiza la conversión de esa velocidad a Rad/s como se muestra a continuación.

$$1 \frac{\text{Revolución}}{\text{Minuto}} \cdot \left[ \frac{2\pi \cdot \text{Radian}}{1 \text{Revolución}} \right] \cdot \left[ \frac{1 \text{Minuto}}{60 \text{Segundos}} \right]$$

$$3600 \frac{\text{Rev}}{\text{min}} \cdot \left[ \frac{2\pi \cdot \text{Rad}}{1 \text{Rev}} \right] \cdot \left[ \frac{1 \text{min}}{60 \text{s}} \right]$$

$$3600 \text{ RPM} = 376.9911 \frac{\text{Rad}}{\text{s}}$$

- Se registraron los datos del consumo, voltaje y corriente proporcionados por el equipo como se aprecia en la *Tabla 22*.

*Tabla 22. Resultados de prueba con combustible gasolina.  
Fuente: Autor.*

<b>Carga [%]</b>	<b>Consumo [L]</b>	<b>Voltaje [V]</b>	<b>Corriente [A]</b>
0	15.17 x 10 <sup>-3</sup>	112.065	0
20	21.20 x 10 <sup>-3</sup>	117.148	3.684
40	27.62 x 10 <sup>-3</sup>	112.366	7.170
60	33.50 x 10 <sup>-3</sup>	107.862	10.485
80	37.25 x 10 <sup>-3</sup>	100.202	12.994
100	40.50 x 10 <sup>-3</sup>	87.120	14.359

- Posteriormente se procede a encontrar el flujo masico del combustible conociendo que el tiempo de prueba es de 5 minutos (300 s), la densidad de la gasolina en Colombia es aproximadamente de 739 kg/m<sup>3</sup> a 15.6°C, lo que es igual a 0.000739 kg/ml [6]; con la metodología que se aprecia a continuación y obteniendo los resultados mostrados en las *Tabla 23* y *Tabla 24*.

$$\text{Caudal}_{\text{Gasolina}} = \frac{\text{Consumo}}{\text{Tiempo de prueba}}$$

$$\dot{V}_{\text{Gasolina}} = \frac{15.175 \cdot 10^{-3} \text{L}}{300 \text{s}} = 5.0583 \cdot 10^{-5} \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

Tabla 23. Resultado Caudal de gasolina.  
Fuente: Autor.

Carga [%]	Caudal de Gasolina [ $\dot{V}$ ]
0	$5.058 \times 10^{-5}$ L/s
20	$7.066 \times 10^{-5}$ L/s
40	$9.206 \times 10^{-5}$ L/s
60	$1.116 \times 10^{-4}$ L/s
80	$1.241 \times 10^{-4}$ L/s
100	$1.350 \times 10^{-4}$ L/s

Una vez calculado el caudal de combustible, se procede a encontrar el flujo másico como se muestra a continuación.

$$\begin{aligned} \text{Flujo Másico}_{Gasolina} &= \dot{V}_{Gasolina} \cdot \text{Densidad}_{Gasolina} \\ \dot{m}_{Gasolina} &= \left(0.05067 \frac{ml}{s}\right) \cdot \left(0.000739 \frac{kg}{ml}\right) \\ \dot{m}_{Gasolina} &= 3.738 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{s} \end{aligned}$$

Tabla 24. Resultado del Flujo másico de gasolina.  
Fuente: Autor.

Carga [%]	Flujo Másico Gasolina [ $\dot{m}$ ]
0	$3.738 \times 10^{-5}$ kg/s
20	$5.222 \times 10^{-5}$ kg/s
40	$6.805 \times 10^{-5}$ kg/s
60	$8.252 \times 10^{-5}$ kg/s
80	$9.176 \times 10^{-5}$ kg/s
100	$9.977 \times 10^{-5}$ kg/s

- Mediante el resultado obtenido del flujo másico y conociendo el poder calorífico inferior del combustible que es aproximadamente 46522.5 kJ/kg [6]; se procede a calcular el calor liberado por el combustible mediante el uso de la **Ecu 7**. Obteniendo los valores mostrados en la **Tabla 25**.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{lib} &= \dot{m}_f \cdot PCI \\ \dot{Q}_{lib} &= \dot{m}_{Gasolina} \cdot PCI_{Gasolina} \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_{lib} = \left(0.00003738 \frac{kg}{s}\right) \cdot \left(46522.5 \frac{kJ}{kg}\right)$$

$$\dot{Q}_{lib} = 1.739 \frac{kJ}{s}$$

Tabla 25. Resultado del Calor Liberado.  
Fuente: Autor.

Carga [%]	Calor Liberado [kW]
0	1,739
20	2,430
40	3,166
60	3,839
80	4,269
100	4,641

- Mas adelante se encontró la potencia eléctrica entregada por el generador como se muestra a continuación tomando los valores obtenidos en la carga del 20%.

$$Potencia [kW] = \frac{Corriente [A] \cdot Voltaje[V] \cdot Factorde\ corrección\ potencia}{1000}$$

$$Pe = \frac{(3.684 A)(117.148 V)(0.8)}{1000}$$

$$Pe = \frac{347.4146 W}{1000}$$

$$Pe = 0.347kW$$

En la *Tabla 26* se encuentran los valores obtenidos de la potencia eléctrica.

Tabla 26. Resultados de la Potencia eléctrica generada.  
Fuente: Autor.

Carga [%]	Potencia eléctrica
0	0 kW
20	0.347kW
40	0.645kW
60	0.905kW
80	1.043kW
100	1.090kW

- Conociendo los datos calculados, se procede a encontrar el consumo específico de combustible (BSFC) en cada porcentaje de carga, utilizando la ecuación 22, obteniendo los resultados mostrados en la *Tabla 27*.

$$BSFC_{Gasolina} = \frac{\dot{m}_f}{N_e}$$

$$BSFC_{Gasolina} = \frac{0,00005222 \frac{kg}{s}}{0,431593 kW} \cdot \left(\frac{1000g}{1kg}\right) \cdot \left(\frac{3600s}{1h}\right)$$

$$BSFC_{Gasolina} = 456.1464 \frac{g}{kWh}$$

*Tabla 27. Consumo específico de combustible al freno.*

*Fuente: Autor.*

<b>Carga [%]</b>	<b>BSFC [g/kWh]</b>
0	0,000
20	435,768
40	304,585
60	262,462
80	253,673
100	291,927

- Por último, se encuentra el valor de la eficiencia eléctrica del equipo mediante los resultados obtenidos del calor liberado y de la potencia eléctrica. Los resultados de eficiencia de la primera prueba se muestran en la *Tabla 28*.

$$\eta_{eléctrica} = \frac{Potencia Eléctrica}{Calor Liberado} \cdot 100$$

$$\eta_{eléctrica} = \frac{Potencia Eléctrica [kW]}{\dot{m}_{Gasolina} \cdot PCI_{Gasolina}} \cdot 100$$

Tabla 28. Resultado de la eficiencia eléctrica.  
Fuente: Autor.

Carga [%]	Eficiencia eléctrica [%]
0	0
20	14.24
40	20.39
60	23.63
80	24.45
100	21.67

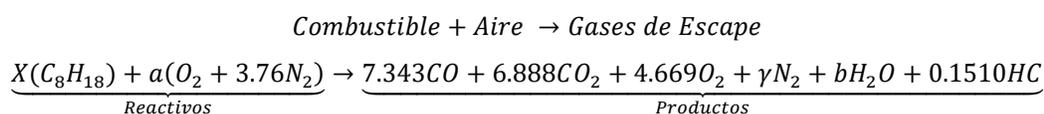
#### 4.2 Análisis de las emisiones generadas por la operación del equipo con combustible gasolina.

Basados en la metodología del análisis de emisiones Orsat, se analizaron las emisiones generadas por la combustión de la gasolina en el motor del banco de pruebas realizando el balance estequiométrico.

Tabla 29. Resultados de emisiones de la primer replica Gasolina.  
Fuente: Autor.

GASES DE ESCAPE [% Volumen]				
Gas	CO	CO2	O2	HC
Carga [%]				
0	7,343	6,888	4,669	0,1510
20	9,664	6,110	3,903	0,2289
40	11,514	5,698	2,742	0,1587
60	13,173	5,391	1,702	0,0659
80	13,598	5,095	1,589	0,0630
100	13,339	5,231	1,554	0,0670

Al tener en cuenta que el aire se compone del 79% y 21% de oxígeno, se plantea la siguiente ecuación de balance:



- **Balance de Carbón:**

$$8X = 7.343 + 6.888 + 0.1510 \Rightarrow X = \frac{7.343 + 6.888 + 0.1510}{8} = 1.79775$$

- **Balance de Hidrogeno:**

$$18X = 2b + 0.1510 \Rightarrow b = \frac{18(1.79775) - 0.1510}{2} = 16.10425$$

- **Balance de Oxigeno:**

$$2a = 7.343 + 2(6.888) + 2(4.669) + b \Rightarrow a = \frac{7.343}{2} + (6.888) + (4.669) + \frac{16.10}{2} = 23.280625$$

- **Balance de Nitrógeno:**

$$2(3.76a) = 2\gamma \Rightarrow \gamma = \frac{2(3.76(23.280625))}{2} = 87.53515$$

- Reemplazando los valores en la ecuación de balance se obtiene que:

$$1.79775 (C_8H_{18}) + 23.280625(O_2 + 3.76N_2) \\ \rightarrow 7.343CO + 6.888CO_2 + 4.669O_2 + 87.53515N_2 + 16.10425H_2O + 0.1510HC$$

- Expresando la ecuación en mol de combustible se consigue:

$$\frac{1.79775 (C_8H_{18})}{1.79775} + \frac{23.280625(O_2 + 3.76N_2)}{1.79775} \\ \rightarrow \frac{7.343CO}{1.79775} + \frac{6.888CO_2}{1.79775} + \frac{4.669O_2}{1.79775} + \frac{87.53515N_2}{1.79775} + \frac{16.10425H_2O}{1.79775} + \frac{0.1510HC}{1.79775}$$

$$C_8H_{18} + 12.95(O_2 + 3.76N_2) \\ \rightarrow 4.085CO + 3.832CO_2 + 2.597O_2 + 48.6915N_2 + 8.958H_2O + 0.0839HC$$

Conociendo la masa atómica de cada molécula establecido en la *Tabla 30*, se procede a encontrar la masa de cada componente mediante la multiplicación de la masa atómica y la ecuación de mol de combustible, donde se opera cada uno de los productos según corresponda.

Tabla 30. Masa atómica de las moléculas de la combustión.  
Fuente: Autor.

Molécula	$C_8H_{18}$	$O_2$	$N_2$	$CO$	$CO_2$	$H_2O$	$HC$
Masa atómica	114	32	28	44	32	18	13

De esta manera se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 31.

Tabla 31. Resultados de masa de moléculas producidas.  
Fuente: Autor.

Resultados de masa de moléculas producidas.							
Carga [%]	Gas	CO [g]	CO2 [g]	O2 [g]	HC [g]	H2O[g]	N2 [g]
0		114,367	168,584	83,108	1,0922	161,243	1363,359
20		135,273	134,394	62,440	1,4874	160,970	1252,056
40		148,475	115,466	40,409	0,9499	161,342	1160,195
60		158,386	101,863	23,381	0,3676	161,745	1091,434
80		162,403	95,614	21,689	0,3492	161,758	1078,505
100		160,327	98,792	21,343	0,3741	161,740	1081,016

Posteriormente, se encuentra los valores del flujo masico de los gases mediante la metodología presentada a continuación.

$$\dot{m}_n = \text{masa molecula} \cdot \left( \frac{1kg}{1000g} \right) \div \text{tiempo de prueba}$$

$$\sum \dot{m}_{CO} + \dot{m}_{CO_2} + \dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{H_2O} + \dot{m}_{N_2} + \dot{m}_{HC} = \dot{m}_{emisiones}$$

$$\dot{m}_{CO} = 114,367g \left( \frac{1kg}{1000} \right) \div (300 s) = 3.812 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_{CO_2} = 168,584g \left( \frac{1kg}{1000} \right) \div (300 s) = 5.619 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_{O_2} = 83,108g \left( \frac{1kg}{1000} \right) \div (300 s) = 2.770 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_{H_2O} = 161,243g \left( \frac{kg}{1000} \right) \div (300 s) = 5.374 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_{N_2} = 1363,359 g \left( \frac{1kg}{1000} \right) \div (300 s) = 4.544 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_{HC} = 1,0922 \text{ g} \left( \frac{1 \text{ kg}}{1000} \right) \div (300 \text{ s}) = 3.64 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{emisiones} = \left( 3.812 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) + \left( 5.619 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) + \left( 2.770 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) + \left( 5.374 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) + \left( 4.544 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) + \left( 3.64 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$$

$$\dot{m}_{emisiones} = 6.3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Consiguiendo de esta manera presentar en la *Tabla 32*, el flujo másico de emisiones

*Tabla 32. Flujo másico de emisiones.  
Fuente: Autor.*

Carga [%]	$\dot{m}$ Emisiones [kg/s]
0	$6.311 \times 10^{-3}$
20	$5.862 \times 10^{-3}$
40	$5.458 \times 10^{-3}$
60	$5.134 \times 10^{-3}$
80	$5.073 \times 10^{-3}$
100	$5.084 \times 10^{-3}$

### 4.3 Análisis del calor perdido por las emisiones generadas por la operación del equipo con combustible gasolina.

Conociendo las emisiones generadas por el motor en cada porcentaje de carga, se procede a obtener mediante la *ecuación 23*, las fracciones molares correspondientes de cada molécula establecidos en la *Tabla 33*, mediante el procedimiento que se muestra a continuación utilizándolo para los datos de la carga del cero por ciento.

$$EI_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_f} = \frac{m_i}{m_f}$$

$$y_{iCO} = \frac{7.343CO}{(7.343CO + 6.888CO_2 + 4.669O_2 + 87.53515N_2 + 16.10425 H_2O + 0.1510HC)} = 59.84 \cdot 10^{-3}$$

$$y_{iCO_2} = \frac{6.888CO_2}{(7.343CO + 6.888CO_2 + 4.669O_2 + 87.53515N_2 + 16.10425 H_2O + 0.1510HC)} = 56.14 \cdot 10^{-3}$$

$$y_{iO_2} = \frac{4.669O_2}{(7.343CO + 6.888CO_2 + 4.669O_2 + 87.53515N_2 + 16.10425 H_2O + 0.1510HC)} = 38.05 \cdot 10^{-3}$$

$$y_{i_{N_2}} = \frac{87.53515N_2}{(7.343CO + 6.888CO_2 + 4.669O_2 + 87.53515N_2 + 16.10425 H_2O + 0.1510HC)} = 713.46 \cdot 10^{-3}$$

$$y_{i_{H_2O}} = \frac{16.10425 H_2O}{(7.343CO + 6.888CO_2 + 4.669O_2 + 87.53515N_2 + 16.10425 H_2O + 0.1510HC)} = 131.2 \cdot 10^{-3}$$

$$y_{i_{HC}} = \frac{0.1510HC}{(7.343CO + 6.888CO_2 + 4.669O_2 + 87.53515N_2 + 16.10425 H_2O + 0.1510HC)} = 123 \cdot 10^{-3}$$

$$\sum y_{i_{CO}} + y_{i_{CO_2}} + y_{i_{O_2}} + y_{i_{N_2}} + y_{i_{H_2O}} + y_{i_{HC}} = 1$$

$$(59.84 \cdot 10^{-3})CO + (56.14 \cdot 10^{-3})CO_2 + (38.05 \cdot 10^{-3})O_2 + (713.46 \cdot 10^{-3})N_2 + (131.2 \cdot 10^{-3})H_2O + (123 \cdot 10^{-3})HC = 1$$

Tabla 33. Fracciones molares en función del porcentaje de carga.  
Fuente: Autor.

Carga [%]	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	HC
0	59.84 x 10 <sup>-3</sup>	56.14 x 10 <sup>-3</sup>	38.05 x 10 <sup>-3</sup>	713.46 x 10 <sup>-3</sup>	131.25 x 10 <sup>-3</sup>	1.231 x 10 <sup>-3</sup>
20	75.94 x 10 <sup>-3</sup>	48.01 x 10 <sup>-3</sup>	30.67 x 10 <sup>-3</sup>	702.97 x 10 <sup>-3</sup>	140.58 x 10 <sup>-3</sup>	1.79 x 10 <sup>-3</sup>
40	88.87 x 10 <sup>-3</sup>	43.98 x 10 <sup>-3</sup>	21.16 x 10 <sup>-3</sup>	694.50 x 10 <sup>-3</sup>	150.23 x 10 <sup>-3</sup>	1.22 x 10 <sup>-3</sup>
60	99.77 x 10 <sup>-3</sup>	40.83 x 10 <sup>-3</sup>	12.88 x 10 <sup>-3</sup>	687.51 x 10 <sup>-3</sup>	158.49 x 10 <sup>-3</sup>	4.98 x 10 <sup>-3</sup>
80	103.23 x 10 <sup>-3</sup>	38.67 x 10 <sup>-3</sup>	12.06 x 10 <sup>-3</sup>	685.58 x 10 <sup>-3</sup>	159.95 x 10 <sup>-3</sup>	4.78 x 10 <sup>-3</sup>
100	101.77 x 10 <sup>-3</sup>	39.90 x 10 <sup>-3</sup>	11.85 x 10 <sup>-3</sup>	686.23 x 10 <sup>-3</sup>	159.71 x 10 <sup>-3</sup>	5.11 x 10 <sup>-3</sup>

Teniendo en cuenta la capacidad calorífica a presión constante (Cp) de las moléculas de los productos tomadas de la Tabla A-2 del libro de termodinámica de Çengel [49], como se visualiza en la Tabla 34, se procede a encontrar el Cp de la mezcla de gases.

Tabla 34. Capacidad Calorífica de los productos de las emisiones generadas por la combustión de gasolina. Fuente: [49].

Molécula	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	HC
Cp [kJ/kgK]	0.2598	1.0390	1.04	0.846	1.8723	0.5

$$\sum y_{i_n} \cdot C_{p_n} = C_p \text{ de la mezcla de emisiones}$$

$$y_{i_{CO}} \cdot C_{p_{CO}} + y_{i_{CO_2}} \cdot C_{p_{CO_2}} + y_{i_{O_2}} \cdot C_{p_{O_2}} + y_{i_{N_2}} \cdot C_{p_{N_2}} + y_{i_{H_2O}} \cdot C_{p_{H_2O}} + y_{i_{HC}} \cdot C_{p_{HC}}$$

$$\begin{aligned}
& \left(0.05984 \cdot 1.04 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right) \text{CO} + \left(0.05614 \cdot 0.846 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right) \text{CO}_2 + \left(0.03805 \cdot 0.2598 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right) \text{O}_2 \\
& + \left(0.71346 \cdot 1.0390 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right) \text{N}_2 + \left(0.1312 \cdot 1.8723 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right) \text{H}_2\text{O} + \left(0.00123 \cdot 0.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right) \text{HC} \\
& = 1.107 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}
\end{aligned}$$

De esta manera se obtiene el Cp para las mezclas de gases en función del porcentaje de carga, datos presentados en la *Tabla 35*.

*Tabla 35. Cp de la mezcla en función del porcentaje de carga.*

*Fuente: Autor.*

Carga [%]	Cp [kJ/kgK]
0	1,107
20	1,122
40	1,139
60	1,153
80	1,155
100	1,155

Conociendo los datos registrados de la temperatura de emisiones exhibidos en la *Tabla 36*, se procede a calcular el calor perdido en las emisiones.

*Tabla 36. Temperatura de las emisiones con respecto al grado de carga.*

*Fuente: Autor.*

Carga [%]	Temp. Emisiones [°C]
0	207,933
20	224,758
40	278,775
60	342,708
80	377,642
100	427,975

$$\dot{Q}_{Emisiones} = \dot{m}_{Emisiones} \cdot C_{pmezcla\ de\ emisiones} \cdot (\Delta T)$$

$$\dot{Q}_{Emisiones} = 0,006311 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,107 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot ((207,933 \text{ °C} + 273.15\text{K}) - (18\text{°C} + 273.15\text{K}))$$

$$\dot{Q}_{Emisiones} = 1.32 \frac{kJ}{s}$$

En la *Tabla 37* se recopilan los datos del calor perdido por las emisiones en función de la carga.

*Tabla 37. Calor Perdido por Emisiones.  
Fuente: Autor.*

Carga [%]	Q Emisiones [kW]
0	1,31
20	1,35
40	1,62
60	1,92
80	2,11
100	2,41

#### 4.4 Análisis mediante la operación del equipo con combustible GLP.

La metodología implementada durante las pruebas con GLP como combustible base se realizó mediante el uso de ecuaciones matemáticas a continuación mostradas para la primera prueba.

- Se registraron los datos del consumo, voltaje y corriente proporcionados por el equipo como se aprecia en la *Tabla 38*.

*Tabla 38. Resultados de prueba con combustible GLP.  
Fuente: Autor.*

Carga [%]	Consumo [L]	Voltaje [V]	Corriente [A]
0	22.542 x 10 <sup>-3</sup>	120,701	0,000
20	29.277 x 10 <sup>-3</sup>	116,087	3,667
40	35.389 x 10 <sup>-3</sup>	109,624	7,080
60	38.798 x 10 <sup>-3</sup>	103,682	10,290
80	41.502 x 10 <sup>-3</sup>	92,459	12,120
100	42.206 x 10 <sup>-3</sup>	80,610	13,334

- Se procede a encontrar el flujo masico del combustible utilizando en este caso GLP, conociendo que el tiempo de la prueba es de 5 minutos (300s) y que el GLP presenta una densidad de 535 kg/m<sup>3</sup> [6], que equivale a 0.000535 kg/ml; teniendo en cuenta el consumo en mililitros y la densidad del combustible se emplea la metodología que se aprecia a continuación obteniendo los resultados mostrados en la *Tabla 39*.

$$Caudal_{GLP} = \frac{Consumo_{GLP}}{Tiempo\ de\ prueba}$$

$$\dot{V}_{GLP} = \frac{22.542\ mL}{300s} = 0.07514\ \frac{mL}{s}$$

$$Flujo\ Másico_{GLP} = \dot{V}_{GLP} \cdot Densidad_{GLP}$$

$$\dot{m}_{GLP} = \left(0,07514\ \frac{ml}{s}\right) \cdot \left(0.000535\ \frac{kg}{ml}\right)$$

$$\dot{m}_{GLP} = 4.1 \cdot 10^{-5}\ \frac{kg}{s}$$

*Tabla 39. Resultado del Flujo másico de GLP.  
Fuente: Autor.*

Carga [%]	Flujo Másico GLP [ṁ]
0	4 x 10 <sup>-5</sup> kg/s
20	52 x 10 <sup>-3</sup> kg/s
40	63 x 10 <sup>-3</sup> kg/s
60	69 x 10 <sup>-3</sup> kg/s
80	74 x 10 <sup>-3</sup> kg/s
100	75 x 10 <sup>-3</sup> kg/s

- Conociendo los resultados del flujo másico y conociendo el poder calorífico inferior del combustible que es aproximadamente 45879 kJ/kg para el GLP [6]; procedemos con la ayuda de la *Ecu 7*. a calcular el calor liberado por el combustible. Obteniendo los valores mostrados en la *Tabla 40*.

$$\dot{Q}_{lib} = \dot{m}_f PCI$$

$$\dot{Q}_{lib} = \dot{m}_{GLP} * PCI$$

$$\dot{Q}_{lib} = \left(0.000040199\ \frac{kg}{s}\right) \cdot \left(45879\ \frac{kJ}{kg}\right)$$

$$\dot{Q}_{lib} = 1.844 \frac{kJ}{s}$$

Tabla 40. Resultado del Calor Liberado.  
Fuente: Autor.

Carga [%]	Calor Liberado [kW]
0	1,844
20	2,395
40	2,895
60	3,174
80	3,396
100	3,453

- Posteriormente se logró conocer la potencia eléctrica entregada por el generador teniendo en cuenta la corriente la corriente y voltaje entregados como se puede ver con la carga de 20%.

$$Potencia [kW] = \frac{Corriente [A] \cdot Voltaje [V] \cdot Factor de corrección de potencia}{1000}$$

$$Pe = \frac{(3.667 A)(116.087 V)(0.8)}{1000}$$

$$Pe = \frac{345.136 W}{1000}$$

$$Pe = 0. kW$$

En la *Tabla 41* se encuentran los valores obtenidos de la potencia eléctrica.

Tabla 41. Resultados de la Potencia eléctrica generada.  
Fuente: Autor.

Carga [%]	Potencia eléctrica [kW]
0	0,000
20	0,341
40	0,621
60	0.853
80	0.896
100	0.860

- Conociendo los datos calculados, se procede a encontrar el consumo específico de combustible (BSFC) en cada porcentaje de carga, utilizando la ecuación 22, obteniendo los resultados mostrados en la *Tabla 42*.

*Tabla 42. Consumo específico de combustible al freno.  
Fuente: Autor.*

<b>Carga [%]</b>	<b>BSFC [g/kWh]</b>
0	0,000
20	553.089
40	366.160
60	291.819
80	297.106
100	315.641

- Finalizando, se encuentran los valores de la eficiencia eléctrica del equipo mediante los resultados obtenidos por calor liberado y la potencia eléctrica.

$$\eta_{el\u00e9ctrica} = \frac{\text{Potencia El\u00e9ctrica}}{\text{Calor Liberado}} \cdot 100$$

$$\eta_{el\u00e9ctrica} = \frac{\text{Potencia El\u00e9ctrica [kW]}}{\dot{m}_{GLP} \cdot PCI_{GLP}} \cdot 100$$

*Tabla 43. Resultado de la eficiencia el\u00e9ctrica.  
Fuente: Autor.*

<b>Carga [%]</b>	<b>Eficiencia el\u00e9ctrica [%]</b>
0	0,000
20	14.415
40	21.634
60	26.964
80	26.538
100	24.955

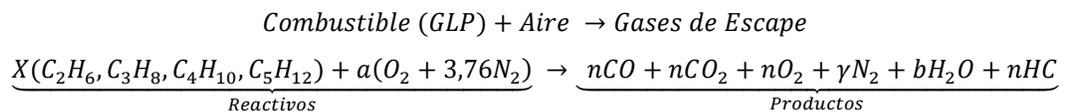
#### 4.5 Análisis de las emisiones generadas por la operación del equipo con combustible GLP.

Basados en la metodología del análisis de emisiones Orsat, se analizaron las emisiones generadas por la combustión del GLP cuando el motor del banco de pruebas opera con este combustible y gracias al analizador de gases se obtuvo los resultados que se visualizan en la *Tabla 44*.

*Tabla 44. Resultados de emisiones de la primer replica GLP.  
Fuente: Autor.*

GASES DE ESCAPE [% Volumen]				
Gas \ Carga [%]	CO	CO2	O2	HC
0	1,354	9,633	6,724	0,0921789
20	3,681	9,222	5,836	0,0540856
40	3,821	9,312	4,485	0,0233222
60	4,384	9,195	3,241	0,0210044
80	4,400	8,941	2,917	0,0204478
100	3,497	9,848	3,136	0,0185144

Al tener en cuenta que el aire se compone del 79% y 21% de oxígeno, se plantea la siguiente ecuación de balance:



○ **Balance de Carbón:**

$$5X = 1.354 + 9.633 + 0.0921789 \Rightarrow X = \frac{1.354 + 9.633 + 0.0921789}{5}$$

$$X = 2.215$$

○ **Balance de Hidrogeno:**

$$14X = 2b + 0.0921789 \Rightarrow b = \frac{14(2.215) - 0.0921789}{2}$$

$$b = 15.464$$

○ **Balance de Oxigeno:**

$$2a = 1.354 + 2(9.633) + 2(6.724) + b \Rightarrow a = \frac{1.354}{2} + (9.633) + (6.724) + \frac{15.46}{2}$$

$$a = 24.766$$

○ **Balance de Nitrógeno:**

$$2(3.76a) = 2\gamma \Rightarrow \gamma = \frac{2(3.76(24.766))}{2} = 93.119$$

Reemplazando los valores en la ecuación de balance se obtiene que:

$$2.215 \text{ GLP} + 24.766(O_2 + 3.76N_2) \\ \rightarrow 1.354CO + 9.633CO_2 + 6,724O_2 + 93.119N_2 + 15.464H_2O + 0.0921789HC$$

Expresando la ecuación en mol de combustible se consigue:

$$\frac{2.215 (C_2H_6 + C_3H_8 + C_4H_{10} + C_5H_{12})}{2.215} + \frac{24.766(O_2 + 3.76N_2)}{2.215} \\ \rightarrow \frac{1.354CO}{2.215} + \frac{9.633CO_2}{2.215} + \frac{6,724O_2}{2.215} + \frac{93.119N_2}{2.215} + \frac{15.464H_2O}{2.215} + \frac{0.0921789HC}{2.215} \\ C_2H_6 + C_3H_8 + C_4H_{10} + C_5H_{12} + 11.177(O_2 + 3.76N_2) \\ \rightarrow 0.611CO + 4.347CO_2 + 3.035O_2 + 42.027N_2 + 6.979H_2O + 0.0416 HC$$

Teniendo en cuenta la masa atómica de cada molécula establecido en la *Tabla 45* y con el uso de la multiplicación entre el número atómico y las ecuaciones de cada mol de combustible hallamos la masa de cada componente.

*Tabla 45. Masa atómica de las moléculas de la combustión GLP.  
Fuente: Autor.*

<b>Molécula</b>	<i>GLP</i>	<i>O<sub>2</sub></i>	<i>N<sub>2</sub></i>	<i>CO</i>	<i>CO<sub>2</sub></i>	<i>H<sub>2</sub>O</i>	<i>HC</i>
<b>Masa atómica</b>	220.44	32	28	28	44	18	13

De esta manera se obtienen los resultados mostrados en la *Tabla 46*.

Tabla 46. Resultados de masa de moléculas producidas del GLP.  
Fuente: Autor.

Resultados de masa de moléculas producidas.						
Gas	CO [g]	CO <sub>2</sub> [g]	O <sub>2</sub> [g]	HC [g]	H <sub>2</sub> O [g]	N <sub>2</sub> [g]
Carga [%]						
0	17,106	191,288	97,115	0,540	125,625	1176,754
20	39,775	156,577	72,068	0,271	125,812	1054,458
40	40,658	155,719	54,541	0,115	125,920	996,7182
60	45,131	148,741	38,134	0,100	125,930	934,480
80	46,102	147,218	34,928	0,099	125,931	922,115
100	36,637	162,122	37,549	0,090	125,937	948,627

Posteriormente, se encuentra los valores del flujo masico de los gases mediante la metodología presentada a continuación.

$$\dot{m}_n = \text{masa molecula} \cdot \left(\frac{1kg}{1000g}\right) \div \text{tiempo de prueba}$$

$$\sum \dot{m}_{CO} + \dot{m}_{CO_2} + \dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{H_2O} + \dot{m}_{N_2} + \dot{m}_{HC} = \dot{m}_{emisiones}$$

$$\dot{m}_{CO} = 17,106 \text{ g} \left(\frac{1kg}{1000}\right) \div (300 \text{ s}) = 5.702 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_{CO_2} = 191,288 \text{ g} \left(\frac{1kg}{1000}\right) \div (300 \text{ s}) = 6.37 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_{O_2} = 97,115 \text{ g} \left(\frac{1kg}{1000}\right) \div (300 \text{ s}) = 3.23 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_{H_2O} = 125,625 \text{ g} \left(\frac{kg}{1000}\right) \div (300 \text{ s}) = 4.18 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_{N_2} = 1176,754 \text{ g} \left(\frac{1kg}{1000}\right) \div (300 \text{ s}) = 3.92 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_{HC} = 0,540 \text{ g} \left(\frac{1kg}{1000}\right) \div (300 \text{ s}) = 1.8 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{s}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{emisiones} = & \left(5.702 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{s}\right) + \left(6.37 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{s}\right) + \left(3.23 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{s}\right) + \left(4.18 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{s}\right) \\ & + \left(3.92 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{s}\right) + \left(1.8 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{s}\right) \end{aligned}$$

$$\dot{m}_{emisiones} = 5.62 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s}$$

Consiguiendo de esta manera presentar en la *Tabla 47*, el flujo másico de emisiones

Tabla 47. Flujo másico de emisiones producto de combustión GLP.  
Fuente: Autor.

Carga [%]	$\dot{m}$ Emisiones [kg/s]
0	$5.62 \times 10^{-3}$
20	$5.11 \times 10^{-3}$
40	$4.83 \times 10^{-3}$
60	$4.46 \times 10^{-3}$
80	$4.36 \times 10^{-3}$
100	$4.49 \times 10^{-3}$

#### 4.6 Análisis del calor perdido por las emisiones generadas por la operación del equipo con combustible GLP.

Teniendo en cuenta los resultados de masa de moléculas producidas del GLP y aplicando el procedimiento descrito en inciso 4.3, mediante la aplicación de la ecuación 23, en la Tabla 49 se muestran los resultados de las fracciones molares.

$$EI_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_f} = \frac{m_i}{m_f}$$

$$\sum y_{iCO} + y_{iCO_2} + y_{iO_2} + y_{iN_2} + y_{iH_2O} + y_{iHC} = 1$$

Tabla 48. Fracciones molares emitidas por el GLP, en función del porcentaje de carga.  
Fuente: Autor.

Carga [%]	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	HC
0	$10.7 \times 10^{-3}$	$76 \times 10^{-3}$	$53.2 \times 10^{-3}$	$737 \times 10^{-3}$	$122 \times 10^{-3}$	$7.29 \times 10^{-4}$
20	$27.3 \times 10^{-3}$	$69 \times 10^{-3}$	$43.4 \times 10^{-3}$	$726 \times 10^{-3}$	$135 \times 10^{-3}$	$4.02 \times 10^{-4}$
40	$29.4 \times 10^{-3}$	$72 \times 10^{-3}$	$34.6 \times 10^{-3}$	$722 \times 10^{-3}$	$142 \times 10^{-3}$	$1.79 \times 10^{-4}$
60	$34.6 \times 10^{-3}$	$73 \times 10^{-3}$	$25.6 \times 10^{-3}$	$717 \times 10^{-3}$	$150 \times 10^{-3}$	$1.65 \times 10^{-4}$
80	$35.7 \times 10^{-3}$	$73 \times 10^{-3}$	$23.7 \times 10^{-3}$	$716 \times 10^{-3}$	$152 \times 10^{-3}$	$1.66 \times 10^{-4}$
100	$27.8 \times 10^{-3}$	$78 \times 10^{-3}$	$24.9 \times 10^{-3}$	$720 \times 10^{-3}$	$149 \times 10^{-3}$	$1.47 \times 10^{-4}$

Igualmente se debe tener en cuenta la capacidad calorífica a presión constante (Cp) de las moléculas de los productos de las emisiones producidas por el GLP tomadas

de la Tabla A-2 del libro de termodinámica de Çengel [49], en la *Tabla 32* se aprecian los valores descritos.

Posteriormente se procede a calcular el Cp de la mezcla de emisiones

$$\sum y_i \cdot C_{p_i} = C_p \text{ de la mezcla de emisiones}$$

$$(y_{i_{CO}} \cdot C_{p_{CO}}) + (y_{i_{CO_2}} \cdot C_{p_{CO_2}}) + (y_{i_{O_2}} \cdot C_{p_{O_2}}) + (y_{i_{N_2}} \cdot C_{p_{N_2}}) + (y_{i_{H_2O}} \cdot C_{p_{H_2O}}) + (y_{i_{HC}} \cdot C_{p_{HC}}) = 1$$

Los datos mostrados en la *Tabla 49* son los obtenidos al calcular el Cp para las mezclas de gases en función del porcentaje de carga

*Tabla 49. Cp de la mezcla de emisiones de GLP en función del porcentaje de carga. Fuente: Autor.*

Carga [%]	Cp [kJ/kgK]
0	1,084
20	1,104
40	1,116
60	1,130
80	1,133
100	1,128

Utilizando los datos registrados de las réplicas de la temperatura de emisiones presentados en la *Tabla 50*, se procede a calcular el calor cedido en las emisiones.

*Tabla 50. Temperatura de las emisiones de GLP con respecto al grado de carga. Fuente: Autor.*

Carga [%]	Temp. Emisiones [°C]
0	263,3333
20	286,3333
40	315,3333
60	329,0000
80	348,6667
100	355,6667

$$\dot{Q}_{Emisiones} = \dot{m}_{Emisiones} \cdot C_{p_{mezcla \text{ de emisiones}}} \cdot (\Delta T)$$

$$\dot{Q}_{Emisiones} = 0,005624 \frac{kg}{s} \cdot 1,084 \frac{kJ}{kgK} \cdot ((263.33 \text{ °C} + 273.15K) - (20\text{°C} + 273.15K))$$

$$\dot{Q}_{Emisiones} = 1,487 \frac{kJ}{s}$$

En la *Tabla 51* se recopilan los datos del calor perdido por las emisiones en función de la carga.

*Tabla 51. Calor Perdido por Emisiones.  
Fuente: Autor.*

Carga [%]	Q Emisiones [kW]
0	1,487
20	1,517
40	1,576
60	1,546
80	1,623
100	1,692

#### **4.7 Transferencia de Calor.**

Al realizar el análisis térmico del motor es necesario realizar un estudio de transferencia de calor en la estructura de este para obtener resultados acertados y así dar un cierre térmico. Para ello se aproximaron las dimensiones del motor y se asemejaron a una figura geométrica de cubo para facilitar el análisis.

En estudio de transferencia de calor se tuvo en cuenta la ecuación 29 de convección natural la cual se da entre el motor y el aire a condiciones normales. Se evaluaron 5 caras del motor las cuales son:

- Frontal.
- Superior.
- Trasera.
- Lateral izquierda.
- Inferior.

Es necesario la dirección de transferencia de calor en ellas que va definida si esta está ubicada vertical u horizontalmente. Esto se debe al coeficiente de transferencia de calor (h) el cual se define a partir de algunas propiedades y características de los

agentes intervinientes en la transferencia [29]. Seguido de conocer el coeficiente convectivo del ambiente se puede utilizar la ecuación 29 con ayuda del área superficial y la temperatura tanto superficial como ambiente.

En la disposición del motogenerador se tomaron 3 placas verticales como lo son la frontal, trasera y lateral izquierda, y dos horizontales las cuales son: superior e inferior.

Placa vertical: Para conocer el coeficiente convectivo ideal para el entorno trabajado es importante tener la temperatura de película que es dada por:

$$T_f = \frac{(T_s + T_\infty)}{2}$$

Donde:

$T_f$  = Temperatura de película.

$T_s$  = Temperatura superficial.

$T_\infty$  = Temperatura ambiente.

Calculo para 0% carga en la cara frontal:

$$T_{f\text{gasolina}} = \frac{(87+16)}{2} = 54.77 \text{ °C} \quad T_{f\text{GLP}} = \frac{(88+17)}{2} = 52.66 \text{ °C}$$

Seguido de tener la temperatura de película se podrá obtener el índice de expansión volumétrica denotado con la letra griega beta  $\beta$

$$\beta = \frac{1}{T}$$

$$\beta_{\text{Gasolina}} = \frac{1}{54.77} = 0.00307 \left(\frac{1}{\text{°C}}\right) \quad \beta_{\text{GLP}} = \frac{1}{52.66} = 0.00307062 \left(\frac{1}{\text{°C}}\right)$$

Uno de los coeficientes importantes es el número de Rayleigh  $Ra$  brinda la razón de las fuerzas de flotabilidad en el fluido, el número de Nusselt  $N_u$  que representa el mejoramiento de la transferencia de calor a través del fluido y el número de Prandtl  $Pr$  el cual es un espesor relativo en las capas límites del fluido [29].

$$Ra = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * L^3}{\nu^2} * Pr$$

$$Ra_{Gasolina} = \frac{9.81 * 0.00307903 * (87 - 16) * 0.16^3}{1.4792 \times 10^{-5}} * 0.73202 = \mathbf{29617961.1}$$

$$Ra_{GLP} = \frac{9.81 * 0.00307062 * (88 - 17) * 0.16^3}{1.4884 \times 10^{-5}} * 0.73174 = \mathbf{29071379.4}$$

Donde:

$g$  = gravedad.

$\beta$  = Expansión volumétrica.

$T_s$  = temperatura superficial.

$T_\infty$  = temperatura ambiente.

$L$  = longitud de la placa.

$\nu$  = viscosidad cinemática.

$$Nu = \left( 0,825 + \frac{0,387 Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right)^2$$

$$Nu_{gasolina} = \left( 0,825 + \frac{0,387 (29617961.1)^{\frac{1}{6}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{0,73202} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right)^2 = \mathbf{42.8297}$$

$$Nu_{GLP} = \left( 0,825 + \frac{0,387 (29071379.4)^{\frac{1}{6}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{0,73174} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right)^2 = \mathbf{42.5959}$$

**Nota:** Las propiedades del fluido como lo son la viscosidad cinemática, conductividad térmica y el número de Prandtl se tomaron de acuerdo con la tabla termodinámica A-15 sobre propiedades del aire a presión 1 atm.

$$h = \frac{k}{L} Nu$$

$$h_{Gasolina} = \frac{0.024836}{0.16} * 42.8297 = \mathbf{6.6889} \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$h_{GLP} = \frac{0.024912}{0.16} * 42.5959 = \mathbf{6.6321} \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$h$  = Coeficiente de convección.

Finalmente podemos utilizar la ecuación de transferencia de calor por convección natural.

$$Q = h * A_s * (T_s - T_\infty)$$

$$Q_{gasolina} = 6.6889 * 0.02272 * (87 - 16) = \mathbf{10.8744 W}$$

$$Q_{GLP} = 6.6321 * 0.02272 * (88 - 17) = \mathbf{10.748 W}$$

$A_s$  = Área superficial.

Placas verticales: La transferencia en disposiciones horizontales inicia conociendo la expansión volumétrica con la temperatura de película.

$$T_f = \frac{(T_s + T_\infty)}{2}$$

$$\beta = \frac{1}{T_f}$$

$$T_{fGasolina} = \frac{(66 + 16)}{2} = \mathbf{41.33^\circ C}$$

$$\beta_{gasolina} = \frac{1}{41.33} = \mathbf{0,00318134} \left( \frac{1}{^\circ C} \right)$$

$$T_{fGLP} = \frac{(76 + 17)}{2} = \mathbf{46.83^\circ C}$$

$$\beta_{GLP} = \frac{1}{46.83} = \mathbf{0,00312663} \left( \frac{1}{^\circ C} \right)$$

Horizontalmente es necesario hallar la longitud característica al ser calculada con el dimensionamiento del motor no varía para los 2 combustibles:

$$Lc = \frac{As}{p}$$

$$Lc = \frac{0.03408}{0.764} = \mathbf{0,04460733}$$

Donde:

$Lc$  = Longitud característica.

$As$  = Área superficial.

$p$  = Perímetro.

Seguidamente se procede a conocer el número de Rayleigh y el número de Nusselt para poder utilizar el facto  $h$  de conductividad térmica.

$$Ra = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty)Lc^3}{\vartheta^2} * Pr$$

$$Nu = \left(0,54 * Ra^{\frac{1}{4}}\right)$$

$$h = \frac{k}{Lc} Nu$$

$$Ragasolina = \frac{9.81 * 0,00318134 * (66 - 16) * 0,04460733^3}{1.4884 \times 10^{-5}^2} * 0.73202 = \mathbf{469557.45}$$

$$Nugasolina = \left(0,54 * 536553,726^{\frac{1}{4}}\right) = \mathbf{14.1356552}$$

$$h_{gasolina} = \frac{0.024836}{0,04460733} * 14.6149409 = \mathbf{7.91846887} \frac{\mathbf{W}}{\mathbf{m^2 \cdot ^\circ C}}$$

$$Ra_{GLP} = \frac{9.81 * 0,00312663 * (76 - 17) * 0,04460733^3}{1.4884 \times 10^{-5}^2} * 0.73202 = \mathbf{536553,726}$$

$$Nu_{GLP} = \left(0,54 * 536553,726^{\frac{1}{4}}\right) = \mathbf{14.6149409}$$

$$h_{GLP} = \frac{0.024836}{0,04460733} * 14.6149409 = \mathbf{8.162053} \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Para finalmente utilizar la ecuación de transferencia de calor por convección:

$$Q = h * A_s * (T_s - T_\infty)$$

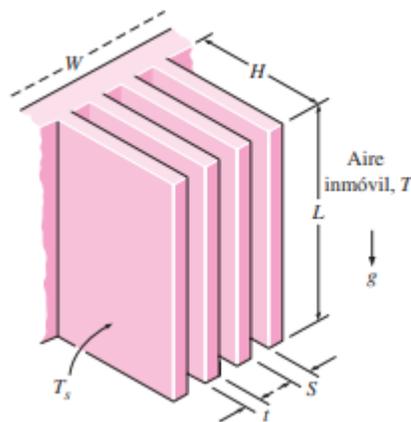
$$Q_{Gasolina} = 7.92 * 0.0348 * (66 - 16) = 13.6729 \mathbf{W}$$

$$Q_{GLP} = 8.16 * 0.0348 * (76 - 17) = 16.597 \mathbf{W}$$

#### 4.8 Transferencia de calor por aletas.

El motogenerador a trabajar es refrigerado por el aire a temperatura ambiente lo que conlleva que en su diseño sea necesario el uso de aletas para disminuir el calor del equipo. Estas aletas están dispuestas sobre el bloque del motor dificultando la medida de la transferencia de calor por ende fue necesario tomar áreas específicas para una medición más exacta.

Se realiza la medida del área a trabajar obteniendo así sus dimensiones como se visualiza en la *Ilustración 39*, es necesario obtener medidas como altura, el espacio entre aletas, grosor de aletas, ancho del área a estudiar y temperatura superficial.



*Ilustración 39. Modelo toma de dimensiones en aletas.*

Fuentes: [29]

Teniendo los valores mencionados y gracias a la temperatura superficial y ambiental podemos encontrar la temperatura de película  $T_f$ .

$$T_f = \frac{(T_s + T_\infty)}{2}$$

$$T_{fGasolina} = \frac{(148 + 16)}{2} = 82 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{fGLP} = \frac{(147 + 17)}{2} = 82 \text{ }^\circ\text{C}$$

Y así teniendo  $T_f$  saber el índice de expansión volumétrica  $\beta$ .

$$\beta = \frac{1}{T_f}$$

$$\beta_{gasolina} = \frac{1}{82} = 0,0028169 \left(\frac{1}{^\circ\text{C}}\right)$$

$$\beta_{GLP} = \frac{1}{82} = 0,0028169 \left(\frac{1}{^\circ\text{C}}\right)$$

Como la transferencia de calor se realiza por convección natural de igual manera que en superficies verticales y horizontales hallamos el número de Rayleigh y el número de Nusselt.

$$Ra = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} * Pr$$

$$Ra_{gasolina} = \frac{9.81 * 0.0028169 * (148 - 16) * 0.0276^3}{1.4884 \times 10^{-5}^2} * 0.73202 = 256573.018$$

$$Ra_{GLP} = \frac{9.81 * 0.0028169 * (147 - 17) * 0.0276^3}{1.4884 \times 10^{-5}^2} * 0.73202 = 249475.974$$

El número de Nusselt óptimo es 1.307 según estudios realizados y descritos en el libro de Çengel de transferencia de calor [29], adicionalmente es necesario saber el espaciado óptimo entre aletas para la configuración.

$$S_{optimo} = 2,714 * \frac{L}{Ra^{0,25}}$$

$$S_{optimoGasolina} = 2,714 * \frac{0.0276}{256573.018^{0,25}} = \mathbf{0.00332825 \text{ m}}$$

$$S_{optimoGLP} = 2,714 * \frac{0.0276}{249475.974^{0,25}} = \mathbf{0.00335167 \text{ m}}$$

Teniendo el  $S$  óptimo, se calcula el número de aletas óptimas para ese espaciamiento.

$$n = \frac{W}{S + t}$$

$$n = \frac{0.16507}{0.00755 + 0.00245} = \mathbf{16.507}$$

$n$  = Numero de aletas para  $S$  óptimo.

Finalmente, se encuentra el coeficiente de transferencia convectivo  $h$  para determinar el flujo de calor por aletas.

$$h = Nu_{optimo} * \frac{k}{S_{optimo}}$$

$$h_{gasolina} = 1.307 * \frac{0.024836}{0.00332825} = \mathbf{9.8127 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}}$$

$$h_{GLP} = 1.307 * \frac{0.024836}{0.00335167} = \mathbf{9.7145 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}}$$

$$Q = h * (2 * n * L * H) * (T_s - T_\infty)$$

$$Q_{Gasolina} = 9.8127 * (2 * 16.507 * 0.0276 * 0.1188) * (148 - 16) = \mathbf{140.213 \text{ W}}$$

$$Q_{Gasolina} = 9.7145 * (2 * 16.507 * 0.0276 * 0.1188) * (147 - 17) = 136.706 W$$

Al tener el flujo de calor para cada superficie se realiza una sumatoria obteniendo el  $Q_{Total}$ .

$$Q_{Total} = \sum Q = \sum Q_{aletas} + \sum Q_{Horizontal} + \sum Q_{vertical}$$

Tabla 52. Transferencia de calor por convección.  
Fuente: Autor.

Transferencia de calor por Convección.		
Carga	Gasolina [W]	GLP [W]
0%	224,65	205,27
20%	290,05	246,51
40%	341,54	291,58
60%	352,33	302,25
80%	360,93	346,68
100%	378,67	374,12

#### 4.9 Transferencia de calor por radiación.

El flujo de calor por radiación se conoció con el uso de la ecuación 31 para ello es necesario tener el área superficial, la constante de Stefan Boltzmann y las temperaturas tanto superficial como ambiental. Este proceso se realizó para cada cara superficial del motor, finalmente sumándolas para obtener la transferencia total por radiación:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{emitida} &= \sigma A_s (T_s^4 - T_\infty^4) \\ \dot{Q}_{emitida Gasolina frontal} &= \left( 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} * k^4 \right) * (0.02272 m^2) * (360.5 k^4 - 289 k^4) \\ \dot{Q}_{emitida Gasolina frontal} &= 0.075 W \\ \dot{Q}_{emitida Total} &= \sum Q_{emitida Frontal} + \sum Q_{emitida Lateral} + \sum Q_{emitida inferior...} \\ \dot{Q}_{emitida Total Gasolina} &= 0.135 W \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_{emitida\ GLP\ frontal} = \left(5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} * k^4\right) * (0.02272\ m^2) * (361.3\ k^4 - 290\ k^4)$$

$$\dot{Q}_{emitida\ GLP\ frontal} = 0.0783\ W$$

$$\dot{Q}_{emitida\ Total} = \Sigma Q_{emitida\ Frontal} + \Sigma Q_{emitida\ Lateral} + \Sigma Q_{emitida\ inferior...}$$

$$\dot{Q}_{emitida\ Total\ GLP} = 0.243\ W$$

Los cálculos anteriores por motivos de practicidad se demostraron con carga de 0%.

Al tener el flujo de calor para cada superficie se realiza una sumatoria obteniendo el

$Q_{Total}$ .

$$Q_{Total} = \Sigma Q = \Sigma Q_{aletas} + \Sigma Q_{Horizontal} + \Sigma Q_{vertical} + +\Sigma Q_{Radiación}$$

Tabla 53. Transferencia de Calor Total.

Fuente: Autor.

Transferencia de calor Total.		
Carga	Gasolina [kW]	GLP [kW]
0%	0,344	0,342
20%	0,540	0,413
40%	0,575	0,479
60%	0,581	0,506
80%	0,602	0,576
100%	0,630	0,628

#### 4.10 Parámetros analizados del motor.

Los siguientes parámetros fueron evaluados según la geometría del motor, la operación y el funcionamiento, como se muestra a continuación.

Tabla 54. Parámetros Geométricos del motor del banco de pruebas.  
Fuente: Autor.

<b>Parámetros Geométrico</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Formula</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>
Diámetro del cilindro	$D = 2 \cdot rp$	0.077	m
Carrera	$S = \text{Distancia PMS} - \text{Distancia PMI}$	0.058	m
Relación carrera-diámetro.	$\frac{S}{D}$	0.75	
Área cabeza pistón	$A_p = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$	0.004657	m <sup>2</sup>
Cilindrada Unitaria	$V_D = S \cdot A_p$	0.00027008	m <sup>3</sup>
Relación de compresión	$r = \frac{V_D + V_C}{V_C}$	8.5	

Tabla 55. Parámetros Operativos del motor del banco de pruebas.  
Fuente: Autor.

<b>Parámetros Operativos</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Formula</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>
Régimen de Giro	$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot n$	376.991	1/min
Régimen y velocidad lineal media del pistón.	$c_m = 2 \cdot s \cdot n$	6.96	m/s

## **5 Capítulo: Guía Metodológica.**

En este capítulo se centra en la presentación del plan experimental que se debe llevar a cabo para el correcto funcionamiento del banco de pruebas, donde se describe el procedimiento para operar el motor con gasolina y GLP.

El plan experimental se desarrolla con el objetivo de demostrar el paso a paso que se debe establecer para el manejo y la comprobación del funcionamiento de los componentes del banco de pruebas, teniendo en cuenta las normas de seguridad para minimizar el riesgo de accidentes.

### **5.1 Revisión del equipo.**

Antes de iniciar las pruebas, se debe realizar una revisión de los siguientes parámetros para reducir el riesgo de accidentalidad que se pueda presentar en la operación del equipo.

- Garantizar que en lugar donde se va a operar el equipo se encuentre con excelente ventilación para disminuir la concentración de emisiones.
- Verificar que la batería se encuentre con la carga correcta (12V).
- Comprobar que todos los elementos del tablero de instrumento operen correctamente.
- Chequear que el nivel de aceite del motor se encuentre en el límite apropiado.
- Examinar que no hallan cables sueltos que puedan causar un corto circuito.

Una vez comprobados los parámetros mencionados anteriormente, se continua con el proceso de las pruebas que se describe a continuación:

## 5.2 Encendido con gasolina:

Para poder encender el motor con gasolina, principalmente se deben tener en cuenta los siguientes pasos para optimizar el proceso:

1. Llenado de la probeta con gasolina corriente (450 cm<sup>3</sup>); tener precaución al momento del llenado de no salpicar el combustible fuera de la probeta, si es así limpiar con un paño.



2. Realizar la correcta conexión de la batería, donde el cable de color rojo se ubica en el terminal rojo y representa el positivo, el cable amarillo se ubica en el terminal negro y representa el negativo.



3. Conectar los cables de alimentación del tablero de instrumentos de medición al tomacorriente.



4. Encender el panel principal mediante el breaker de color naranja ubicado en el tablero y denominado POWER.



5. Verificar que la palanca del variador de combustible del banco se encuentre posicionada en el símbolo que representa la gasolina.



6. Inspeccionar en la caja de control que los interruptores de las resistencias se encuentren abiertos.



7. Comprobar que el led del botón de color negro ubicado en la caja de control se encuentre indicando gasolina; si no es así, oprimirlo hasta conseguir el indicativo mencionado.



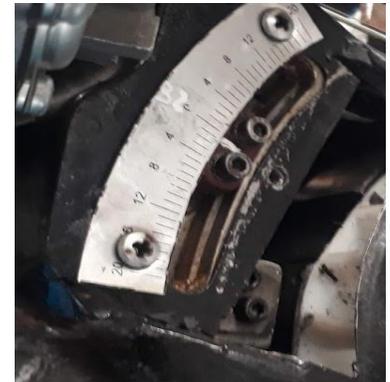
8. Revisar que el interruptor rojo ubicado en la caja de control de las resistencias se encuentre en la posición OFF, posteriormente se realiza el hale del cordón de arranque dos veces.



9. Abrir el paso de la gasolina para llenar la cuba del carburador.



10. Realizar el avance de la chispa, para conseguir un encendido más rápido del motor (28°).



11. Desplazar la palanca de aceleración como se indica en la ilustración.



12. Desplazar la palanca del choque de carburador en sentido de las manecillas del reloj, para permitir el paso de aire al interior del cilindro.



13. Cambiar de posición el interruptor rojo en ON y halar el cordón de arranque hasta conseguir el encendido del motor.



14. Prendido el motor, se deja trabajar por aproximadamente 10 minutos en régimen de ralentí con el fin de que alcance 90°C.



### 5.3 Pruebas.

Para la recopilación de los datos de interés, se emplea el formato del *Anexo 1*, el cual fue empleado para tomar los valores para cada combustible analizado.

#### 5.3.1 Para una carga del 0%:

1. Tomar medición de la humedad relativa del ambiente.



2. Verificar y llenar la probeta a su nivel correspondiente (450 cm<sup>3</sup>).



3. Acelerar el motor a régimen nominal de 3600 RPM (60Hz).



4. Posicionar el avance de la chispa en el ángulo de  $32^\circ$  (ángulo óptimo para gasolina).



5. Programar el analizador para registrar los gases producidos por la combustión de la gasolina.



6. Introducir la sonda del analizador de gases en el tubo de escape.



7. Registrar los datos brindados por analizador en un intervalo de cada 60 segundos por 5 minutos de las variables de CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HC,  $\lambda$ .



8. Verificar y registrar el consumo del combustible mediante la medición proporcionada por la probeta en los intervalos de tiempo (60s).



9. Registrar los datos de los instrumentos de medición del tablero de las variables de amperaje, voltaje y frecuencia de las líneas A y B y la temperatura arrojada.



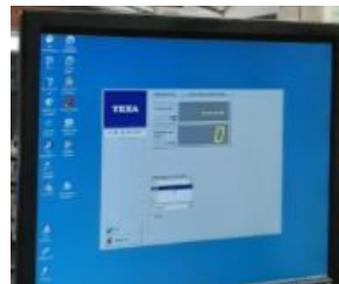
10. Retirar la sonda del tubo de escape.



11. Realizar limpieza de la sonda para evitar la existencia de residuos al interior de ella.

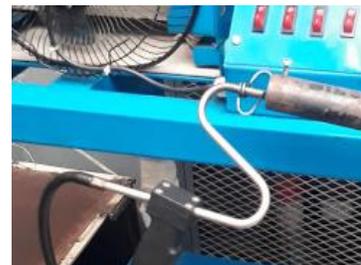


12. Reiniciar el analizador para una nueva prueba.



### 5.3.2 Para una carga del 20%.

1. Verificar y llenar la probeta a su nivel correspondiente (450 cm<sup>3</sup>).
2. Cerrar la primera resistencia de cada línea en la caja de control de resistencias las cuales equivalen al 20% de carga (R1-R6).
3. Activar el interruptor ubicado en la caja de control de resistencia para activar el ventilador para permitir la refrigeración en el interior de la caja de resistencias.
4. Mantener el motor a régimen nominal de 3600 RPM (60Hz).
5. Introducir la sonda del analizador de gases en el tubo de escape.



6. Dejar la sonda por 5 minutos.



7. Registrar los datos brindados por analizador de gases en un intervalo de cada 60 segundos por 5 minutos de las variables de CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HC,  $\lambda$ .



8. Verificar y registrar el consumo del combustible mediante la medición proporcionada por la probeta en los intervalos de tiempo.



9. Registrar los datos de los instrumentos de medición del tablero de las variables de amperaje, voltaje y frecuencia de las líneas A y B y la temperatura arrojada.



10. Retirar la sonda del tubo de escape.



11. Realizar limpieza de la sonda para evitar la existencia de residuos al interior de ella.

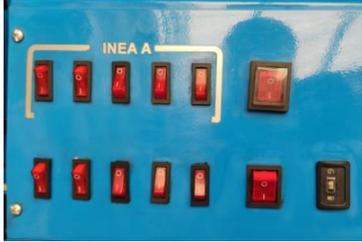
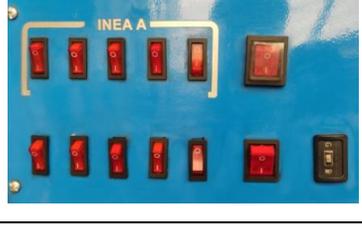


12. Reiniciar el analizador para una nueva prueba.



El anterior procedimiento se repite para las cargas de 40, 60, 80 y 100%, con la diferencia de que en cada carga se deben cerrar de dos en dos resistencias hasta conseguir que todas las resistencias queden activadas, tal como se hace referencia en la *Tabla 56*.

*Tabla 56. Resistencias por activar con respecto a la carga.  
Fuente: Autor.*

<b>Carga [%]</b>	<b>Resistencias por activar Línea A</b>	<b>Resistencias por activar Línea B</b>	<b>Ilustración</b>
40	R1, R2	R6, R7	
60	R1, R2, R3	R6, R7, R8	
80	R1, R2, R3, R4	R6, R7, R8, R9	

100	R1, R2, R3, R4, R5	R6, R7, R8, R9, R10	
-----	-----------------------	------------------------	---

#### 5.4 Transcurso de Gasolina a GLP.

1. Verificar que en la caja de control todas las resistencias se encuentren abiertas, de no ser así, desactivar las resistencias cerradas.
  
2. Desactivar el ventilador.
  
3. Reducir las revoluciones del motor a un nivel de régimen de ralentí.
  
4. Cerrar el paso de la gasolina y dejar que el combustible almacenado en la cuba del carburador se consuma mientras se lleva a cabo el cambio de combustible.



- Realizar la conexión de la manguera del banco al cilindro que almacena el GLP.



- Abrir la válvula de paso del cilindro.



- Presionar el interruptor de color negro ubicado en la caja de control de resistencias hasta conseguir que se indique que se está trabajando a Gas.



- Desplazar el variador de combustible lentamente hacia el símbolo correspondiente a Gas, con el fin de evitar un cambio brusco en el motor



- Atrasar el ángulo de encendido para permitir el óptimo trabajo del motor.



10. De esta manera empezamos a trabajar con combustible del GLP.



## 5.5 Pruebas con GLP.

### 5.5.1 Para una carga del 0%.

1. Tomar medición de la humedad relativa del ambiente.



2. Verificar el peso del cilindro por medio de la báscula para conocer la cantidad de masa que va ingresando al cilindro.



3. Acelerar el motor a régimen nominal de 3600 RPM.



4. Posicionar el avance de la chispa en el ángulo de 28° (ángulo óptimo para GLP).



5. Programar el analizador para registrar los gases producidos por la combustión del GLP.



6. Introducir la sonda del analizador de gases en el tubo de escape.



7. Registrar los datos brindados por analizador en un intervalo de cada 60 segundos por 5 minutos de las variables de CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HC, λ.



8. Registrar los datos de los instrumentos de medición del tablero de las variables de amperaje, voltaje y frecuencia de las líneas A y B al igual que la temperatura arrojada.



9. Retirar la sonda del tubo de escape.



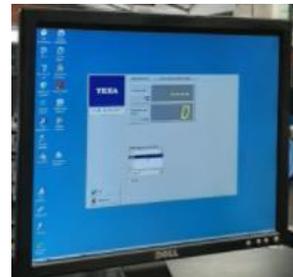
10. Verificar el consumo del combustible mediante la medición proporcionada por el contador y la báscula al final de cada prueba.



11. Realizar limpieza de la sonda para evitar la existencia de residuos al interior de ella.



12. Reiniciar el analizador para una nueva prueba.



### 5.5.2 Para una carga del 20%.

1. Verificar el peso del cilindro por medio de una báscula.



2. Cerrar la primera resistencia de cada línea en la caja de control de resistencias las cuales equivalen al 20% de carga (R1-R6).



3. Activar el interruptor ubicado en la caja de control de resistencia para activar el ventilador para permitir la refrigeración en el interior de la caja de resistencias.



4. Mantener el motor a régimen nominal de 3600 RPM (60Hz).



5. Introducir la sonda del analizador de gases en el tubo de escape.



6. Dejar la sonda por 5 minutos



7. Registrar los datos brindados por analizador en un intervalo de cada 60 segundos por 5 minutos de las variables de CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HC,  $\lambda$ .



8. Registrar los datos de los instrumentos de medición del tablero de las variables de amperaje, voltaje y frecuencia de las líneas A y B y la temperatura arrojada.



9. Retirar la sonda del tubo de escape.



10. Verificar el consumo del combustible mediante la medición proporcionada por el contador y la báscula al final de cada prueba.



11. Realizar limpieza de la sonda para evitar la existencia de residuos al interior de ella.



12. Reiniciar el analizador para una nueva prueba.



El anterior procedimiento se repite para las cargas de 40, 60, 80 y 100%, con la diferencia de que en cada carga se deben cerrar de dos en dos resistencias hasta conseguir que todas las resistencias queden activadas, tal como se hace referencia en la *Tabla 42*.

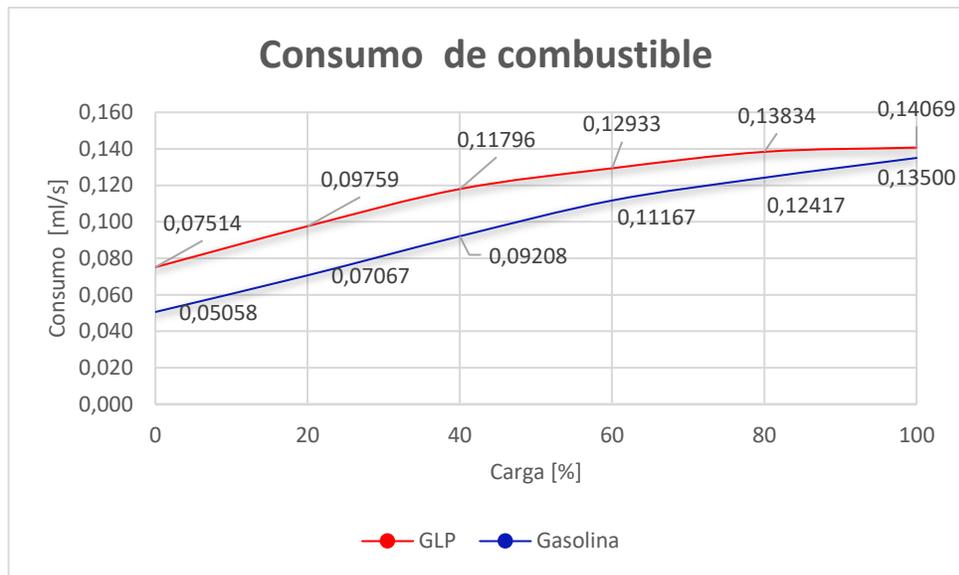
## **6 Análisis de Resultados.**

En este capítulo se recopila los datos del análisis del comportamiento térmico del banco cuando es operado con los diferentes combustibles, empleando un ángulo de avance fijo de 32° y 28° para gasolina y GLP, evaluando las diferentes variables para determinar la eficiencia del banco para cada carburante.

Mediante el proceso experimental mencionado anteriormente en el capítulo 5, se desarrollaron seis réplicas de las cuales tres pertenecen al combustible de gasolina y tres al combustible de GLP. Posteriormente se promediaron los resultados obtenidos de cada conjunto de replicas analizado, consiguiendo de esta forma presentar las gráficas que se muestran a continuación.

### **6.1 Consumo de combustible.**

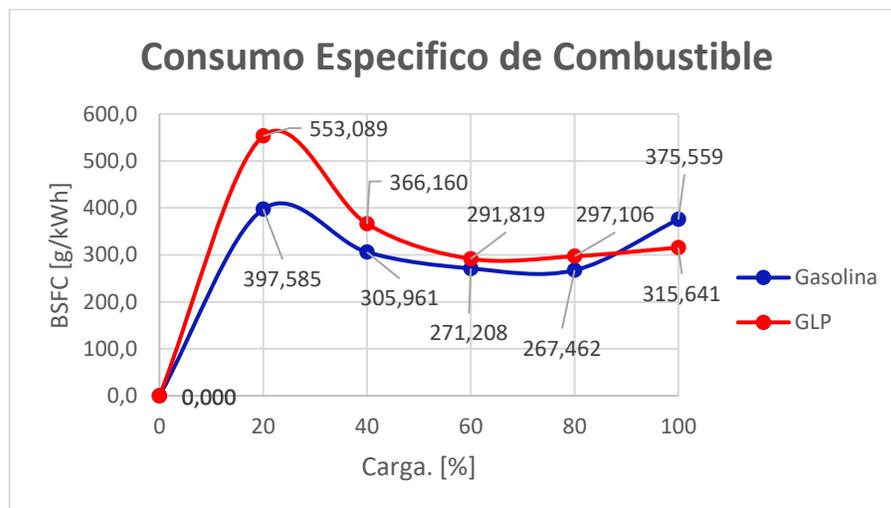
La *Gráfica 3* enseña los resultados obtenidos del consumo de combustible como función del porcentaje de carga eléctrica empleada para él trabajó del banco. Al realizar la comparación entre el combustible líquido y el combustible gaseoso, se visualiza que el consumo del GLP es mayor en todos los grados de carga.



Gráfica 3. Consumo de Combustible.  
Fuente: Autor.

## 6.2 Consumo de combustible específico.

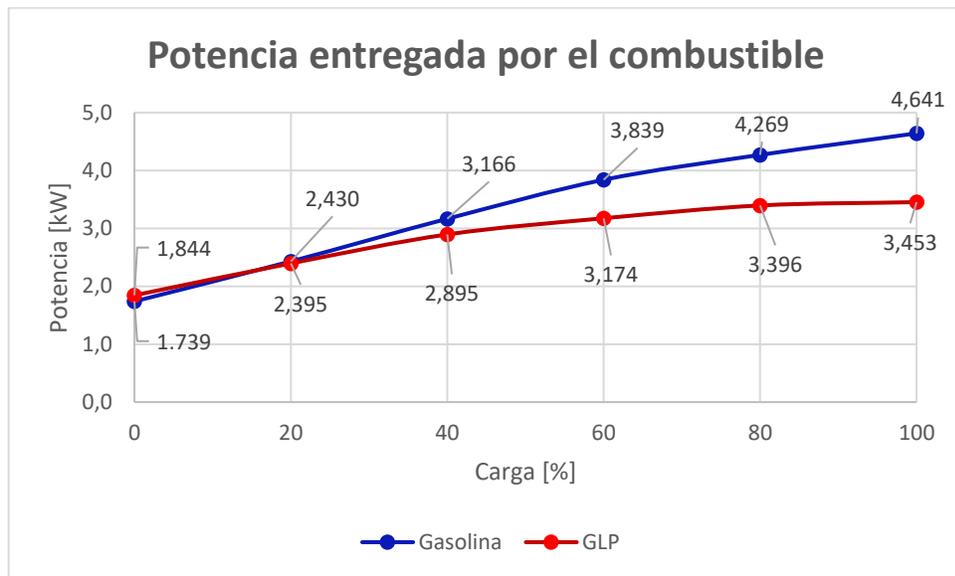
En la *Gráfica 4*, se evidencia el comportamiento del consumo de los combustibles, donde se logra apreciar que la gasolina presenta un mayor gasto después del 20% de carga en comparación con el GLP, debido a que la fracción de masa del GLP es menor que la de la gasolina, por tal razón, la energía aportada por el GLP es menor.



Gráfica 4. Consumo Especifico de Combustible en función del porcentaje de carga.  
Fuente: Autor.

### 6.3 Calor Liberado.

Mediante la literatura fue posible comprobar el poder calorífico de cada combustible en Colombia, obteniendo que el poder calorífico inferior de la gasolina presenta un valor de 46522 kJ/kg [6], mientras que el poder calorífico inferior para el GLP es de 45879 kJ/kg [41]; Lo cual se evidencia en la *Gráfica 5*, donde se visualiza que a medida que aumenta la carga de generación, el calor liberado por la gasolina es mayor en comparación con el GLP en el porcentaje del 20, 40, 60, 80 y 100%.



Gráfica 5. Calor Liberado y/o Potencia entregada por el combustible.  
Fuente: Autor.

### 6.4 Balance energético Gasolina.

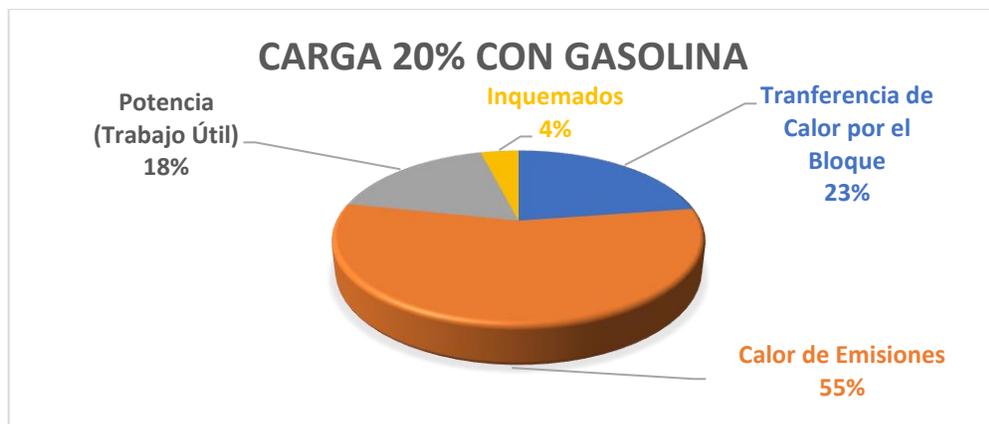
Conociendo el calor liberado producto de la combustión de la gasolina, se determina el balance energético para cada una de las cargas eléctricas, donde se evidencia como se distribuye la energía en el proceso de funcionamiento.

En la *Gráfica 7* se presenta los resultados obtenidos en el balance de energía cuando el motor opera con gasolina y a cero por ciento de carga, visualizando que se presenta un 76% de pérdida de calor en las emisiones, 20% en la transferencia y 4% en los inquemados.



Gráfica 6. Balance energético en gasolina con carga del 0%.  
Fuente: Autor.

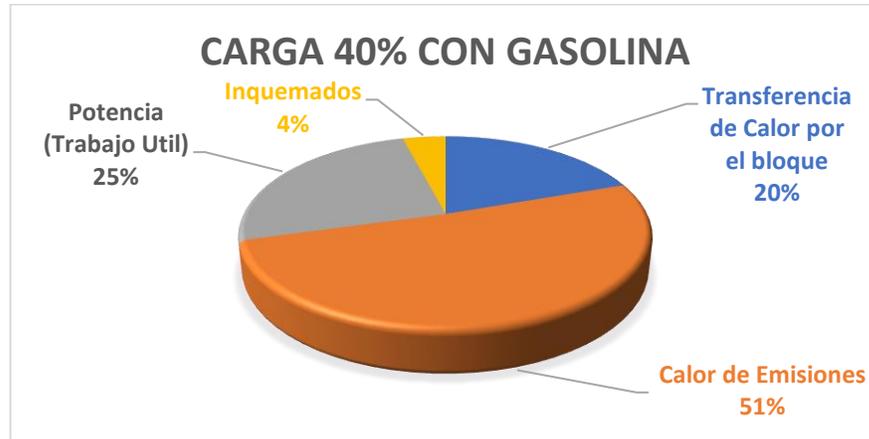
En la Gráfica 8 se visualiza la distribución de la energía entregada por el combustible cuando opera a un veinte por ciento de carga donde solo es aprovechada 18%, el resto de la energía se convierte en pérdidas distribuidas en el calor de las emisiones y en la transferencia de calor por las aletas del bloque.



Gráfica 7. Balance energético en gasolina con carga del 20%.  
Fuente: Autor.

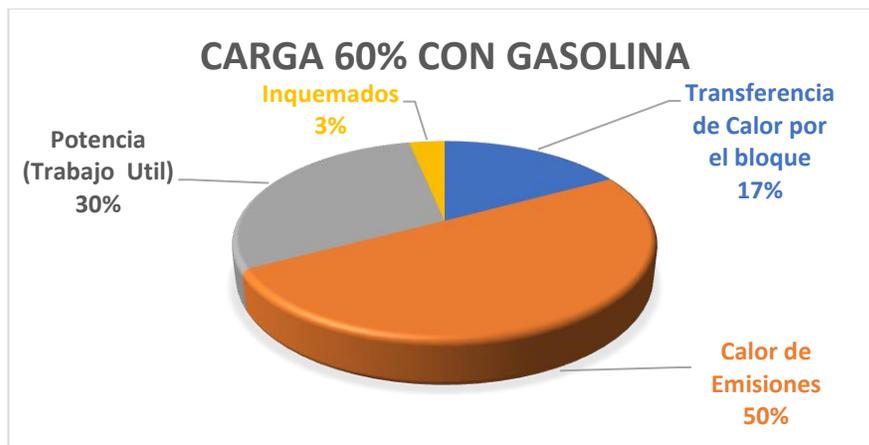
En la Gráfica 9 se muestran los resultados del balance de energía cuando se emplea el cuarenta por ciento de carga en el motor, se aprovecha el 25% de toda la energía suministrada que representa el trabajo eléctrico desarrollado por el generador,

mientras que el restante de energía se pierde en mayor cantidad por el calor de las emisiones, la transferencia de calor y los inquemados.



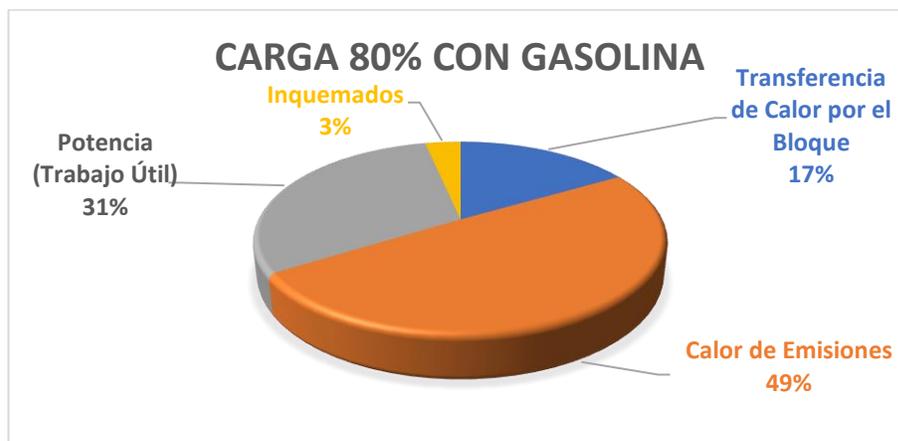
Gráfica 8. Balance energético en gasolina con carga del 40%.  
Fuente: Autor.

En la Gráfica 10 se aprecia la distribución de la energía suministrada por el uso de la gasolina con el sesenta por ciento de carga, donde se evidencia que aumenta a un 30% de la energía útil que es la destinada para la generación eléctrica en comparación con las gráficas anteriores, además en este porcentaje de carga se obtiene que el 50% de la energía proporcionada por el combustible se pierde por el calor suministrado a las emisiones.



Gráfica 9 Balance energético en gasolina con carga del 60%.  
Fuente: Autor.

En la *Gráfica 11* se publica el balance de energía con carga del ochenta por ciento donde se encuentra que en este punto de operación se presenta el mayor porcentaje de trabajo útil que aporta el motor, alcanzando el 31% de la energía liberada por el combustible, así mismo el porcentaje del calor liberado por las emisiones, los inquemados y la transferencia disminuye en comparación con las gráficas anteriormente mostradas.



*Gráfica 10. Balance energético en gasolina con carga del 80%.  
Fuente: Autor.*

En la *Gráfica 12* se logra apreciar el balance de la energía suministrada por el combustible cuando se emplea el cien por ciento de la carga, donde se evidencia una disminución en el trabajo útil obteniendo un valor del 27% y un aumento en el calor liberado por las emisiones y los inquemados con un valor del 52% y 4% respecto a la anterior gráfica.



Gráfica 11. Balance energético en gasolina con carga del 100%.  
Fuente: Autor.

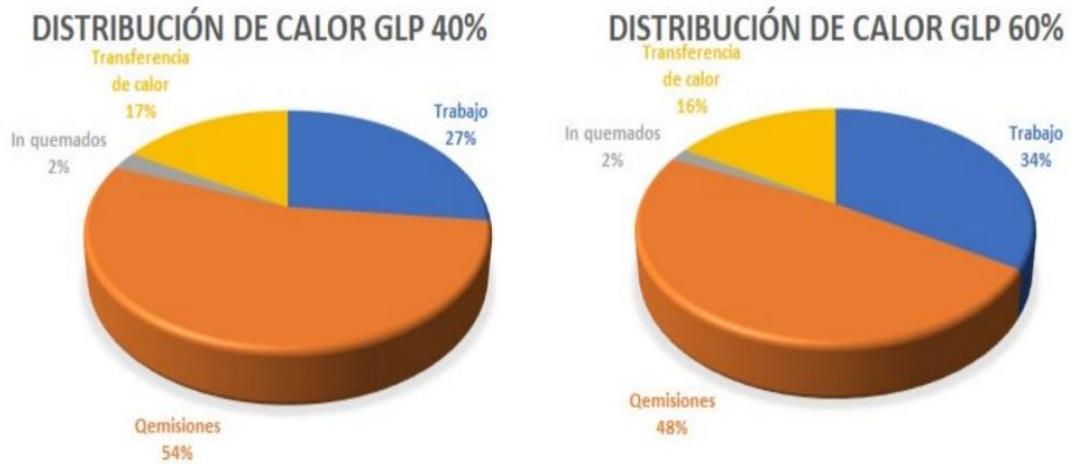
### 6.5 Distribución energética en el sistema con GLP.

La evaluación de la distribución térmica en la unidad electrógena al emplear el combustible alternativo GLP, se realiza con base en cuanta potencia de entrada (energía entregada por el combustible) se convierte en trabajo realizado, calor de los gases de escape, el calor perdido por transferencia de calor y calor perdido por Inquemados que son los productos no quemados durante la combustión. Durante el análisis es necesario recordar que el trabajo es inexistente sin carga como se evidencia en la Gráfica 13 y que el calor perdido por transferencia de calor se dio por convección y radiación.



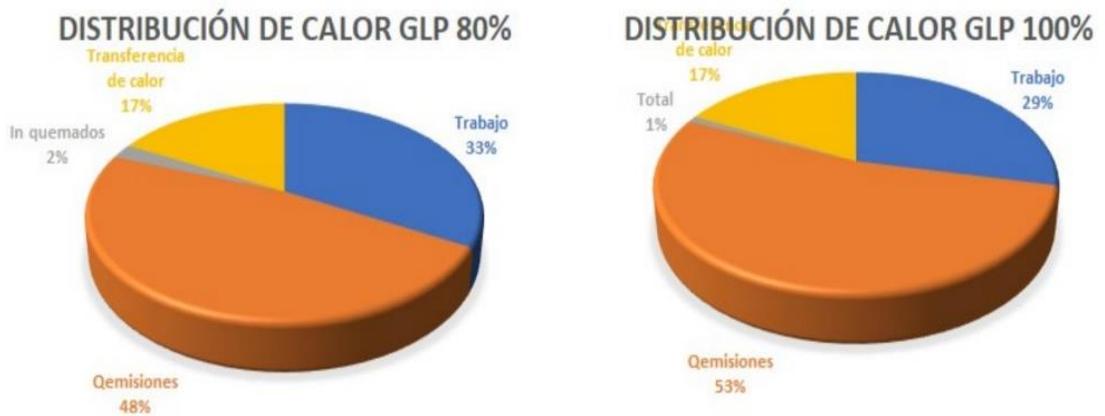
Gráfica 12. Distribución energética empleando GLP en función del porcentaje de carga al 0 y 20%.  
Fuente: Autor.

Según la *Gráfica 14* la cual muestra sobre la distribución de calor en el motor utilizando GLP, se refleja como la cantidad de Inquemados no supera el 5% para cada carga, así mismo como se pierde gran parte de la energía por el calor cedido a los gases de escape que ocupan un alto porcentaje.



*Gráfica 13. Distribución energética empleando GLP en función de la carga al 40 y 60%. Fuente: Autor.*

En este punto el calor de las emisiones toma un mayor valor que a diferentes cargas. Cómo se refleja en la *Gráfica 15* se disminuye el trabajo en la carga del 100% y aumenta los Inquemados la pérdida de calor por convección y radiación se mantiene en un rango entre el 15 al 20%

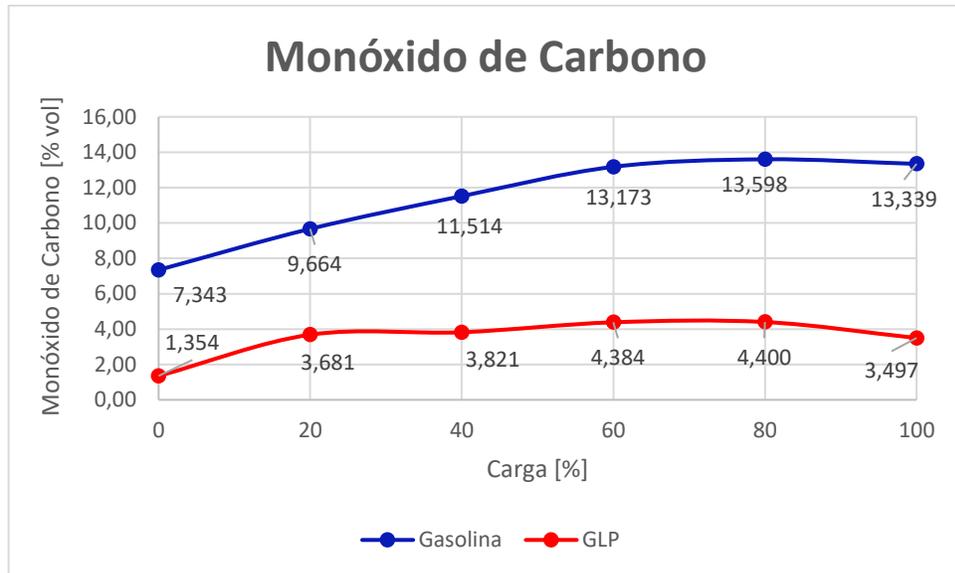


Gráfica 14. Distribución energética empleando GLP en función de la carga al 80 y 100%.  
Fuente: Autor.

La eficiencia del motor está en su mayor punto con una carga de 60% la cual llega a 34% muy parecida a la carga de 80% la cual es de 33%. Teniendo en cuenta esto y recordando las muestras de las emisiones de gases se establece que con una carga de 60% en la unidad electrógena trabaja en un estado óptimo.

## 6.6 Monóxido de Carbono

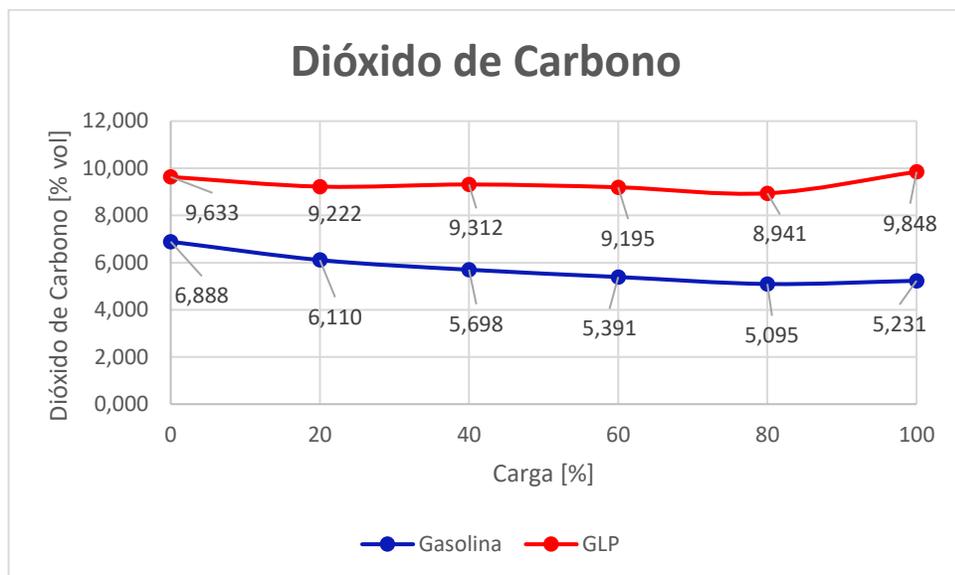
En la Gráfica 16 se evidencia el comportamiento del monóxido de carbono cuando se emplea los dos combustibles, observando que el CO generado por el GLP es menor que el producido por la gasolina a lo largo del aumento de la carga, esto es debido a la combustión incompleta que se presenta por las condiciones de la ciudad de Bogotá, lo cual demuestra que al emplear un combustible alternativo como lo es el GLP la huella de carbón disminuye considerablemente.



Gráfica 15. Monóxido de Carbono.  
Fuente: Autor.

#### 6.7 Dióxido de carbono.

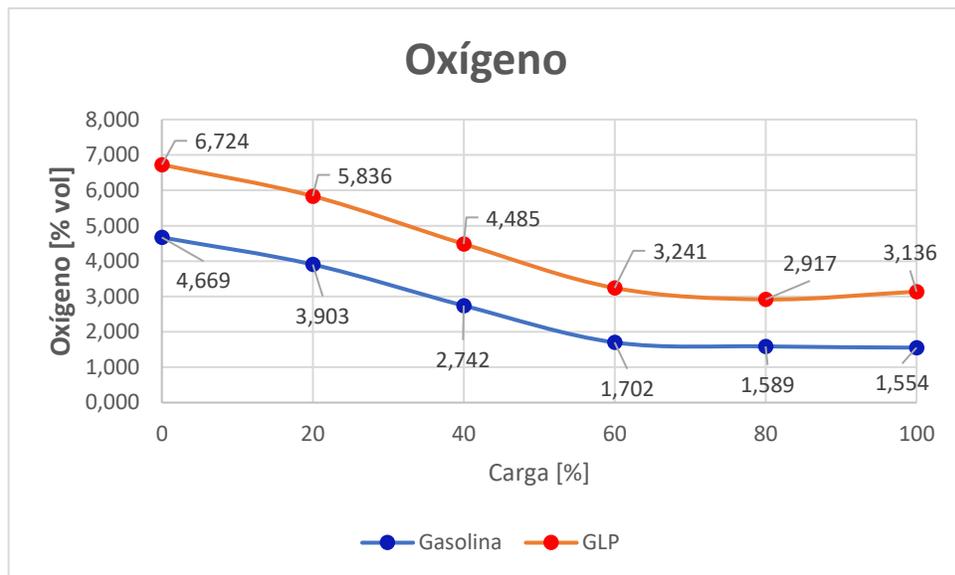
En la Gráfica 17 se visualiza que, el dióxido de carbono producido por el uso del GLP es mayor que el producido por la gasolina a lo largo del incremento de la carga eléctrica desarrollada por el generador, siendo conveniente para el medio ambiente por que indica que se produce una mejor combustión al emplear el combustible alternativo.



Gráfica 16. Dióxido de Carbono.  
Fuente: Autor.

## 6.8 Oxígeno.

En la *Gráfica 18*, se analiza que el comportamiento del oxígeno generado por el uso de ambos combustibles va decayendo a medida que aumenta el porcentaje de carga, además, el oxígeno generado por el uso del GLP es mayor que el producido por la gasolina debido a que se necesita mayor cantidad de aire cuando se emplea el combustible alternativo para que se produzca una óptima operación de la maquina térmica de combustión interna.

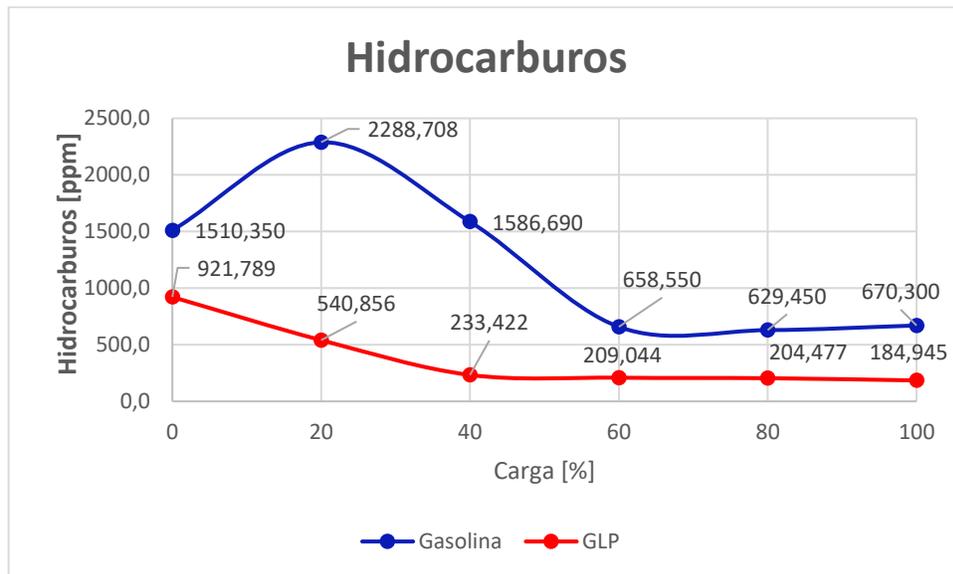


Gráfica 17. Oxígeno.  
Fuente: Autor.

## 6.9 Hidrocarburos

En la *Gráfica 19*, se puede observar la gran diferencia de hidrocarburos no quemados entre el combustible líquido gasolina y el combustible gaseoso GLP, siendo el de gasolina mayor. Adicionalmente se evidencia que para cargas inferiores al 60%, la magnitud de HC aumenta con respecto a cargas de 0%, 20% y 40% dando a conocer si la mezcla es rica o pobre. La mezcla aire - gasolina para los casos dónde los hidrocarburos son mayores que 1000 es rica ya que se encuentra mayor cantidad de combustible que de aire, por el contrario, la mezcla aire - GLP para cargas dónde los HC es baja da a conocer que hay más aire que combustible convirtiéndola en mezcla pobre.

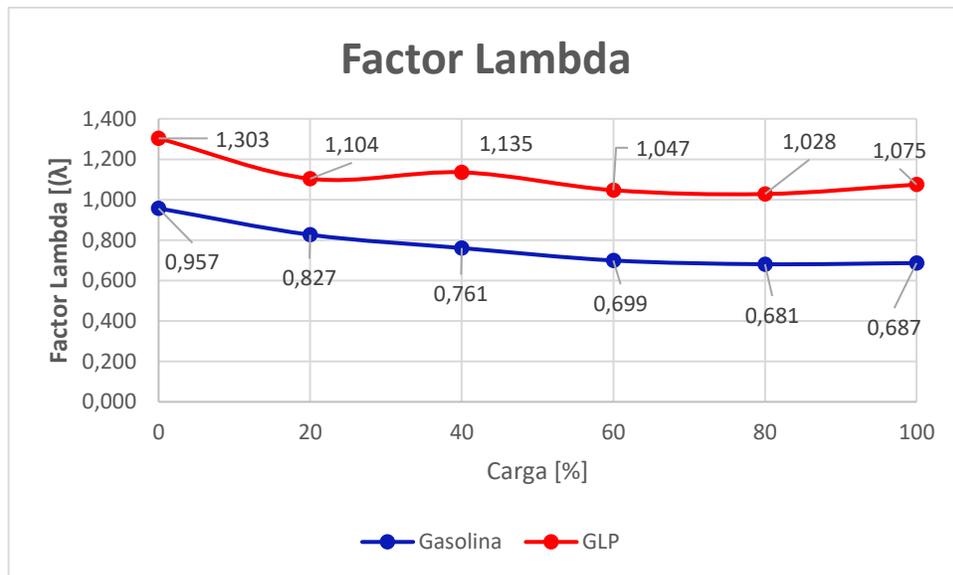
Finalmente se logra destacar que al trabajar con cargas de 60%, 80% y 100% para los dos combustibles los hidrocarburos se encuentran en un rango similar, disminuyendo la huella de carbón.



Gráfica 18. Hidrocarburos.  
Fuente: Autor.

### 6.10 Factor Lambda

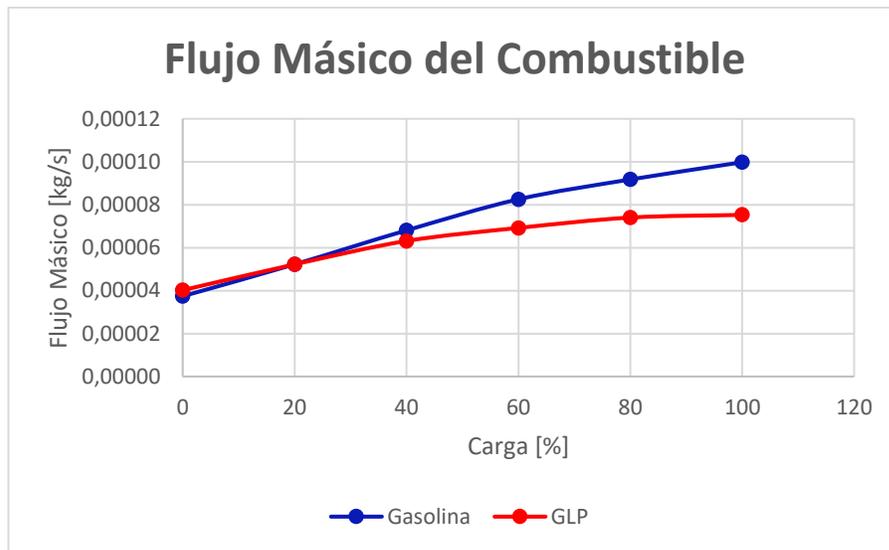
En la Gráfica 20 se evidencia el comportamiento que presenta la relación aire combustible para cada carburante, al analizar la gasolina se visualiza que después del 0% de carga, la mezcla se vuelve rica, es decir ingresa una mayor de cantidad combustible que de aire, y en el caso del GLP la mezcla aire combustible es pobre a lo largo del incremento de carga debido a que se presenta una mayor parte de aire que de combustible en el interior de la cámara de combustión.



Gráfica 19. Factor Lambda.  
Fuente: Autor.

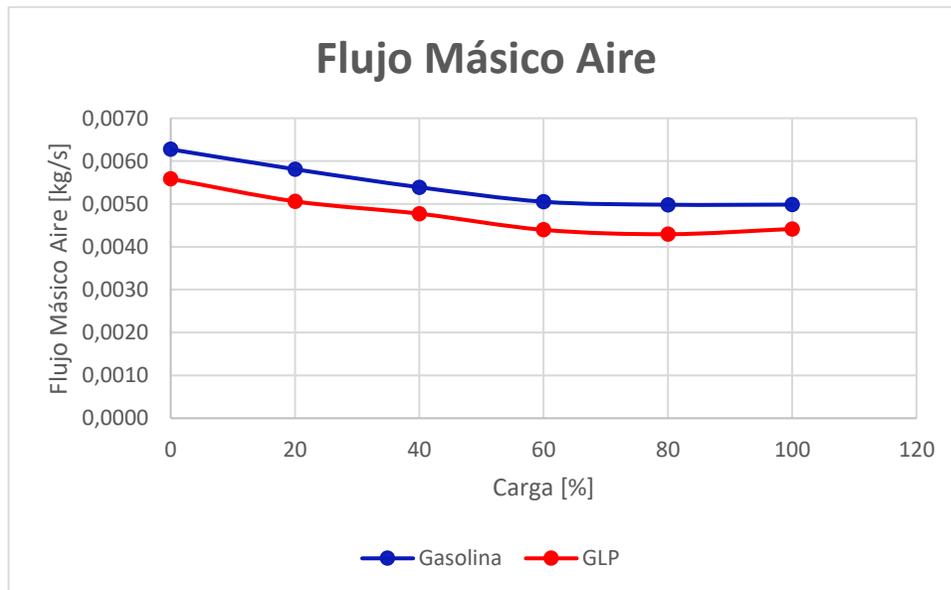
### 6.11 Consumo del flujo masico de los combustibles.

En la *Gráfica 21* se observa cómo aumenta después del 40% de carga el flujo másico de la gasolina en comparación del GLP y continua en aumento en proporción del incremento del porcentaje de carga debido a que a mayor carga mayor demanda de combustible.



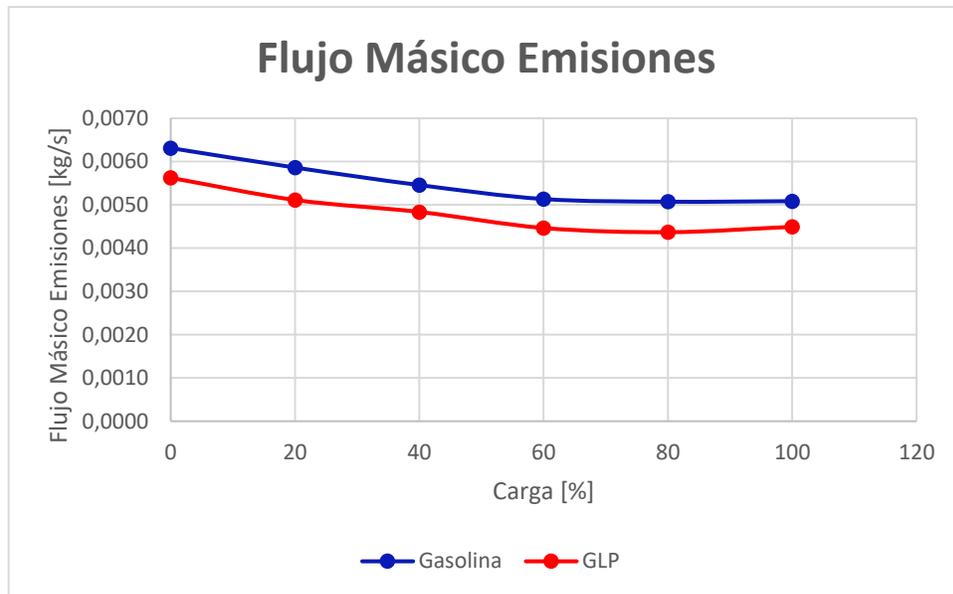
*Gráfica 20. Flujo Másico del combustible.  
Fuente: Autor.*

En la *Gráfica 22* se evidencia la diferencia de flujo másico del aire para cada combustible, la cual para la gasolina es mayor para realizar una mejor mezcla estequiométrica debido a la premezcla que se realiza en el carburador y a medida que aumenta la carga, la cantidad de flujo másico disminuye para ambos combustibles.



*Gráfica 21. Flujo Másico Aire.  
Fuente: Aire.*

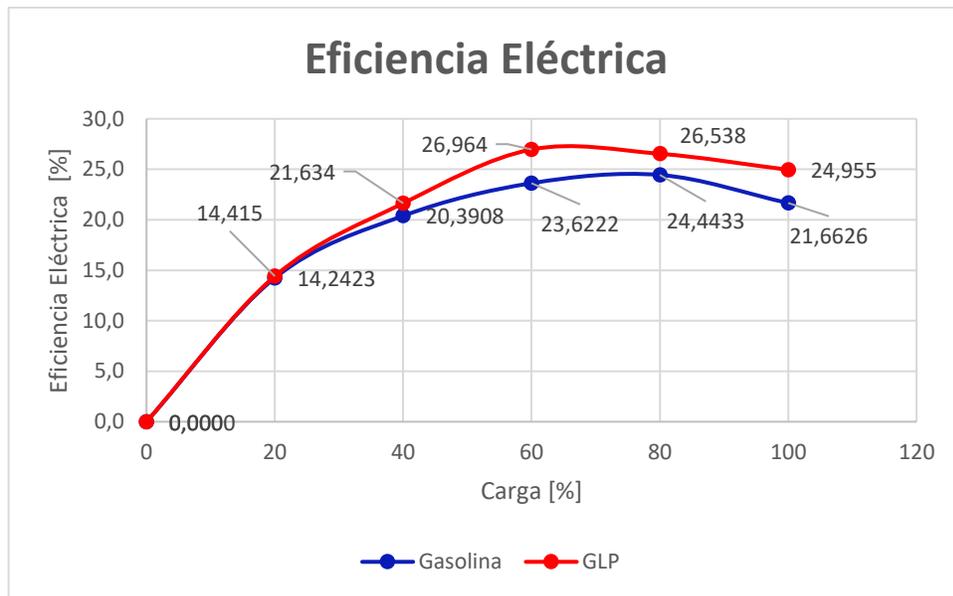
Finalmente, en la *Gráfica 23* se observa que el flujo masico de emisiones para ambos combustibles presentan una leve disminución a medida que aumenta la carga, donde se evidencia que la cantidad de emisiones generadas por la gasolina es mayor que las emitidas por el GLP.



*Gráfica 22. Flujo Másico Emisiones.  
Fuente: Autor.*

## 6.12 Eficiencia Eléctrica.

En la *Gráfica 24* se demuestra un aumento de eficiencia eléctrica con combustible gaseoso llegando a su punto máximo en 60% para el GLP y 80% en gasolina, donde la eficiencia eléctrica es del 33.705% y del 30.85% respectivamente. Recordando que el motor al trabajar con GLP presenta un ángulo de encendido de 28° y cuando funciona con gasolina a 32° según lo trazado en el capítulo 3.



*Gráfica 23. Eficiencia Eléctrica en función de la carga de generación.  
Fuente: Autor.*

## 7 Conclusiones.

- Se realizó la revisión del estado del arte para llevar a cabo la puesta a punto del motor mono cilíndrico para cada combustible analizado, adquiriendo de la literatura el manual de usuario del motor y las características de los combustibles utilizados, extrayendo el poder calorífico inferior de la gasolina con un valor de 46522.5 kJ/kg y del GLP de 45879 kJ/kg, además del octanaje con valores de 83 y 110 octanos respectivamente.
- Se emplearon los términos suministrados por el manual del manejo del motor para la calibración de la holgura de las válvulas en condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá, variando el ángulo de avance de encendido para la valoración de los parámetros de consumo, potencia y emisiones contaminantes en diferentes regímenes de operación (régimen de ralentí, régimen crucero sin carga y régimen de crucero con carga) evaluando los datos según la normativa descrita, para finalmente trabajar con el combustible base en un ángulo de avance de encendido de 32° y el alternativo en un ángulo de avance de encendido de 28° debido al octanaje de los combustibles. El cambio del ángulo de encendido se realiza en atraso cuando el giro del variador del ángulo es en dirección contraria a las manecillas del reloj y el adelanto de chispa se realiza en dirección a las manecillas del reloj llegando a un máximo de 40° según el reglaje
- Basados en la normatividad expuesta, se estableció el protocolo para el desarrollo de las pruebas minimizando el margen de error presentado durante la toma de datos, disminuyendo así la accidentalidad que se pueda presentar durante la manipulación del banco.

- Se llevo a cabo las pruebas comparativas teniendo en cuenta las condiciones ambientales suministradas por el IDEAM; empleando los combustibles analizados con sus respectivos ángulos de avance de encendido, recopilando los datos de interés para establecer el comportamiento de los parámetros en función del incremento del porcentaje de la carga de generación, evaluando así las variables de: la temperatura, el consumo de combustible, las emisiones generadas y el trabajo desarrollado.
- Dentro del análisis expuesto en gasolina se logró determinar el valor máximo de eficiencia de 30.55% que ostenta en la carga del 80%, evidenciando un elevado consumo de combustible además del incremento de CO e Hidrocarburos en este grado de carga con respecto al GLP, debido a la combustión incompleta que se presenta al interior de la cámara de combustión, generando un mayor índice de Inquemados a lo largo de la réplica. Para estipular un cálculo correcto del torque y la potencia mecánica es necesario un modelo basado en la línea de william y el uso de un dinamómetro para concretar las fuerzas que actúan en el cigüeñal del motor, obteniendo así una clara comparación del torque desarrollado para cada combustible.
- Se establece una eficiencia de 33.705% en GLP con carga al 60% donde se presenta una mezcla pobre, así como la disminución la huella de carbono y menor perdida de energía por transferencia de calor en el sistema, logrando establecer que se obtiene un mayor trabajo útil al emplear el combustible alternativo que el combustible base.
- En este sentido se realizó el plan experimental para reducir los riesgos durante el desarrollo de las pruebas exponiendo el paso a paso que se debe seguir para una toma de datos eficaz y para preservación del equipo.

## **8 Recomendaciones.**

- Para minimizar los riesgos que se puedan presentar en el manejo del equipo se deben cumplir a cabalidad con los pasos descritos para la toma de datos, según la prueba que se realice, los cuales se encuentran descritos en capítulo 5 del presente documento.
- Para disminuir el margen de error que se pueda presentar en la toma de datos, se recomienda dejar el motor en operación ralenti hasta que alcance una óptima temperatura.
- Se recomienda que en las pruebas que se realicen no se alteren los proveedores de combustible, debido a que el producto de cada compañía comercializadora de combustible difiere en el análisis de los datos, ya sea de gasolina o de GLP, por que incide la calidad de estos en el funcionamiento del motor. Además, no es recomendable utilizar combustibles de dudosa procedencia o de proveedores no reconocidos en el mercado por cuidado del equipo.
- Si se siguiese empleado GLP como combustible se recomendaría reforzar los asientos de las válvulas, debido a que cuando se emplea este carburante, los conductos de admisión y escape se ven sometidos a un mayor esfuerzo térmico en comparación con la gasolina, produciendo pequeñas fracturas que se verán representadas en pérdidas de compresión.
- Las pruebas realizadas con variantes de temperatura ambiental y presión atmosférica deben tomarse en cuenta el factor de corrección  $k$  estipulado en la normatividad DIN, el cual considera los cambios de la temperatura en °C y la presión atmosférica en mmHg.

- Para evitar un mayor índice de desgaste en el motor es necesaria el cambio de encendido por un encendido electrónico, adicionalmente se recomienda simplificar la toma de la temperatura superficial con la instalación de sensores de temperatura en la superficie del motor demostrando el gradiente de temperatura por medio de su configuración electrónica.

## 9 Anexos.

Anexo 1. Formato para recopilación de datos.

COMBUSTIBLE			FECHA:			
HORA:		TEMP AMB		HR		
RESPONSABLE:						
						
			%			
SECUEN	LINEA A			LINEA B		
	A	V	Hz	A	V	Hz
INICIO						
1						
2						
3						
4						
5						

			%			
SECUEN	LINEA A			LINEA B		
	A	V	Hz	A	V	Hz
INICIO						
1						
2						
3						
4						
5						

			%			
SECUEN	LINEA A			LINEA B		
	A	V	Hz	A	V	Hz
INICIO						
1						
2						
3						
4						
5						

						%	
SECUEN	LINEA A			LINEA B			
	A	V	Hz	A	V	Hz	
INICIO							
1							
2							
3							
4							
5							

						%	
SECUEN	LINEA A			LINEA B			
	A	V	Hz	A	V	Hz	
INICIO							
1							
2							
3							
4							
5							

						%	
SECUEN	LINEA A			LINEA B			
	A	V	Hz	A	V	Hz	
INICIO							
1							
2							
3							
4							
5							

SECUEN	CO % VOL	CO2 % VOL	O2 % VOL	HC PPM	%	
					LAMBDA λ	TEMPERAT °C
INICIO						
1						
2						
3						
4						
5						

SECUEN	CO % VOL	CO2 % VOL	O2 % VOL	HC PPM	%	
					LAMBDA λ	TEMPERAT °C
INICIO						
1						
2						
3						
4						
5						

SECUEN	CO % VOL	CO2 % VOL	O2 % VOL	HC PPM	%	
					LAMBDA λ	TEMPERAT °C
INICIO						
1						
2						
3						
4						
5						

COMBUSTIBLE		FECHA:	
-------------	--	--------	--

HORA:		TEMP AMB		HR	
-------	--	----------	--	----	--

RESPONSABLE:

CARGA		%		CARGA		%
-------	--	---	---	-------	--	---

SECUENCIA	LECTURA	CONSUMO
INICIO		
1		
2		
3		
4		
5		

CARGA		%
-------	--	---

SECUENCIA	LECTURA	CONSUMO
INICIO		
1		
2		
3		
4		
5		

CARGA		%
-------	--	---

SECUENCIA	LECTURA	CONSUMO
INICIO		
1		
2		
3		
4		
5		

SECUENCIA	LECTURA	CONSUMO
INICIO		
1		
2		
3		
4		
5		

CARGA		%
-------	--	---

SECUENCIA	LECTURA	CONSUMO
INICIO		
1		
2		
3		
4		
5		

CARGA		%
-------	--	---

SECUENCIA	LECTURA	CONSUMO
INICIO		
1		
2		
3		
4		
5		

Anexo 2. Resultado de las réplicas desarrolladas.

Tabla 57. Datos de Réplicas Combustible Gasolina.

Fuente: Autor.

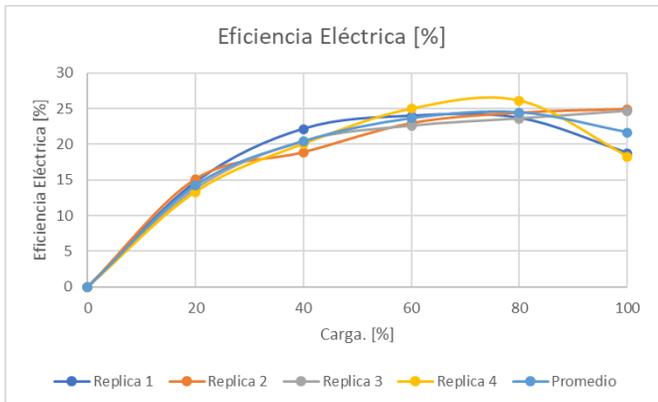
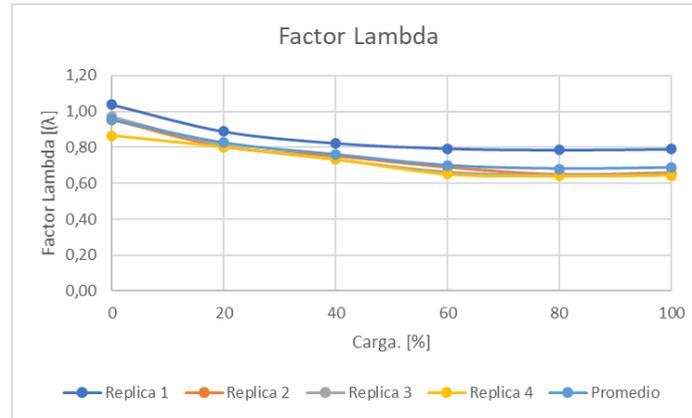
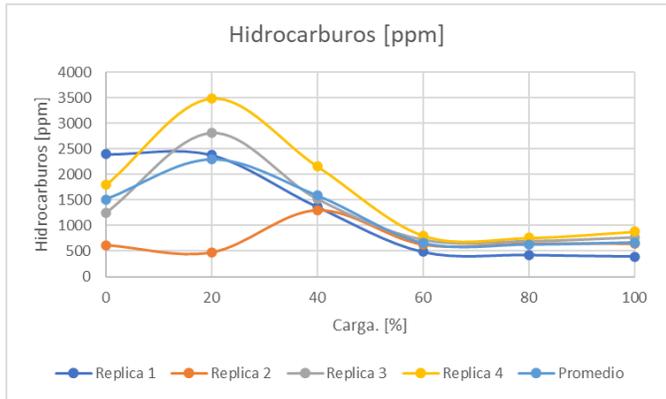
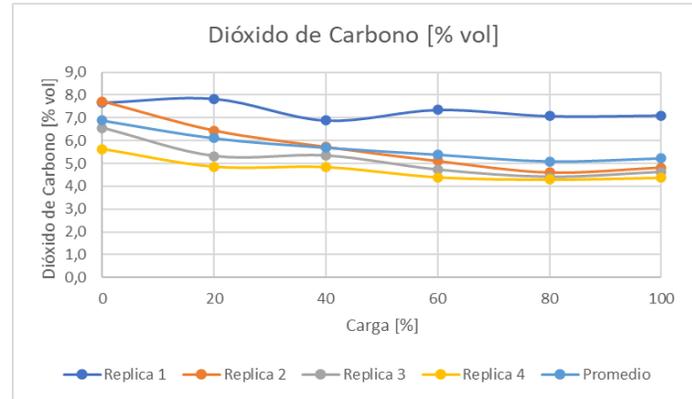
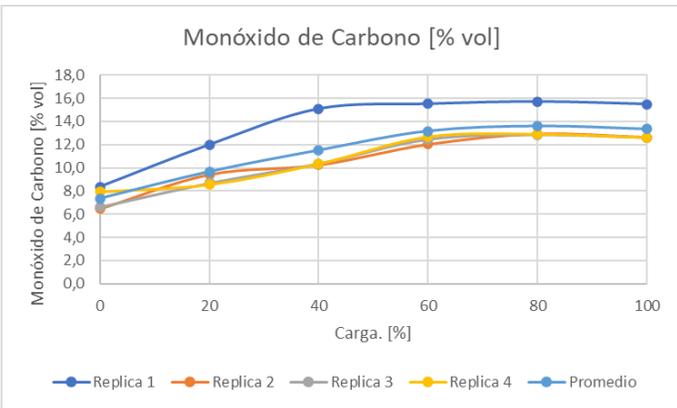
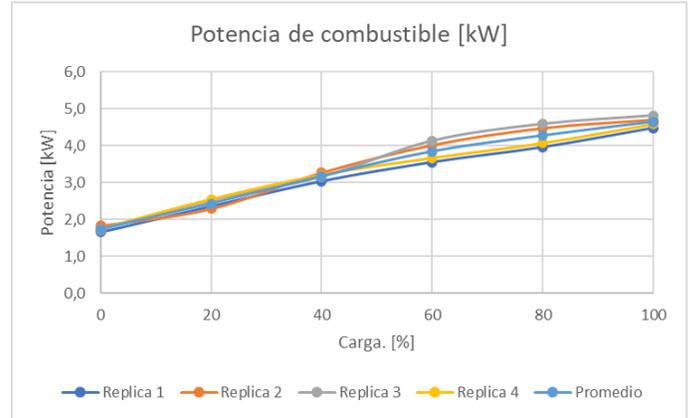
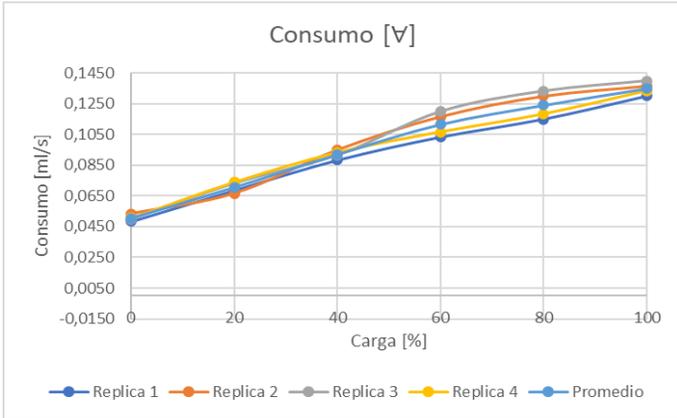
Replicas Combustible Gasolina.											
Carga [%]	Frecuencia [Hz]	Corriente [A]	Voltaje [V]	Potencia [kW]	Temperatura [°C]	Consumo [mL/s]	CO [%]	CO2 [%]	O2 [%]	HC [ppm]	Lambda [λ]
0	60,04	0	122,48	0	198,40	16	6,46	7,72	4,18	1239,8	0,95
0	60,02	0	123,04	0	211,00	15	6,62	6,56	4,87	1789,8	0,97
0	60,04	0	120,74	0	207,93	15,5	7,94	5,62	4,64	1510,3	0,86
20	60,01	3,68	117,8	433,504	229,00	20	9,41	6,44	2,85	2812,8	0,80
20	60	3,66	118,8	434,808	227,20	22	8,69	5,32	4,69	3489	0,84
20	60,3	3,68	115,16	423,789	224,76	22,5	8,57	4,86	5,07	2288,7	0,80
40	59,99	6,84	112,78	771,415	278,00	28,5	10,24	5,72	2,94	1519,6	0,75
40	60,1	7,22	111,62	805,896	280,60	27,5	10,37	5,34	2,87	2165,2	0,73
40	60,07	7,22	111,4	804,308	278,78	28	10,35	4,84	3,55	1286,6	0,73
60	60,06	10,528	109,38	1151,553	381,80	35	12,02	5,1	1,99	719	0,69
60	60,05	10,64	109,52	1165,293	308,20	36	12,47	4,72	1,92	802,2	0,66
60	59,98	10,54	108,58	1144,433	342,71	32	12,67	4,4	1,90	658,55	0,65
80	60,07	13,2	103,38	1364,616	414,20	39	12,92	4,6	1,78	691,6	0,65
80	60,09	13,26	102,02	1352,785	344,20	40	12,86	4,4	1,80	758,8	0,48
80	60,1	13,1	101,24	1326,244	377,64	35,5	12,89	4,3	1,72	629,45	0,64
100	60,08	15,44	94,84	1464,330	411,00	41	12,63	4,82	1,67	766,2	0,66
100	60,02	15,56	95,38	1484,113	442,40	42	12,63	4,62	1,74	880	0,65
100	60	13,22	79,26	1047,817	427,98	40	12,60	4,38	1,75	670,3	0,64

Tabla 58. Datos de Réplicas Combustible GLP.

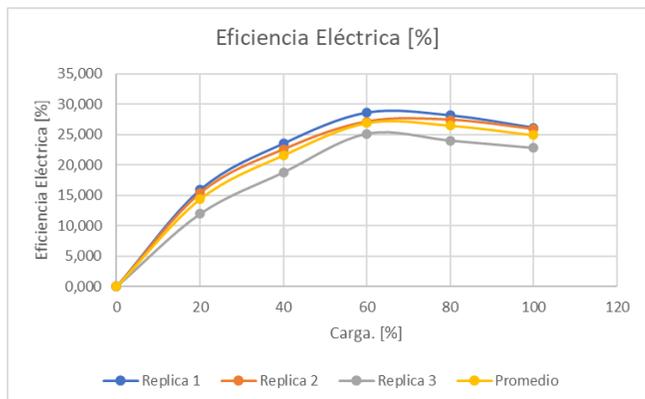
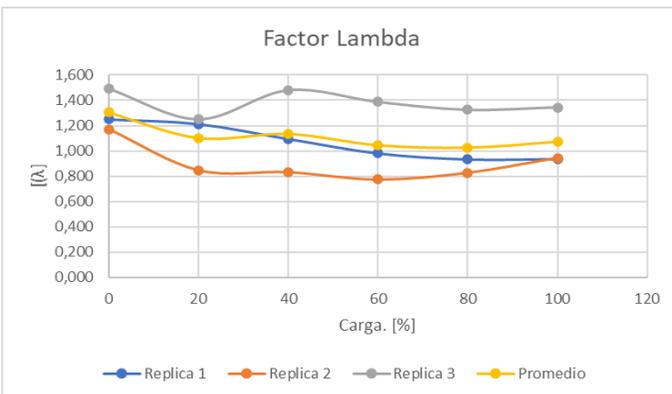
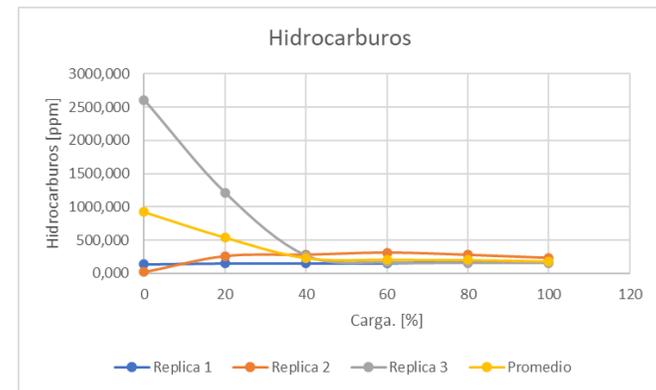
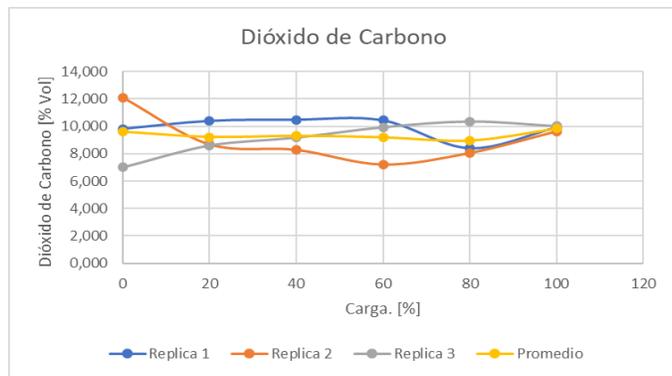
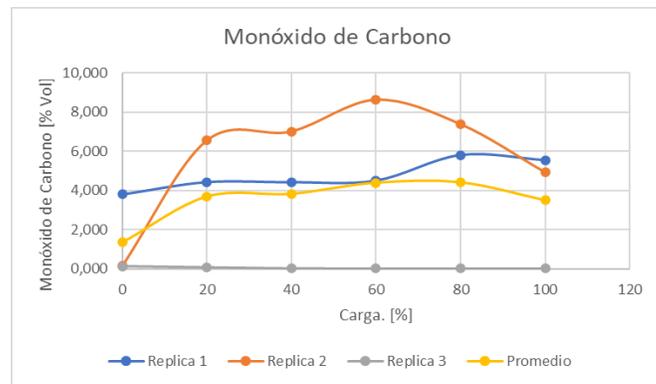
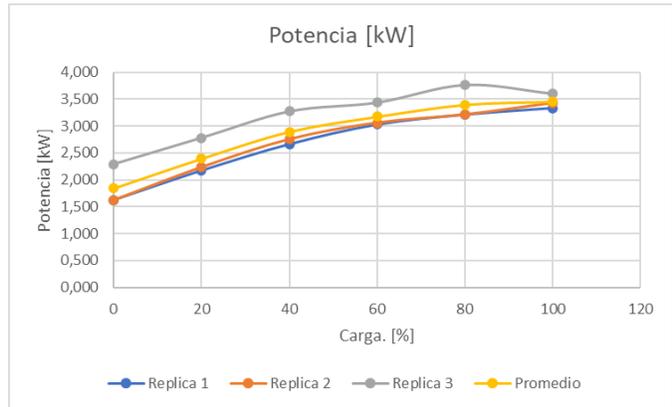
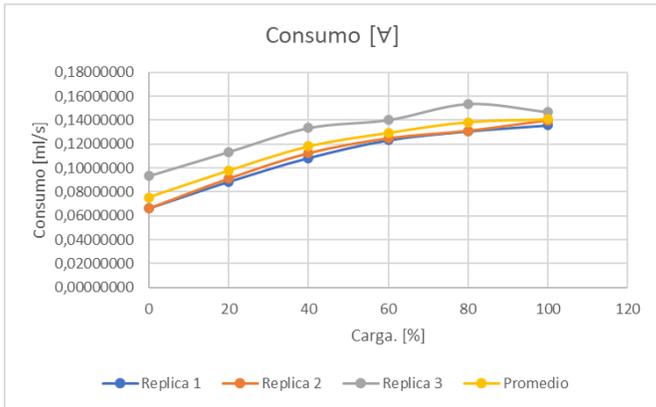
Fuente: Autor.

Replicas Combustible GLP.											
Carga [%]	Frecuencia [Hz]	Corriente [A]	Voltaje [V]	Potencia [kW]	Temperatura [°C]	Consumo [mL/s]	CO [%]	CO2 [%]	O2 [%]	HC [ppm]	Lambda [λ]
0	59,98	0	121,4	0	250,00	19,81	3,807	9,815	6,683	139,83	1,25
0	60,01	0	119,18	0	260,00	19,81	0,14	12,08	3,15	19,3	1,17
0	60,04	0	121,52	0	280,00	28	0,114	7	10,34	2606,2	1,49
20	59,95	3,7	116,6	431,42	265,00	26,54	4,432	10,38	6,86	151,5	1,213
20	60,09	3,7	116	429,2	295,00	27,29	6,542	8,683	1,487	260,66	0,848
20	60,23	3,6	115,66	416,376	299,00	34	0,07	8,6	9,162	1210,4	1,25
40	60	7,1	110,2	782,420	293,00	32,52	4,427	10,47	4,438	151,83	1,095
40	60,07	7,1	109,43	776,974	340,00	33,64	7,005	8,283	1,458	281,83	0,833
40	60,01	7,04	109,24	769,050	313,00	40	0,03	9,18	7,558	266,6	1,478
60	60,09	10,3	105,1	1082,530	320,00	37,01	4,51	10,42	1,892	151,83	0,98
60	60,03	10,067	103,06	1037,575	347,00	37,38	8,622	7,217	1,378	313,5	0,775
60	60	10,502	102,88	1080,446	320,00	42	0,02	9,94	6,454	161,8	1,386
80	60,08	12,1	93,4	1130,140	338,00	39,25	5,803	8,412	1,478	177,33	0,932
80	59,87	12,1	91,017	1101,306	358,00	39,25	7,378	8,05	1,608	279	0,828
80	60,04	12,16	92,96	1130,394	350,00	46	0,018	10,36	5,664	156,6	1,324
100	60,08	13,45	80,95	1088,778	352,00	40,75	5,547	9,908	1,458	164,66	0,935
100	60,1	13,53	82	1109,460	370,00	41,87	4,927	9,617	2,095	234,16	0,945
100	60,04	13,02	78,88	1027,018	345,00	44	0,018	10,02	5,856	156	1,344

### Anexo 3. Graficas Comparativas de réplicas de gasolina.



## Anexo 4. Graficas Comparativas de réplicas de GLP.



Anexo 5 Tabla de propiedades del aire a la presión de 1 atm.

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	$4.158 \times 10^{-6}$	$8.636 \times 10^{-6}$	$3.013 \times 10^{-6}$	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	$8.036 \times 10^{-6}$	$1.189 \times 10^{-6}$	$5.837 \times 10^{-6}$	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	$1.252 \times 10^{-5}$	$1.474 \times 10^{-5}$	$9.319 \times 10^{-6}$	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	$1.356 \times 10^{-5}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-5}$	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	$1.465 \times 10^{-5}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-5}$	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-5}$	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	$1.696 \times 10^{-5}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-5}$	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	$2.346 \times 10^{-5}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-5}$	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	$2.416 \times 10^{-5}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-5}$	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	$2.487 \times 10^{-5}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-5}$	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	$2.632 \times 10^{-5}$	$2.008 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-5}$	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	$2.780 \times 10^{-5}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-5}$	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	$2.931 \times 10^{-5}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-5}$	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	$3.086 \times 10^{-5}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-5}$	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	$3.243 \times 10^{-5}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-5}$	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	$3.565 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	$3.898 \times 10^{-5}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-5}$	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	$7.892 \times 10^{-5}$	$3.101 \times 10^{-5}$	$5.475 \times 10^{-5}$	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	$8.951 \times 10^{-5}$	$3.261 \times 10^{-5}$	$6.219 \times 10^{-5}$	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	$1.004 \times 10^{-4}$	$3.415 \times 10^{-5}$	$6.997 \times 10^{-5}$	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	$1.117 \times 10^{-4}$	$3.563 \times 10^{-5}$	$7.806 \times 10^{-5}$	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	$1.352 \times 10^{-4}$	$3.846 \times 10^{-5}$	$9.515 \times 10^{-5}$	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	$1.598 \times 10^{-4}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-4}$	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	$1.855 \times 10^{-4}$	$4.362 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-4}$	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	$2.122 \times 10^{-4}$	$4.600 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-4}$	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	$2.398 \times 10^{-4}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-4}$	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	$3.908 \times 10^{-4}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-4}$	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	$5.664 \times 10^{-4}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-4}$	0.7539

Anexo 6: Especificaciones técnicas motor Honda GX 270 9HP.

## MOTOR ESTACIONARIO HONDA GX270 POTENCIA 9 HP.

### Especificaciones Técnicas

#### CARACTERÍSTICAS

Cilindros	: Uno, Inclinado en 25°
Válvulas	: Sobre la culata OHV
Tipo de Eje	: Horizontal recto 25,4 mm Ø (1") con Chavetero
Refrigeración	: Aire Forzado
Lubricación	: Resalpique
Diámetro por carrera	: 77mm X 58mm
Desplazamiento	: 270 cc.
Potencia Máxima	: 9 Hp a 3.600 rpm *
Potencia Neta	: 8,5 Hp a 3600 rpm**
Potencia en Kw.	: 6,3 Kw.
Relacion compresión	: 8,5 : 1
Par motor máximo	: 19,1 Nm / 1,94 lb-ft a 2.500 rpm.
Arranque	: Manual - Piola retráctil
Encendido	: Transistorizado
Alerta de aceite	: Si
Filtro de aire	: Elemento Dual
Consumo específico de combustible	: 230 Grs./hp X Hr.

#### DIMENSIONES

Largo	: 38 Cms
Ancho	: 43 Cms
Alto	: 41 Cms
Peso Seco	: 25 Kg.
Deposito Combustible	: 5,3 Lts.
Autonomía	: 2,8 Hrs. Plena Carga
Carter de aceite	: 1.100 cc.

\* a 3,600rpm (potencia máxima), según norma SAE J1995

\*\* a 3,600rpm (potencia neta) según norma SAE J1349

#### DETALLES DEL MOTOR

Motor multipropósito, tiene eje horizontal de 25.4mm. (1") con chavetero, suave y cómodo arranque manual con piola retráctil, consumo eficiente de combustible, ideal para múltiples usos, con sensor de alerta de aceite.

**HONDA**  
The Power of Dreams



 **BAPER**

Chacabuco 778, Santiago - Chile



+ 56 22 682 5087

info@baper.net

## 10 Bibliografía

- [1] A. F. E. Sarmiento, «GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA OPERACIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA EN MODO DUAL CON GAS LICUADO DE PETRÓLEO E HIDRÓGENO», p. 114.
- [2] «Acolgen – Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica»,. <https://www.acolgen.org.co/> (accedido feb. 28, 2021).
- [3] «RESOLUCIÓN 910 DE 2008.pdf». Accedido: feb. 28, 2021. [En línea].  
Disponibile en:  
<http://www.bogotaturismo.gov.co/sites/intranet.bogotaturismo.gov.co/files/RESOLUCI%C3%93N%20910%20DE%202008.pdf>
- [4] «IPSE – Transformamos Territorios». [https://ipse.gov.co/?option=com\\_content&view=article&id=86&Itemid=521&lang=es](https://ipse.gov.co/?option=com_content&view=article&id=86&Itemid=521&lang=es) (accedido feb. 28, 2021).
- [5] G. E. Bejarano Tenza, J. I. Montaña Galán, y M. D. J. López, «Banco de pruebas para un motor de cuatro tiempos mono cilíndrico.» Universidad ECCI, 2019.
- [6] J. M. M. Gonzalez y B. J. A. Junco, «Evaluación experimental de un motor encendido por chispa que utiliza biogás como combustible», p. 11.
- [7] G. A. Zapata, «REPÚBLICA DE COLOMBIA Ministerio de Minas y Energía», p. 345.
- [8] «EL PETRÓLEO Y LA ENERGÍA EN LA ECONOMÍA - Los efectos económicos del encarecimiento del petróleo en la economía vasca», p. 298.
- [9] «TESIS.pdf». Accedido: feb. 28, 2021. [En línea]. Disponible en:  
<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/15855/TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [10] «Balance\_Minero\_Energetico\_2010.pdf». Accedido: feb. 28, 2021. [En línea].  
Disponibile en:  
[http://www.upme.gov.co/Docs/Balance\\_Minero\\_Energetico\\_2010.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/Balance_Minero_Energetico_2010.pdf)

- [11] M. Y. Sulaiman, M. R. Ayob, y I. Meran, «Performance of Single Cylinder Spark Ignition Engine Fueled by LPG», *Procedia Eng.*, vol. 53, pp. 579-585, ene. 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.02.074.
- [12] L. Li, Z. Wang, B. Deng, Y. Han, y H. Wang, «Combustion and Emissions Characteristics of a Small Spark-Ignited LPG Engine», SAE International, Warrendale, PA, SAE Technical Paper 2002-01-1738, may 2002. doi: 10.4271/2002-01-1738.
- [13] «p5sd7911.pdf». Accedido: feb. 28, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd7911.pdf>
- [14] E. F. C. Villamizar y R. S. Rodríguez, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRÁCTICAS EN MOTORES ELÉCTRICOS, COMO APOYO A LA ASIGNATURA DISEÑO DE MÁQUINAS II», p. 282, 2010.
- [15] R. D. A. A. José y M. D. Marta, *MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA*. Editorial UNED, 2015.
- [16] «descripcion\_motor\_cuatro\_tiempos.pdf». Accedido: feb. 28, 2021. [En línea]. Disponible en: [http://eps-online.es/pdfs/descripcion\\_motor\\_cuatro\\_tiempos.pdf](http://eps-online.es/pdfs/descripcion_motor_cuatro_tiempos.pdf)
- [17] «capitulo3.pdf». Accedido: feb. 28, 2021. [En línea]. Disponible en: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/cleto\\_o\\_ja/capitulo3.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/cleto_o_ja/capitulo3.pdf)
- [18] «oficiales-conductores-extremadura-temas-1-14-paginas-de-prueba.pdf». Accedido: feb. 28, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://www.editorialmeta.es/libros/extremadura/oficiales-conductores-extremadura-temas-1-14-paginas-de-prueba.pdf>
- [19] J. A. Rocha-Martinez, T. D. Navarrete-Gonzalez, C. G. Pavia-Miller, R. Paez-Hernandez, y F. Angulo-Brown, «Otto and Diesel engine models with cyclic variability», p. 7, 2002.
- [20] «CD-7578.pdf». Accedido: feb. 28, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17000/1/CD-7578.pdf>

- [21] L. C. Gómez León, *Motores I Guías de laboratorio*, 1.<sup>a</sup> ed. [En línea]. Disponible en: <https://editorial.ecci.edu.co/inicio/97-producto-virtual-prueba.html>
- [22] A. Álvarez Sánchez, «Análisis experimental de combustión y mejora de un motor CFR para la medición del Número de Octano», Accedido: may 25, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/reader/148692770>
- [23] F. P. González y J. M. D. Fernández, *Motores de combustión interna alternativos*. Editorial Reverte, 2011.
- [24] D. L. Donaire, «¿Qué es el avance de encendido?», *Actualidad Motor*, abr. 10, 2020. <https://www.actualidadmotor.com/que-es-el-avance-de-encendido/> (accedido feb. 28, 2021).
- [25] R. M. C. Bernal, L. F. M. Muñoz, M. D. M. Robledo, S. B. Castillo, y J. M. Bermúdez, «Diseño preliminar de un motor a pistón para un vehículo urbano empleado en la competencia Shell Eco-Marathon- Preliminary Design of a Piston Engine for an Urban Vehicle Used in the Competition Shell Eco-Marathon», *Ingenium Rev. Fac. Ing.*, vol. 17, n.º 34, Art. n.º 34, nov. 2016, doi: 10.21500/01247492.2739.
- [26] F. P. González y J. M. D. Fernández, *MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS*. Universitat Politècnica de València, 2011.
- [27] «Presentacion-ANDEMOS-Emisiones-01.25.2017-v8.pdf». Accedido: feb. 28, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://andemos.org/wp-content/uploads/2017/03/Presentacion-ANDEMOS-Emisiones-01.25.2017-v8.pdf>
- [28] «Grupos Electrógenos de Mages, Loren G. 978-84-267-0185-5». [https://www.todostuslibros.com/libros/grupos-electrogenos\\_978-84-267-0185-5](https://www.todostuslibros.com/libros/grupos-electrogenos_978-84-267-0185-5) (accedido may 31, 2021).
- [29] Y. A. Cengel, *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico*. McGraw-Hill, 2007.
- [30] «Tesis I. M. 599 - Miranda Pilatuña Kevin Alexander.pdf». Accedido: may 22, 2021. [En línea]. Disponible en:

- <http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/31427/1/Tesis%20I.%20M.%20599%20-%20Miranda%20Pilatu%20c3%b1a%20Kevin%20Alexander.pdf>
- [31] «329127754006.pdf». Accedido: mar. 10, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3291/329127754006.pdf>
- [32] V. S. Leal, «Estudio y evaluación del comportamiento energético del motor de un conjunto motogenerador operando con Gas Licuado de Petróleo (GLP) de alto butano», p. 111.
- [33] Ó. J. R. Mantilla, «El problema del octanaje en la gasolina colombiana: Opinión», *El Carro Colombiano*, ene. 19, 2015.  
<https://www.elcarrocolombiano.com/notas-de-interes/el-problema-del-octanaje-en-la-gasolina-colombiana/> (accedido feb. 28, 2021).
- [34] «¿Cuál es la fórmula química de la gasolina? - Quora».  
<https://es.quora.com/Cu%C3%A1l-es-la-f%C3%B3rmula-qu%C3%ADmica-de-la-gasolina> (accedido feb. 28, 2021).
- [35] «INFORME\_FINAL\_COMBUSTIBLES\_CONV\_392-2009.pdf». Accedido: feb. 28, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://minas.medellin.unal.edu.co/convenios/redaire/images/informes/unal/INFORME\\_FINAL\\_COMBUSTIBLES\\_CONV\\_392-2009.pdf](https://minas.medellin.unal.edu.co/convenios/redaire/images/informes/unal/INFORME_FINAL_COMBUSTIBLES_CONV_392-2009.pdf)
- [36] J. H. Arango, «Calidad de los combustibles en Colombia», *Rev. Ing.*, n.º 29, pp. 100-108, may 2009, doi: 10.16924/revinge.29.12.
- [37] «Informe final UPME DD Combustibles - VF.pdf». Accedido: feb. 28, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/1062/1/Informe%20final%20UPME%20DD%20Combustibles%20-%20VF.pdf>
- [38] A. E. Rangel Jiménez y C. J. Portilla Salazar, «El proceso de sustitución de combustibles pesados por gas natural en el sector industrial del Valle del Cauca y del Cauca - Colombia 2004-2012», *Apunt. CENES*, vol. 35, n.º 61, p. 237, ene. 2016, doi: 10.19053/22565779.4148.
- [39] Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey - Departamento de Ingeniería Química, P. Castillo-Hernández, A. Mendoza Domínguez, Instituto

Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey - Departamento de Ingeniería Química, P. Caballero-Mata, y Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey - Centro de Calidad Ambiental, «Análisis de las propiedades fisicoquímicas de gasolina y diesel mexicanos reformulados con Etanol», *Ing. Investig. Tecnol.*, vol. 13, n.º 3, pp. 293-306, jul. 2012, doi: 10.22201/fi.25940732e.2012.13n3.028.

- [40] «ANEXO\_1\_ESPECIFICACIONES\_DE.pdf». Accedido: feb. 28, 2021. [En línea]. Disponible en:  
[http://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/844/1/ANEXO\\_1\\_ESPECIFICACIONES\\_DE.PDF](http://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/844/1/ANEXO_1_ESPECIFICACIONES_DE.PDF)
- [41] C.-A. Forero-Núñez, J. Eduardo-Arango, y F.-E. Sierra-Vargas, «Evaluación energética de un sistema de generación de 400 kWe en modo diesel-gas licuado de petróleo/Energy analysis of a 400 kWe power system operated on dual fuel mode with diesel-liquefied petroleum gas», . *ISSN*, vol. 17, n.º 3, p. 11.
- [42] «ICONTEC e-Collection».  
<https://ecollection.icontec.org/normavw.aspx?ID=1259> (accedido mar. 11, 2021).
- [43] «ICONTEC e-Collection».  
<https://ecollection.icontec.org/normavw.aspx?ID=1176> (accedido mar. 11, 2021).
- [44] «nte\_inen\_iso\_8528-9.pdf». Accedido: mar. 11, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte\\_inen\\_iso\\_8528-9.pdf](https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_iso_8528-9.pdf)
- [45] «Centro de Tecnologías del transporte: Como se llega», *Centro de Tecnologías del transporte*.  
<http://tecnologiasdeltransporte.blogspot.com/p/como-se-llega.html> (accedido feb. 28, 2021).
- [46] «GX-270-GX-390-Castellano.pdf». Accedido: jun. 30, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.ayerbe.net/wp-content/uploads/2012/02/GX-270-GX-390-Castellano.pdf>

- [47] «20170724173645\_1\_ntc4983-gasolina.pdf». Accedido: feb. 28, 2021. [En línea]. Disponible en:  
[https://cdaelarauco.com/data/archivos/galerias/3/20170724173645\\_1\\_ntc4983-gasolina.pdf](https://cdaelarauco.com/data/archivos/galerias/3/20170724173645_1_ntc4983-gasolina.pdf)
- [48] «NTC\_5365.pdf». Accedido: feb. 28, 2021. [En línea]. Disponible en:  
[https://cdacertimotos.com.co/wp-content/uploads/2018/01/NTC\\_5365.pdf](https://cdacertimotos.com.co/wp-content/uploads/2018/01/NTC_5365.pdf)
- [49] Y. A. Çengel, *TERMODINAMICA*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2012.