



**Institución Universitaria**

**SISTEMA DE ACUMULACIÓN TÉRMICO PARA ACELERAR EL CALENTAMIENTO DE UN MOTOR  
DE CUATRO TIEMPOS EN LOS PRIMEROS CICLOS DE FUNCIONAMIENTO**

**Edison David Londoño Pimentel**

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de ingeniería

Medellín, Colombia

2016



**SISTEMA DE ACUMULACIÓN TÉRMICO PARA ACELERAR EL CALENTAMIENTO DE UN MOTOR DE CUATRO TIEMPOS EN LOS PRIMEROS CICLOS DE FUNCIONAMIENTO.**

**Edison David Londoño Pimentel**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Gestión Energética Industrial**

Director (a):

M.Sc. Karen Paola Cagua Madero

Línea de Investigación:

Eficiencia energética

Grupo de Investigación:

Materiales Avanzados y Energía MATyER

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de ingeniería

Medellín, Colombia

2016



**“Si las leyes de las matemáticas quieren ser la base de la realidad, entonces no pueden ser fijas. Si las leyes de las matemáticas son fijas entonces no están basadas en la realidad. Si yo supiese exactamente a donde quiero llegar, no podría llamarlo investigación”**

**Albert Einstein**



## **Agradecimientos**

De manera especial agradezco a la profesora Karen Paola Cagua, por su acompañamiento profesional y personal que fue vital en el desarrollo de este proyecto, al personal del laboratorio de ciencias térmicas del ITM. A mis grandes amigos Robinson Pérez Arenas y Wilmar Martínez por su apoyo y colaboración en todas las etapas desarrolladas en este trabajo. Al Padre Darío Vanegas y al Padre Rafael Bejarano, Rectores de las Instituciones Salesianas Pedro Justo Berrío y Ciudad Don Bosco, por su colaboración con los motores y equipos utilizados en el proyecto. A mi familia madre y padre que siempre me apoyan en cada decisión.





**Resumen**

El crecimiento mundial en la demanda de vehículos ha ocasionado incrementos en el consumo de combustibles fósiles y a su vez incrementos en las emisiones de gases de efecto invernadero. Adicionalmente, cuando el proceso de combustión no es adecuado se emiten cantidades significativas de gases contaminantes tales como, monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos sin quemar (HC), entre otros. Cuando un motor de combustión interna es encendido en frío, no cuenta con una temperatura adecuada para el proceso de combustión en los primeros ciclos de funcionamiento ocasionando durante esta etapa un alto porcentaje de las emisiones de CO y HC emitidas por un vehículo. Una vez alcanzada la temperatura óptima de funcionamiento tales emisiones bajan a niveles permisibles por la normatividad. Para obtener una temperatura óptima de funcionamiento durante el encendido en frío se han implementado dispositivos que permiten precalentar el bloque del motor permitiendo la mitigación de estas emisiones contaminantes. En este proyecto se diseñó e implementó un sistema capaz de precalentar el bloque del motor, con la energía acumulada en el sistema de refrigeración durante un ciclo de funcionamiento. Este precalentamiento permitió mejorar las condiciones heterogéneas en la dilución del combustible, reduciendo la cantidad de combustible sin reaccionar y logrando disminuciones de de CO y HC del 40% y 50% respectivamente.

**Palabras clave:** Arranque en frío, almacenamiento de energía, monóxido de carbono, hidrocarburos sin quemar, motor en lazo abierto, motor en lazo cerrado.

**Abstract**

Global growth in demand for vehicles has led to increases in fossil fuel consumption and in turn increases in emissions of greenhouse gases. Additionally, when the combustion process is not suitable significant amounts of pollutants such as carbon monoxide (CO) and unburned hydrocarbons (HC) are emitted, among others. When an internal combustion engine is at cold start, it does not have a suitable temperature for the combustion process in the first operating cycles during this time causing a high percentage of CO and HC emitted by a vehicle. Once the optimum operating temperature such emissions down to permissible levels achieved by the regulations. For optimum operating temperature during cold start devices they have been implemented that allow pre-heat the engine block allowing mitigation of these emissions. This project was designed and implemented a system to pre-heat the engine block, with the energy stored in the cooling system during an operating cycle. This preheating allowed heterogeneous conditions improve fuel dilution, reducing the amount of unreacted fuel and achieving reductions in CO and HC of 40% and 50% respectively.

**Keywords:** Cold start, energy storage, carbon monoxide, unburned hydrocarbons, open loop, closed loop.

## Contenido

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 Introducción .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 Descripción del problema .....</b>	<b>17</b>
<b>1.3 Objetivos .....</b>	<b>18</b>
1.3.1 Objetivo General .....	18
1.3.2 Objetivos específicos.....	18
<b>CAPÍTULO 2. ....</b>	<b>19</b>
<b>ASPECTOS TEÓRICOS Y ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>19</b>
<b>2. Emisiones durante el encendido en frío .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 Combustión en el arranque en frío .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2 Sistema de admisión en el arranque en frío.....</b>	<b>21</b>
<b>2.3 Lubricación en el arranque en frío. ....</b>	<b>22</b>
<b>2.4 Emisiones de gases de un motor de combustión interna .....</b>	<b>22</b>
<b>2.5 Hidrocarburos (HC) y monóxido de carbono .....</b>	<b>24</b>
<b>2.6 Sistema de refrigeración .....</b>	<b>24</b>
<b>2.7 Sistemas de inyección .....</b>	<b>25</b>
<b>2.8 Sistema de escape.....</b>	<b>25</b>
<b>2.9 Sensor de oxígeno o sonda Lambda .....</b>	<b>26</b>
<b>2.10 Catalizador.....</b>	<b>26</b>
<b>2.11 Recirculación de gases de escape EGR.....</b>	<b>27</b>
<b>2.12 Etapas del calentamiento del motor .....</b>	<b>28</b>
<b>2.13 Acumuladores térmicos .....</b>	<b>28</b>

<b>CAPÍTULO 3.</b> ....	<b>29</b>
<b>3. Montaje experimental</b> .....	<b>29</b>
<b>3.1 Descripción del Banco de ensayos</b> .....	<b>30</b>
<b>3.2 Diseño del sistema de acumulación térmica</b> .....	<b>31</b>
<b>3.3 Acumulador térmico</b> .....	<b>32</b>
<b>3.4 Funcionamiento del sistema de acumulación térmica</b> .....	<b>40</b>
<b>3.5 Metodología experimental</b> .....	<b>43</b>
<b>3.6 Evaluación experimental del efecto del funcionamiento del dispositivo en las emisiones de escape del motor</b> .....	<b>48</b>
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>50</b>
<b>4. Resultados</b> .....	<b>50</b>
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>60</b>
<b>5. Conclusiones</b> .....	<b>60</b>
<b>5.1 Recomendaciones</b> .....	<b>60</b>
<b>6. Anexos</b> .....	<b>62</b>
<b>7. Bibliografía</b> .....	<b>65</b>

---

ILUSTRACIÓN 1. TABLERO MOTOR EN BANCO.....	29
ILUSTRACIÓN 2. DIFERENTES COMPONENTES DEL SISTEMA DE ACUMULACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA .....	34
ILUSTRACIÓN 3. ADAPTA DE XXX FASE DE FUNCIONAMIENTO 1 .....	40
ILUSTRACIÓN 4. ADAPTADA XXX FASE DE FUNCIONAMIENTO 2 .....	41
ILUSTRACIÓN 5. ADAPTADA FASE DE FUNCIONAMIENTO 3 .....	42
ILUSTRACIÓN 6. TEMPERATURA ACEITE DE MOTOR.....	45
ILUSTRACIÓN 7. DIAGRAMA EXPERIMENTAL ELECTRO–HIDRÁULICO SISTEMA DE ACUMULACIÓN .....	49
ILUSTRACIÓN 8. DISIPACIÓN DE CALOR EN EL ACUMULADOR.....	50
ILUSTRACIÓN 9. DEL TEXTO DE ARRIBA.....	52
ILUSTRACIÓN 10. EMISIONES DE UN MOTOR OBD2 DURANTE EL ARRANQUE EN FRÍO .....	53
ILUSTRACIÓN 11. ACELERACIÓN A 2000 RPM EN VACÍO. ....	53
ILUSTRACIÓN 12. EMISIONES DE % CO A 800 RPM SIN EL DISPOSITIVO .....	54
ILUSTRACIÓN 13. EMISIONES DE HC A 800 SIN EL DISPOSITIVO.....	55
ILUSTRACIÓN 14. EMISIONES HC Y CO A 2000 RPM SIN DISPOSITIVO .....	55
ILUSTRACIÓN 15. EMISIONES DURANTE EL ARRANQUE EN FRÍO A 800 RPM CON DISPOSITIVO.....	56
ILUSTRACIÓN 16. EMISIONES DURANTE EL ARRANQUE EN FRÍO A 2000 RPM CON EL DISPOSITIVO.....	57
ILUSTRACIÓN 17. PARETO CHART .....	59
TABLA 1. NORMAS DE EMISIÓN DE GASES PARA VEHÍCULOS.....	23
TABLA 2. FICHA TÉCNICA MOTOR DE PRUEBAS OBD1 .....	30
TABLA 3. FICHA TÉCNICA MOTOR DE PRUEBAS OBD2 .....	30
TABLA 4. PRUEBA PERDIDA DE CALOR EN EL ACUMULADOR .....	31
TABLA 5. FUNCIONAMIENTO DEL ACUMULADOR TÉRMICO.....	34
TABLA 6. ELABORACIÓN PROPIA EMISIONES DE GASES .....	43
TABLA 7. FICHA TÉCNICA DE LOS ANALIZADORES DE GASES UTILIZADOS. ....	46
TABLA 8. DISEÑO EXPERIMENTAL .....	47
TABLA 9. ORDEN DE PRUEBAS REALIZADAS. ....	48
TABLA 10. RESULTADOS DISEÑO DE EXPERIMENTOS. ....	57
TABLA 11. ANÁLISIS DE VALOR P.....	58



## Capítulo 1

### 1.1 Introducción

El uso de los vehículos sigue creciendo de manera desenfrenada, los niveles de producción anual llegan a los 89 millones de unidades (Oica, 2015). Este factor estimula el incremento en el uso de combustibles fósiles que cada año aumenta un 2% (Breu, Guggenbichler, & Wollmann, 2008a).

El uso de combustibles fósiles por los motores de combustión interna y los bajos porcentajes de eficiencia incrementan las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos gases ocasionan un aumento anual de aproximadamente 1.9 % en el efecto invernadero, lluvias ácidas y en un incremento global en la temperatura de 2°C (Breu et al., 2008a) desprendiendo problemas tales como el derretimiento de los polos y el incremento en los niveles marinos (“Contaminación atmosférica principales contaminantes,” 2005).

Los agentes contaminantes emitidos por los motores de combustión podrían asociarse a combustiones incompletas gracias a una inapropiada dilución del combustible en ambientes heterogéneos generados en los primeros ciclos de funcionamiento del motor de encendido provocado.

En las últimas décadas, se han desarrollado numerosos métodos con el fin de reducir las emisiones generadas por los motores de combustión. Los convertidores catalíticos son una forma muy eficaz para disminuir estos niveles de contaminación. La eficiencia de conversión de estos dispositivos puede estar entre el 90 y 95% en condiciones ideales de funcionamiento (C. Gong, Huang, Deng, & Liu, 2011). Sin embargo esta eficiencia es impactada de manera muy importante por la temperatura de trabajo, ya que la eficiencia disminuye de manera drástica con los cambios de temperatura. En el escenario del arranque en frío del motor de combustión los niveles de eficiencia de este dispositivo están muy cerca a cero (Gumus, 2009). Por lo que es necesario buscar alternativas para reducir las emisiones en la etapa de encendido en frío.

Se han propuesto diferentes sistemas para minimizar los efectos negativos generados en el encendido en frío. La mayor parte de los sistemas propuestos se derivan de varias soluciones técnicas tales como; aceleradores de calentamiento químico para el catalizador, calentar de manera eléctrica el catalizador, método de pre catalizador, método de control de superficie del catalizador, sistema catalizador de acoplamiento cerrado, sistema de encendido de gas de escape, sistema de almacenamiento de calor latente, método de intercambiador de calor, calentadores de motores eléctricos, etc (C. Gong et al., 2011)(Andrianov, Manzie, & Brear, 2013; Dardiotis, Martini, Marotta, & Manfredi, 2013; Fan & Li, 2013). A nivel latinoamericano la industria automotriz se ha limitado a realizar solo ensamble de vehículos, esta práctica ha reducido el aporte tecnológico que puede brindar esta parte del continente. Los estudios y desarrollos solo se han limitado al ámbito experimental que aún no se han comercializado ni reglamentado para la instalación de los vehículos de serie.

Dentro del funcionamiento del motor, los adelantos tecnológicos no han tenido un gran adelanto cuando el motor aun está por debajo de la temperatura ideal de funcionamiento. Esto ha llevado a la industria automotriz a buscar diferentes soluciones en la optimización del uso del combustible y a reducir las emisiones de gases emitidas al ambiente. Cuando el motor de combustión interna aún no ha llegado a un rango óptimo de calentamiento que es aproximadamente entre 85-90 °C, se emiten entre el 60 y 80% del total de las emisiones contaminantes producidas por el motor (Gumus, 2009) & (Vasiliev, Burak, Kulakov, Mishkinis, & Bohan, 1999). Este alto porcentaje de emisiones contaminantes es ocasionado por un proceso de combustión incompleto debido a las bajas temperaturas durante el encendido en frío del motor. Cabe resaltar que la normatividad mundial ("Contaminación atmosférica principales contaminantes," 2005) que establece los niveles permisibles durante esta etapa de funcionamiento del motor, han llevado a los investigadores a buscar alternativas que permitan la mitigación de los gases contaminantes producidos durante el encendido en frío.

El proceso de arranque en frío de los motores de combustión interna de encendido por chispa tiene una particularidad, la baja temperatura de la mezcla aire- combustible genera una baja vaporización del combustible lo que dificulta una adecuada quema de los gases, la mayoría de sistemas adaptados en los motores para reducir las emisiones, en esta etapa, no funcionan, por ejemplo, los catalizadores y el sensor de oxígeno entre otros, requieren alcanzar un rango de temperatura específico que por ejemplo para el catalizador debe alcanzar una temperatura entre 550 y 600 °C (D. Agarwal, Singh, & Agarwal, 2011). Para comenzar a trabajar. En el proceso de encendido en frío los motores tienden a tener fallos en su funcionamiento debido a ese ambiente heterogéneo con baja vaporización del combustible, es por ello, que los sistemas electrónicos compensan esto con el ingreso de más combustible, incrementando el tiempo de inyección y de esta forma logran rápidamente el calentamiento del motor. Esta deja de ser estequiométrica, por encima de las 14,7:1 convirtiéndose en una mezcla rica en combustible, incrementando los niveles de contaminación durante esta etapa.

El rendimiento de un motor de combustión interna convencional está limitado por diferentes fenómenos entre los que se encuentran la disipación de calor por el sistema de refrigeración, las pérdidas por fricción, y el flujo de los gases de escape entre otros. Se estima que solo en el sistema de refrigeración se puede disipar alrededor de un 30% de la energía contenida en el combustible (Ramajo & Nigro, n.d 2007.). En este trabajo, se diseñó e implementó un dispositivo en un motor de combustión interna a gasolina, capaz de almacenar parte de esta energía, para luego entregarla y poder precalentar el bloque del motor cuando su temperatura está por debajo de los 85-90 °C, el cual es el rango ideal de trabajo.



## 1.2 Descripción del problema

El sector automotriz sigue creciendo a nivel mundial con un aumento del 5,7% anual y una producción de vehículos ligeros de 59.93 millones de unidades (Suarez, 2010). Generando a su vez un mayor uso de combustibles fósiles que en promedio aumenta 2% por año (Breu et al., 2008a), convirtiendo este fenómeno en la principal causa de contaminación atmosférica. De esta contaminación, se podría decir que 1 % (Breu et al., 2008a) es asociado a agentes contaminantes producidos por combustiones incompletas, debido a una inapropiada dilución del combustible en ambientes heterogéneos, generados en los primeros ciclos de funcionamiento del motor de encendido provocado.

Estos gases ocasionan un aumento anual de aproximadamente 1.9 % (Breu et al., 2008a) en el efecto invernadero, lluvias ácidas y en un incremento global en la temperatura de 2°C (Breu et al., 2008a) ocasionando graves problemas ambientales que inciden en el incremento de los niveles marinos (“Contaminación atmosférica principales contaminantes,” 2005).

Cuando el motor de encendido por chispa alcanza una temperatura ideal de trabajo los niveles de contaminación se reducen de manera drástica, disminuyendo los niveles de emisión de monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados (Vasiliev et al., 1999), (Gumus, 2009). Con estas estimaciones son establecidas las normas de emisiones para motores de encendido provocado en el país. Sin embargo, los parámetros de emisión no están contemplando las emisiones generadas cuando el motor aún no ha alcanzado una temperatura ideal de trabajo que es aproximadamente de 85-90 °C y es en esta etapa donde el motor emite entre un 60 y 80% de las emisiones al medio ambiente (Gumus, 2009).

En el motor frío, el ambiente para la dilución del combustible es poco favorable ya que el aire ni el combustible tienen una temperatura que ayude a mezclarse, este problema deriva en una expansión deficiente de los gases lo que conlleva a que una gran cantidad de combustible que no reacciona, entre las diferentes soluciones que permiten mitigar este efecto se encuentran, el calentamiento del aire antes de mezclarse con el combustible, el calentamiento del combustible y cámaras de resonancia en los sistemas de inyección, entre otras; las cuales ayudan a mejorar el proceso de dilución y así derivar en una mejor combustión en los primeros ciclos de trabajo del motor.

En el funcionamiento del motor, se tienen subsistemas que apoyan de manera sincronizada el buen funcionamiento del motor manteniendo una temperatura ideal de trabajo que se encuentra entre 85-90 °C, entre ellos se encuentra el subsistema de refrigeración, este acumula una gran cantidad de energía térmica al realizar el recorrido por el interior del bloque del motor cuando se encuentra con una temperatura ideal de trabajo. ¿Será posible aprovechar la energía térmica acumulada en el sistema de refrigeración, para ayudar a precalentar el motor de encendido por chispa en los primeros ciclos de funcionamiento? Y de esta forma reducir el tiempo que tarda el motor en llegar a su temperatura ideal de trabajo, generando una disminución en los gases contaminantes emitidos en esta etapa de funcionamiento.

### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 Objetivo General

Diseñar y evaluar experimentalmente un dispositivo acumulador de energía térmica para calentar un motor de combustión interna durante el encendido en frío.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar y construir un dispositivo capaz de acumular líquido refrigerante, con una temperatura mayor a 100°C y evaluar la caída de temperatura en un tiempo de 12 h.
- Implementar el dispositivo en el sistema de refrigeración del motor de encendido por chispa.
- Evaluar el efecto en las emisiones al utilizar el dispositivo para el precalentamiento del motor durante los primeros ciclos de funcionamiento.

## CAPÍTULO 2.

Aspectos teóricos y estado del arte

### **2. Emisiones durante el encendido en frío**

Los motores de combustión interna de encendido por chispa pueden generar una gran cantidad de gases contaminantes entre ellos el monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos sin quemar (HC), las emisiones de otro tipo de gases son atribuibles a los combustibles por sus diferentes composiciones de Azufre o Plomo, para ello diferentes tecnologías se han adelantado para mitigar sus emisiones. Sin embargo, la mayor cantidad de estos gases pueden ser generados en la etapa de calentamiento del motor (Alejandro et al; Carmen & Florentino, 2010).

En el mercado existen varios elementos que permiten un menor tiempo de calentamiento del motor y tratan de aliviar todos los efectos nocivos del arranque en frío. Algunos motores vienen equipados con un sistema que aumenta la presión y logra hacer fluir el aceite antes de encender el motor a fin de evitar el desgaste prematuro del mismo, este dispositivo está presente especialmente en grandes motores con turbo, pues este elemento es más propenso a sufrir en el arranque en frío cuando es acelerado sin presión de aceite suficiente, para mantener el eje suspendido en el lubricante. Otro elemento utilizado para realizar un incremento rápido en la temperatura de funcionamiento del motor es el termostato: este elemento aunque no se utiliza como sensor dentro del funcionamiento del motor, si se convierte en una válvula que ayuda a hacer re circular de manera constante el liquido refrigerante al interior de la culata del motor, esto con el fin de acelerar el calentamiento de la cámara de combustión y a su vez mantener una temperatura constante en el. Este sistema no evita las emisiones en frío; sin embargo si ayuda a reducir el tiempo de calentamiento del motor y evita que la temperatura del motor baje demasiado cuando se circula por lugares fríos, mantiene la temperatura del motor en la mayoría de circunstancias en una zona ideal entre 85-90 °C, sin el termostato el motor tardaría mucho más tiempo en llegar a la temperatura de funcionamiento o incluso no llegaría a alcanzarla, provocando una continua situación de combustión en frío (Alonso & Ignacio, 2001).

Para reducir los gases contaminantes emitidos por los motores de combustión interna los vehículos vienen equipados con diferentes dispositivos que ayudan a reducir las emisiones. Tales como los catalizadores, los sensores de oxígeno precalentados, válvulas de recirculación de gases de escape (EGR), sistemas de admisión precalentados, sistemas de inyección electrónica directa (FDI).

Los motores de combustión modernos, contaminan mucho menos que los motores de hace algunas décadas; los motores de combustión se han desarrollado de manera importante con los adelantos tecnológicos apoyados en la electrónica. Estos ayudan a la máquina a mejorar la combustión, incrementando la potencia y reduciendo las emisiones generadas. Sin embargo, cuando el motor de combustión arranca en frío, estas ayudas trabajan de manera deficiente, generando en esta etapa una gran cantidad de emisiones que contaminan más que todas las emisiones generadas en un recorrido promedio. Los motores en la etapa de encendido en frío contaminan entre un 60 y 80% (Gumus, 2009)

### **2.1 Combustión en el arranque en frío**

La forma de realizar la combustión en los primeros ciclos de funcionamiento es muy importante para todos los tipos de motores independiente del sistema de inyección que se le proporcione al vehículo, debido a que en el arranque en frío es donde más aumenta los fallos y las emisiones de hidrocarburos HC (Fan & Li, 2013), es por ello que es importante el diseño de la cámara de combustión, pues de este dependen variables importantes como la homogenización del combustible, la dilución y la correcta vaporización del combustible (Pan, Shu, & Wei, 2014).

Durante el encendido de un motor, las bajas revoluciones del motor y la baja presión de admisión llevan a condiciones de mezclas aire-combustible pobres, debido a que se presenta una baja vaporización del combustible, lo que inhibe la ignición del combustible, provocando la emisión de hidrocarburos sin quemar (Pastor, García-Oliver, Pastor, & Ramírez-Hernández, 2011). Los primeros ciclos de funcionamiento del motor tienen una característica muy importante en la combustión ya que el arranque en frío genera fallos de encendido e incrementan las emisiones de gases contaminantes como los hidrocarburos sin quemar y el monóxido de carbono.

Para disminuir las emisiones contaminantes durante el arranque en frío, una de las soluciones que se ha implementado, es el incremento en la cantidad de combustible, generando mezclas más ricas, superando la mezcla estequiométrica de 14,7:1 ayudando a estabilizar el funcionamiento del motor en esta etapa. Sin embargo, este incremento en la cantidad de combustible ocasiona incrementos en las emisiones de HC y CO. Otras alternativas que se han implementado para mitigar las emisiones durante el arranque en frío, es el control y combinación

de los parámetros de tiempo encendido, la presión de combustible, adelanto y atraso de la ignición (Fan & Li, 2013).

## **2.2 Sistema de admisión en el arranque en frío.**

El sistema de admisión deja fluir la cantidad de aire necesario y generar una mezcla estequiométrica, la cual a su vez necesita estar diluida y bien mezclada. Este mezclado homogéneo es de difícil consecución durante el arranque en frío (Li, Deng, Peng, & Wu, 2013), ya que a una baja temperatura del aire o del combustible existe una baja homogenización de la mezcla, generando una mezcla no estequiométrica afectando directamente las emisiones de gases generadas en los primeros ciclos de funcionamiento (A. K. Agarwal, Karare, & Dhar, 2014). es por ello que se han adoptado soluciones como colectores variables que ayudan a mantener un flujo adecuado de aire de acuerdo a la carga. Excesos de aire o baja temperatura en los primeros ciclos de funcionamiento del motor puede generar un entorno poco favorable en la vaporización rápida del combustible, esto sin lugar a dudas es un factor que influye en el aumento de emisiones de gases, para contrarrestar esta dificultad se calienta el extremo del múltiple de admisión por un corto periodo de tiempo antes del inicio del arranque en frío incrementando la temperatura del aire de 20°C a 110°C en 70 s mejorando la difusión del combustible en el aire y así evitar la condensación del combustible en las paredes del cilindro logrando una disminución de HC emitidos en el arranque en frío (Li et al., 2013).

Al disminuir la condensación del combustible en el múltiple de admisión ayuda a mejorar el encendido en los primeros ciclos de funcionamiento, esto crea un ambiente homogéneo para la buena dilución del combustible, que permite reducir las emisiones de gases durante el arranque en frío. Con incrementos en la temperatura del aire de 20 °C a 40 °C en 15 segundos, se logra incrementar la homogenización de la mezcla y se mejora el rendimiento en aproximadamente un 10%, reduciendo de esta manera las emisiones y los posibles fallos que se presentan en el arranque en frío (Li et al., 2013).

### 2.3 Lubricación en el arranque en frío.

La lubricación en el motor ayuda a un correcto funcionamiento del motor ya que cuando el aceite lubricante está frío la viscosidad es mayor y esto afecta el tiempo de lubricación en las diferentes piezas móviles del motor, el contacto de piezas metálicas producen desgastes prematuros que a su vez inciden en las holguras específicas del motor, ocasionando escapes de compresión al cárter, generando vapores con hidrocarburos y residuos aceitosos nocivos para el medio ambiente (Qasim, Afzaal Malik, Ali Khan, & Mufti, 2011). Para disminuir los problemas generados en el arranque en frío, los aceites poseen una serie de aditivos que aumentan las propiedades a la que está sometido el lubricante, con el fin de que este se adhiera a las paredes del motor y así lograr disminuir el desgaste al cual está expuesto el motor.

Se estima que las pérdidas de energía por fricción es el segundo factor más importante después de las pérdidas generadas por la disipación de calor, estas pérdidas reducen la eficiencia del motor. El estudio en mejorar estas pérdidas a llevado a centrarse en cómo reducirlas, ya que se pueden tener rangos entre el 10% al 40% dependiendo de la carga del motor y la temperatura del arranque (Will, 2012).

Las temperaturas del medio ambiente son muy influyentes en la fricción, entre menos temperatura del medio mayor serán las pérdidas por fricción en el motor, un motor con temperaturas del aceite por debajo de los 20 °C, pueden producir pérdidas del 50% comparadas con un motor a temperatura normal de funcionamiento, donde el aceite está a una temperatura aproximada de 100 °C, esto significa que en condiciones normales el motor puede tener pérdidas por fricción hasta el 60% de la energía total de combustible (Will, 2012)(Fan & Li, 2013).

Para reducir la fricción se han mejorado las propiedades del lubricante a través del uso de aditivos que permiten mejorar la fluidez a bajas temperaturas y controlar la disminución de densidad a altas temperaturas, el desarrollo de nuevos materiales de baja fricción en los elementos de mayor desgaste en el motor, como por ejemplo pistones, camisas de cilindros, cojinetes de bancada y anillos de pistones. El aumento del rango de presión manejado por las bombas de lubricación. La combinación de la temperatura del aceite y los diferentes regímenes de funcionamiento del motor garantiza la lubricación suficiente para todos los trenes móviles del motor (Giechaskiel et al., 2014) & (Will, 2012).

### 2.4 Emisiones de gases de un motor de combustión interna

Todos los procesos de combustión tienen gases inherentes a ella, como los vapores de agua (H<sub>2</sub>O), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>). Sin embargo estos productos se generan en condiciones muy ideales y el problema surge cuando el equilibrio químico se altera y aumenta la cantidad de aire en la mezcla o por el contrario disminuye y la ecuación de combustión se altera, produciendo otros productos como el Monóxido de carbono (CO), los Hidrocarburos (HC), los Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>) o los Óxidos de azufre (SO<sub>2</sub>). Todos estos se pueden generar en una etapa diferente del proceso de combustión (Ji et al., 2013).

Según las normas Euro 6 (Consejo, 2007) normas que son aun más exigentes que las normas Colombianas, establecen que para homologar un automóvil encendido por chispa debe operar bajo unos parámetros mínimos de emisión establecidos por la comunidad Europea a temperatura normal de funcionamiento, los límites de emisiones por km recorrido son: HC: 100 mg, CO: 1000 mg, NO<sub>x</sub>: 60mg pero cuando opera en frío (-7°C) 1800 mg de HC y 15000 mg de CO (Consejo, 2007). Esto significa un aumento entre 15 y 18 veces comparado con el funcionamiento del motor en un rango ideal de funcionamiento, la cantidad de contaminantes emitidos bajo el amparo de la norma y demuestra la imposibilidad de las técnicas existentes para evitar la contaminación mientras el motor está frío (Breu, Guggenbichler, & Wollmann, 2008b).

Teniendo en cuenta las problemáticas generadas por las emisiones del motor de combustión interna frío a finales del año 2005, la Unión Europea aprobó una resolución donde apoyaba una obligatoriedad en las normas de emisión de CO<sub>2</sub>, ya que antes a la resolución, el parlamento acordaba con los fabricantes un mínimo de emisiones. En vista de la falta de resultados obtenidos con esta medida se llegó a la decisión de la resolución que obligaba a todos los fabricantes de vehículos que quisieran competir en el mercado europeo a cumplir con las normas de emisiones que se definían en el proyecto presentado (Breu et al., 2008b).

Esta serie de acontecimientos en el continente europeo, ayudo a adoptar algunas políticas en la reducción de gases contaminantes emitidos por los automotores, de allí nace la necesidad de reglamentar las emisiones para los vehículos en Colombia. Sin embargo algunas emisiones como los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre no son tenidos en cuenta, ya que las pruebas se realizan de forma estática en los vehículos y estos no están sometidos a cargas variables como se muestra en la Tabla 1. Las pruebas se realizan con el motor caliente. El CO se mide en porcentaje con un límite máximo en el caso más exigente de 1,5% y de 300 ppm de HC, esto para los modelos más recientes (Resolución 5 del 9 enero de 1996).

**Tabla 1. Normas de emisión de gases para vehículos.**

AÑO MODELO	% Monóxido de carbono (CO) VOLUMEN	Hidrocarburos (HC) ppm
2001 y posteriores	1.5	300
1998 – 2000	3.5	400
1996 – 1997	5	600
1991 – 1995	5.5	700
1981 – 1990	7	850
1975 – 1980	8	1050
Anterior a 1974	10	1300

RESOLUCION No 556 Por la cual se expiden normas para el control de las emisiones en fuentes móviles. Artículo 5. Vehículos a gasolina.

### **2.5 Hidrocarburos (HC) y monóxido de carbono**

Los (HC) se generan cuando las temperaturas son muy bajas, creando una inadecuada dilución del combustible con aire, al no evaporizarse el combustible este no reacciona y sale por el tubo de escape, cuanto menor sea la temperatura ambiente la mezcla se hace más rica ya que no hay una mezcla correcta entre el aire y el combustible. Esta mezcla rica aumenta el monóxido de carbono y las emisiones de hidrocarburos HC (C.-M. Gong et al., 2011). Cuando las condiciones del ambiente mejoran y el entorno del múltiple de admisión va adquiriendo temperatura, mejora la homogenización del combustible, la temperatura de funcionamiento del motor aumenta de manera rápida lo que a su vez activa los sistemas de reducción de emisiones como el catalizador, de esta forma se puede reducir en un 50% las emisiones generadas por el motor de combustión interna a gasolina(Henein & Tagomori, 1999)

### **2.6 Sistema de refrigeración**

El control del calor que genera el motor en su funcionamiento, se hace a través del caudal de refrigerante que ingresa a presión por el interior del bloque y la culata, de esta forma se extrae el calor del motor manteniendo una temperatura estable de trabajo que es aproximadamente de 85-90 °C. En el recorrido del refrigerante por el interior del motor, el calor que debe disiparse al sistema de enfriamiento es función del régimen de velocidad y del régimen de carga del motor, lo que hace necesario que el sistema disipador o recuperador de energía deba tener suficiente capacidad de respuesta, acorde con la variación de esos mismos regímenes (Monteiro Sales & Sodré, 2012).

Esta gran cantidad de energía que se disipa en el sistema de refrigeración, es un atractivo para la generación de dispositivos que ayuden a aprovecharla en el precalentamiento del motor en los primeros ciclos de funcionamiento (Or , de Gracia, Castell, Farid, & Cabeza, 2012), sin embargo, se han propuesto muy pocos dispositivos que se beneficien de este potencial de energía.

Uno de los dispositivos para controlar la temperatura del motor es el termostato, este dispositivo ayuda a mantener esta temperatura controlando la cantidad de refrigerante que debe pasar al radiador (Khan, Culham, & Yovanovich, 2005),(Fan & Li, 2013). Manteniendo una temperatura constante independientemente de las condiciones atmosféricas externas.



## 2.7 Sistemas de inyección

Las características de la inyección son muy importantes en el funcionamiento del motor, sobre todo entender y comprender el proceso de inyección en el momento del encendido en frío; mediante el análisis de la propagación de la llama, la forma de realizar la inyección del combustible (la cantidad, la presión, el ángulo de inyección), se pueden mejorar las condiciones de atomización de las gotas de combustible y de esta forma lograr mezclas más homogéneas. Traduciéndose en una mejor combustión, mayor potencia y menor cantidad de hidrocarburos no quemados (Fan & Li, 2013) y (Dardiotis et al., 2013).

Los sistemas de inyección directa, posibilitan una definición exacta de los intervalos de alimentación del carburante en cada ciclo de trabajo del motor(Engine, 2012)., así como un preciso control del tiempo que se necesita introducir el combustible a diferentes cargas del motor, con este tipo de controles se facilita la modificación de presión de inyección, mejorando las prestaciones de potencia del motor a diferentes regímenes de trabajo (Fan & Li, 2013). La inyección directa ayuda a refrigerar la cámara de combustión, ya que ingresa solo aire a la cámara y este ayuda a reducir la temperatura evitando así puntos calientes y formación de NO<sub>x</sub> por las altas temperaturas (Dardiotis et al., 2013). La mayoría de vehículos de serie están equipados con sistema de inyección indirecta, los cuales realizan la inyección del combustible en el múltiple de admisión o en una pre-cámara donde se mezcla con el aire, luego la mezcla de aire combustible ingresa a través de la válvula de admisión al motor donde ocurre la expansión de los gases.

Los estándares actuales clasifican los motores como sistemas OBD1 y OBD2. El diagnóstico a bordo (OBD) surgió de la necesidad de determinar que componentes electrónicos fallaban en los sistemas de inyección electrónica mucho más complicados que el antiguo carburador, para esto se implementó una interface que permitía conocer el estado de los sensores y actuadores del sistema de inyección, OBD1, pero OBD I no podía detectar problemas como un convertidor catalítico descompuesto o uno que había sido removido, tampoco detectaba fallas en el sistema de ignición o problemas de emisiones evaporativas, además la lámpara indicadora se encendía solo después que ocurría una falla pero no había manera de monitorear el deterioro progresivo de los componentes relacionados con las emisiones, por esto los mecánicos debían tener distintos scanners para ingresar a la computadora de distintos vehículos, lo cual podía resultar muy costoso pues no había un estándar para medir emisiones entre diferentes marcas y modelos de vehículos, estos inconvenientes se solucionan con el estándar OBD2 además de incluir otras mejoras y sensores.

## 2.8 Sistema de escape

Un motor de combustión interna emite una gran cantidad de gases. Sin embargo, en el encendido en frío, los principales contaminantes son el monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos sin quemar (HC) (Henein&Tagomori, 1999). Los demás gases como óxidos de azufre y plomo son causados por los altos contenidos de estos elementos los cuales hoy en día son retirados por las

refinerías y no son atribuibles al funcionamiento del motor de encendido provocado (Alejandro et al; Carmen & Florentino, 2010).

Para reducir la emisión de contaminantes generados, los motores de combustión interna vienen equipados con diferentes tecnologías. Por ejemplo, la mayoría de motores para lograr cumplir con las normas internacionales traen de fábrica generalmente uno o dos sensores de oxígeno que pueden ser calentados o no, un catalizador de dos o tres vías, una válvula de recirculación de gases de escape EGR, estos tres elementos funcionan para maximizar la eficiencia del sistema de inyección electrónica y lograr bajas emisiones cuando el motor está caliente (Johnson Matthey Technol. Rev., 2015).

La cantidad de partículas emitidas por los motores de combustión interna, desde hace algunos años atrás han recibido bastante vigilancia por las autoridades ambientales como por los constructores de vehículos que ven la necesidad de reducirlos, por ello se han desarrollado varios instrumentos y métodos que ayudan a la reducción de partículas y de emisiones (Giechaskiel et al., 2014).

### **2.9 Sensor de oxígeno o sonda Lambda**

Uno de los elementos más utilizados en los motores modernos es el sensor de oxígeno o sonda lambda, esta compara los niveles de oxígeno presentes en los gases de escape con los niveles de oxígeno del aire exterior. El contraste de estos niveles provoca una diferencia de potencial eléctrico en el sensor, el cual es interpretado por la unidad de control electrónica del motor (ECU) como una mezcla de combustible rica o pobre, (Ramajo & Nigro, n.d.). Sin embargo, este sensor para funcionar correctamente y la ECU examinar el estado de la mezcla y así efectuar los cambios en la duración de la inyección y controlar la cantidad de combustible inyectado, debe estar funcionando a una temperatura superior a los 300°C. Esta temperatura la alcanza por la exposición directa a los gases de escape provenientes del motor (Ettireddy, P., Kotrba, A., Boningari, T., and Smirniotis, P, 2015).

Para acelerar el calentamiento de este tipo de sensores, generalmente se utilizan resistencias eléctricas, las cuales reducen el tiempo de calentamiento del sensor, lo que permite a la ECU retroalimentarse de la información del sensor de oxígeno en menos tiempo (Favez, Weilenmann, & Stilli, 2009). Cuando el motor trabaja frío la ECU debe inyectar un exceso de combustible para lograr una cantidad suficiente de vapor de combustible lo mismo que cuando está sometido a una aceleración fuerte, la ECU debe suministrar la cantidad de combustible suficiente para quemar la totalidad del oxígeno del motor a fin de lograr máxima potencia.

### **2.10 Catalizador**

Los sistemas catalíticos hacen parte del sistema de escape, este dispositivo inspira varias investigaciones, su notable aporte a la disminución de gases contaminantes queda empañado en el momento del arranque en frío, en ese instante el dispositivo no reduce eficazmente la cantidad de emisiones, ya que no tiene una temperatura ideal de funcionamiento la cual está alrededor de los 550 °C (Chan & Hoang, 1999),(Fan & Li, 2013). La gran cantidad de energía disponible en los

gases de escape, puede ser una herramienta que ayude a incrementar rápidamente la temperatura del sistema catalítico, mejorando el porcentaje de emisiones generadas en el arranque en frío (Ko & Ju, 2013) & (Chan & Hoang, 1999)

### **2.11 Recirculación de gases de escape EGR**

La recirculación de gases de escape en los motores de combustión interna de encendido provocado y autoencendido, es usada comúnmente con el fin de reducir especialmente las emisiones de óxidos de nitrógeno generadas por rápidos incrementos de temperatura en la cámara de combustión. Con el fin de mitigar la producción de óxidos de nitrógeno, se hace recircular un porcentaje de gases de escape a la admisión del motor, con el fin de reducir la temperatura en la cámara de combustión en momentos donde no es necesaria una máxima entrega de potencia por parte de motor (Peng, Cui, Shi, & Deng, 2008).

Sin embargo, en los momentos dónde se necesita toda la potencia del motor no se puede realizar la recirculación, este proceso solo se puede dar cuando el motor se encuentra en una demanda de potencia y velocidad constante (Peng et al., 2008) & (D. Agarwal et al., 2011). La recirculación de gases de escape ha traído diferentes mitos como son los desgastes atribuibles a los excesos de carbonilla que se generan en pistones y asientos de válvulas, para ello se han realizado diferentes investigaciones, estas consisten en variar los porcentajes de recirculación, los ángulos de apertura de la válvula y las revoluciones del motor. Estas han demostrado que la recirculación de gases de escape solo produce un aumento en la carbonilla generada en el motor y este incremento no se refleja en un desgaste prematuro ni tampoco en fallos por funcionamiento (Peng et al., 2008).

### **2.12 Etapas del calentamiento del motor**

El momento más difícil y complicado para el funcionamiento del motor de combustión interna de encendido provocado es el arranque en frío y el tiempo que tarda el motor en alcanzar un rango de temperatura ideal de funcionamiento que se encuentra aproximadamente entre 85-90 °C (Andrianov et al., 2013), al llegar al rango ideal de trabajo el líquido refrigerante y el aceite lubricante alcanzan la temperatura ideal de funcionamiento para cumplir con todas las condiciones de protección en el motor (Dardiotis et al., 2013)

El proceso de calentamiento del motor pasa por momentos que dificultan el buen funcionamiento como lo es la baja homogenización del combustible con aire (Fan & Li, 2013), es por ello que en esta etapa los sistemas de control electrónicos montados en los vehículos realizan constantes cambios en el proceso de inyección, es allí donde la unidad de control electrónica (ECU), aumenta el tiempo de apertura de los inyectores; incrementando la entrega de combustible en los sistemas OBDI, esto con el fin de compensar la humedad generada en los primeros ciclos de funcionamiento del motor frío y supliendo de esta forma la falta de emisividad en la etapa de fuerza del motor (Henein & Tagomori, 1999). Esta es una de las causas más importantes de emisión de gases de escape ya que el motor de combustión interna contamina aproximadamente un 80% que en el resto de los ciclos de trabajo a temperatura ideal de funcionamiento (Vasiliev et al., 1999).

### **2.13 Acumuladores térmicos**

Los dispositivos de almacenamiento de energía térmica permiten mantener el calor de un fluido por un periodo de tiempo determinado para ser aprovechado posteriormente, estos deben tener una alta capacidad de retención del calor, con pérdidas mínimas de energía de acuerdo a sus dimensiones y masa contenida. Las principales ventajas de este tipo de almacenamiento de calor son de alta densidad de energía y las temperaturas constante acumulada del anticongelante en el almacenamiento de calor.

Los sistemas de almacenaje de energía térmica para el precalentamiento del motor de combustión interna en el encendido en frío se han utilizado, demostrando reducciones del 65% en emisiones de CO y de un 15% en HC (Gumus, 2009). Este dispositivo trabaja sobre el efecto de la absorción y el rechazo de calor durante el cambio de fase sólido-líquido del material acumulador de calor.

Se han propuesto diferentes sistemas para minimizar los efectos negativos del encendido del motor en los primeros ciclos. La mayor parte de los sistemas propuestos se derivan en varias soluciones técnicas tales como; catalizador calentado químicamente, iniciar eléctricamente los sistemas catalíticos, método pre catalizador, método de control de superficie del catalizador, sistema catalizador de acoplamiento cerrado, sistema de encendido de gas de escape, método de intercambiador de calor, calentadores de motores eléctricos entre otros (Gumus, 2009) & (Vasiliev et al., 1999).

### Capítulo 3.

#### 3. Montaje experimental

En este capítulo se describe el montaje experimental utilizado para evaluar un dispositivo de almacenamiento térmico en las emisiones de escape durante el encendido en frío de un motor de combustión interna.

El motor utilizado en este montaje fue facilitado por el colegio salesiano Pedro Justo Berrío y Ciudad Don Bosco. Al motor se le realizaron todas las modificaciones técnicas requeridas para su adecuado funcionamiento.

Las adecuaciones técnicas realizadas al motor de pruebas fueron:

- Puesta a punto del sistema de inyección
- Adecuación y puesta a punto sistema eléctrico
- Cambio de bujías, cables de alta y filtros de aire
- Construcción de banco para anclaje de motor y dispositivo

El motor fue colocado en un banco, al cual se le adaptaron los soportes para tablero de instrumentos, cajas de fusibles principal y secundario como se observa en la Figura 1



Figura 1. Tablero motor en Banco

### 3.1 Descripción del Banco de ensayos

Durante de la fase experimental se utilizó un motor de combustión interna de encendido provocado marca Chevrolet E TECH II cuyas especificaciones técnicas se muestran en las Tabla 2 y Tabla 3

**Tabla 2. Ficha técnica motor de pruebas OBD1**

Fabricante	Chevrolet (GM Daewoo)
Modelo	E Tech II Aveo 1.6
Año de fabricación	2009
Ubicación del motor	Delantera transversal
Motor	1599 centímetros cúbicos (97.08 pulgadas cúbicas) Inyección multipunto secuencial indirecta
Tipo de motor	4-cilindros en línea, 4 válvulas por cilindro, 2 admisión, 2 escape, Catalizador de 3 vías, Sistema electrónico OBD1, PCV.
Potencia máxima	77, 61 kW a 6400 RPM.
Torque máximo	106.00 Nm a 3800 RPM.
Compresión	10.8 a 1
Combustible	Gasolina
Transmisión	Manual, 5-velocidades
Tracción	Delantera
Rendimiento del combustible en carretera	6.9 litros/100 km
Rendimiento del combustible en la ciudad	8.7 litros/100 km

**Tabla 3. Ficha técnica motor de pruebas OBD2**

Fabricante	Ford
Modelo	Fiesta 1.6
Año de fabricación	2015
Ubicación del motor	Delantera transversal
Motor	1599 centímetros cúbicos (97.08 pulgadas cúbicas) Inyección multipunto secuencial indirecta

---

Tipo de motor	4-cilindros en línea, 4 válvulas por cilindro, 2 admisión, 2 escape, Catalizador de 3 vías, OBD2, EGR, PCV, cánister.
Potencia máxima	120 HP a 6350 RPM
Torque máximo	112 lb ft a 5000 RPM.
Compresión	11 a 1
Combustible	Gasolina

---

### 3.2 Diseño del sistema de acumulación térmica

Para las pruebas experimentales se realizó la implementación del dispositivo diseñado previamente en el motor de ensayos, evaluando los incrementos de temperatura en los primeros ciclos de funcionamiento y en la etapa final, el efecto térmico ocasionado por el dispositivo en las emisiones contaminantes durante el encendido en frío.

Durante las pruebas experimentales antes de implementar el dispositivo, se evaluaron las pérdidas de temperatura en el dispositivo las cuales se promediaron dando como resultado perdidas de calor de 1 grado por hora en promedio de las 4 pruebas realizadas, dejando disponible una temperatura aproximada de 80 °C para comenzar con el proceso al iniciar la marcha del motor en sus primeros ciclos de funcionamiento. Para estas pruebas se realizó el calentamiento del refrigerante a una temperatura mayor a 100°C instalando un termopar tipo K para medir las pérdidas de energía en un periodo de 12 horas. Las frecuencias para toma de datos fueron de 1 hora en la Tabla 4 se muestra los resultados.

**Tabla 4. Prueba perdida de calor en el acumulador**

TIEMPO	TEMP 1	TEMP 2	TEMP 3	TEMP 4
<b>Horas</b>				
<b>1</b>	<b>2,3</b>	<b>2,5</b>	<b>2,2</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>2,6</b>	<b>3</b>	<b>2,4</b>	<b>2,4</b>

---

<b>3</b>	<b>3,4</b>	<b>3,2</b>	<b>3,5</b>	<b>3,3</b>
<b>4</b>	<b>4,1</b>	<b>3,8</b>	<b>4,2</b>	<b>3,7</b>
<b>5</b>	<b>5,3</b>	<b>5,1</b>	<b>5</b>	<b>5,6</b>
<b>6</b>	<b>8,3</b>	<b>9,2</b>	<b>9,3</b>	<b>9</b>
<b>7</b>	<b>10,2</b>	<b>13,8</b>	<b>13,6</b>	<b>13,1</b>
<b>8</b>	<b>12,4</b>	<b>12,7</b>	<b>12,6</b>	<b>12</b>
<b>9</b>	<b>14,4</b>	<b>16,3</b>	<b>19,8</b>	<b>17,3</b>
<b>10</b>	<b>16,1</b>	<b>18,3</b>	<b>21,5</b>	<b>19,5</b>
<b>11</b>	<b>18,8</b>	<b>21,5</b>	<b>23,7</b>	<b>21,1</b>
<b>12</b>	<b>21,5</b>	<b>23,3</b>	<b>24,4</b>	<b>24</b>

### 3.3 Acumulador térmico

El rendimiento de un Motor de Combustión Interna MCI está asociado a su capacidad para convertir el total de la energía suministrada en trabajo útil. Para elevar el rendimiento térmico del motor es ideal operarlo a temperaturas lo más elevadas posibles, sin embargo existen algunas limitantes como los materiales de construcción, los cuales no pueden trabajar en rangos tan altos de temperatura, siendo necesario una apropiada remoción del calor para prevenir fallas debido a la fatiga térmica (Pastor et al., 2011).

La mayoría de los sistemas de enfriamiento de los motores son de tipo cerrado e incluyen galerías o pasajes para la circulación del líquido enfriador por el bloque y las culatas, un radiador principal o disipador de calor al aire circundante, una o varias válvulas controladoras del flujo del líquido enfriador (entre las que se incluyen los termostatos mecánicos y los electrónicos), mangueras y elementos conectores y una bomba para el movimiento del fluido. Todos estos dispositivos trabajan conjuntamente para garantizar una óptima extracción de calor del motor brindando una temperatura ideal del funcionamiento que se encuentra entre los 85-90 °C. (Fan & Li, 2013).

Con la finalidad de conocer el volumen de refrigerante utilizado en el motor, se utilizó un automóvil familiar de 1,6 litros de cilindrada, el cual tiene un volumen interno en el motor para alojar refrigerante de aproximadamente 1,5 litros que son: 750 centímetros cúbicos del bloque, 500 centímetros cúbicos culata, 250 centímetros cúbicos mangueras (Manual de Renault Logan, 2004). Como se necesita retirar todo el refrigerante frío y evacuarlo por las mangueras y renovar el líquido que entrega calor al bloque se requirieron mínimo 5 litros de refrigerante en el interior



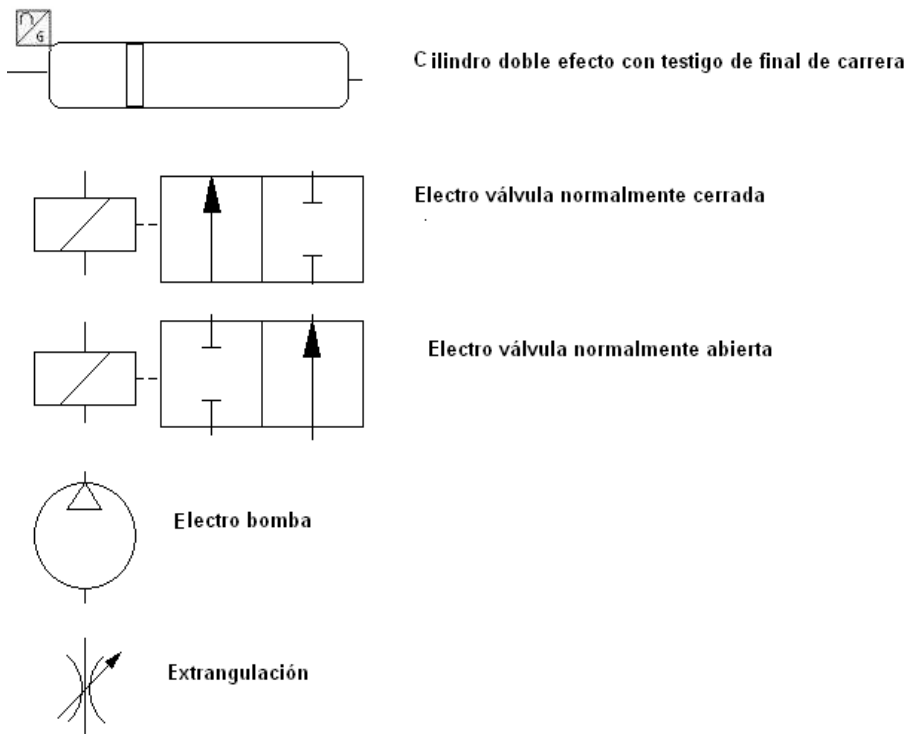
del acumulador térmico. Cuando se realizó la prueba práctica fueron más que suficientes 20 litros, para lograr el calentamiento deseado en 1 minuto. Para determinar la cantidad exacta se deben hacer pruebas en cada motor que se quiera adaptar y realizar una tabla con los volúmenes necesarios según el tipo de motor, cilindrada, material y tipo de refrigerante utilizado.

El contenedor térmico se construyó con una forma geométrica para poder acumular el mayor volumen en un área lo más reducida posible, esto teniendo en cuenta los espacios reducidos que maneja un habitáculo de motor, dado que una esfera sería la forma geométrica que se ajusta a esta necesidad, se dificulta la construcción de los elementos internos como el pistón para el correcto funcionamiento del sistema. Por ello se eligió la forma cilíndrica, las proporciones de radio y largo dependen del espacio disponible dentro del habitáculo del motor, lo ideal es que el radio del cilindro sea igual al largo para así maximizar el volumen y minimizar el área por donde disipa calor.

En el sistema de acumulación se construyó con tubería de PVC, ya que esta ayuda a reducir las pérdidas de calor y soporta las temperaturas de trabajo del fluido refrigerante que oscilan entre los 80 y 90 °C, sin deformarse. El dispositivo tiene un pistón en la parte interna que ayuda a separar las cámaras de fluido que actúa al interior como el refrigerante caliente y el frío. El pistón fue construido en teflón, el cual fue maquinado a la medida, también se realizaron 3 canales con el fin de adecuar O-ring y brindar la estanqueidad necesaria entre los 2 fluidos de trabajo. Además de reducir la transferencia de calor entre las 2 cámaras.

- El sistema de acumulación diseñado tienen los siguientes elementos, cuya función se describe en la Tabla 5 Acumulador térmico
- Electro bomba
- Válvula 1
- Válvula 2
- Válvula 3
- Válvula anti retorno
- Temporizador
- Sensor de posición pistón del acumulador
- Estrangulador
- Tubería y acoples

En la Figura 2. Se muestra el proceso de funcionamiento de los componentes básicos y se describe la simbología de los elementos.



**Figura 2. Diferentes componentes del sistema de acumulación de energía térmica**

**Tabla 5. Funcionamiento del acumulador térmico.**

ELEMENTO	CONDICIÓN DE TEMPERATURA O MANEJO	POSICIÓN DEL ELEMENTO	ACTUACIÓN DEL ELEMENTO	ACCIÓN REALIZADA	RESULTADO
Válvula 1 NC	La válvula permanece cerrada evitando que el refrigerante caliente se salga del termo hacia el bloque	La válvula permanece cerrada evitando que el refrigerante caliente se salga del termo hacia el bloque	Se abre eléctricamente para dejar pasar refrigerante caliente al bloque del motor	Se cierra para esperar que el termostato empiece a dejar pasar refrigerante caliente a 90°C para almacenarlo en el acumulador.	Permanece cerrada evitando que el refrigerante caliente se salga del termo hacia el bloque
Válvula 2 NA	Permanece abierta permitiendo ingreso del refrigerante del radiador al bloque para refrigerar el motor, es importante que esta válvula sea NA y permanezca abierta para evitar recalentamientos.	Permanece abierta, pero no hay circulación de fluidos.	Se cierra eléctricamente para impedir que el refrigerante caliente se vaya al radiador o entre refrigerante frío al bloque.	Abre permitiendo ingreso del refrigerante del radiador al bloque para reducir la temperatura del motor, es importante que esta válvula sea NA y permanezca abierta para evitar recalentamientos.	Permanece abierta permitiendo ingreso del refrigerante del radiador al bloque para refrigerar el motor.

Válvula 3 NA	Permanece abierta permitiendo la salida del refrigerante de la parte fría del termo al motor, lo que posibilita que se llene el termo en el lado caliente.	Permanece abierta, pero no hay circulación de fluidos.	se cierra para que el caudal de la electrobomba tenga que empujar el embolo dentro del termo obligando al refrigerante caliente a salir por el otro lado.	Abre permitiendo la salida del refrigerante de la parte fría del termo al motor, lo que posibilita que se llene el termo en el lado caliente.	Permanece abierta permitiendo la salida del refrigerante de la parte fría del termo al motor
Electro bomba	Apagada en caliente	Apagada	Encendida sacando refrigerante frío del bloque y bombeándolo hacia el lado frío del termo.	Se apaga	Apagada

<p>Acumulador térmico</p>	<p>Debe llegar con el lado caliente lleno a 90°C.</p>	<p>Mantiene la temperatura de su lado caliente durante 12 horas perdiendo máximo 1°C cada hora.</p>	<p>Desplaza el embolo del lado frío al caliente obligando al refrigerante caliente a salir hacia el motor y llenándose al otro lado del embolo del refrigerante frío que tenía el motor</p>	<p>Empieza a desplazar el pistón hacia la "izquierda" haciendo espacio en el lado caliente y sacando refrigerante frío o tibio de la parte fría para hacer espacio en el lado caliente para el próximo ciclo de manejo. No necesita electrobomba porque el refrigerante caliente está a mayor presión que el líquido en el lado frío que además es succionado parcialmente por la bomba de agua del motor.</p>	<p>Se desplaza el embolo hasta llegar al lado "derecho" para lograr quedar lleno con líquido a 90°C antes de terminar el ciclo de manejo, si esto no ocurre porque el ciclo es muy corto o por trabajar muy frío no se tendrá suficiente líquido en el próximo ciclo de manejo.</p>
---------------------------	---	---	---	--	---

Válvula anti retorno	Solo deja pasar agua caliente del termostato al acumulador pero no la deja devolver.	No deja devolver el refrigerante caliente al motor.	No deja devolver el refrigerante caliente al motor.	Solo deja pasar refrigerante caliente del termostato al termo pero no la deja devolver	Solo deja pasar refrigerante caliente del termostato al termo pero no la deja devolver.
Temporizador	Apagado	Apagado	Encendido por 60 segundos junto con el testigo, las electroválvulas y la electro bomba. Hasta que el pistón del acumulador llegue al tope "izquierdo".	Apaga la electrobomba y deja las válvulas en su posición natural y el testigo de funcionamiento apagado.	Apagado
Interruptor de final de carrera	Apagado, porque el embolo debe estar al otro lado.	Apagado, porque el embolo debe estar al otro lado.	Esperando a que llegue el embolo para apagar el temporizador, este elemento se puede eliminar.	Al retirarse el pistón del lado izquierdo se desactiva y permanece apagado.	Apagado

---

Estrangulador	Inoperante, no hay flujo de refrigerante por ese conducto.	Inoperante, no hay flujo de refrigerante por ese conducto.	Regula el caudal de la bomba, si la bomba está bien calibrada se puede eliminar.	Inoperante mientras no funcione la bomba.	inoperante
---------------	--	--	--	---	------------

### 3.4 Funcionamiento del sistema de acumulación térmica

Dentro del proceso de funcionamiento del acumulador es importante los ciclos de conducción y la temperatura del motor, cuando el motor tiene un ciclo conducción ECE 15 (EU Legislative cycles). Este ciclo se presenta cuando el vehículo realiza recorridos no mayores a 30 minutos. En este tipo de ciclos, se reduce la eficiencia del motor, debido a que el motor no permanece en un rango temperatura ideal de funcionamiento. Con el fin de aumentar rápidamente la temperatura del motor y mejorar la homogenización de la mezcla aire – combustible durante los primeros ciclos de funcionamiento del motor, se aprovechó la energía contenida en el refrigerante después de un recorrido en el interior del motor. Esta energía se acumuló en un depósito térmico aislado para reducir las pérdidas de calor. Posteriormente, este refrigerante caliente se hizo recircular en el interior del motor durante los tiempos en los que la temperatura de de funcionamiento del motor estuvo por debajo de su rango ideal.

En la Figura 3. Se muestra el funcionamiento del sistema cuando el motor está por debajo de la temperatura ideal de funcionamiento. El acumulador está lleno de refrigerante caliente representado en color rojo, el refrigerante acumulado en el sistema térmico debe estar por encima de los 75 °C.

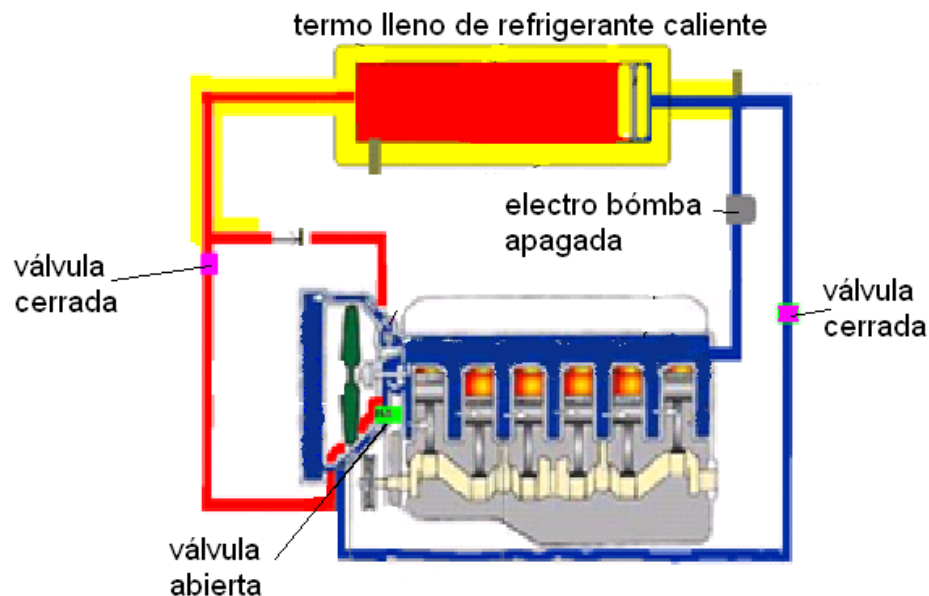
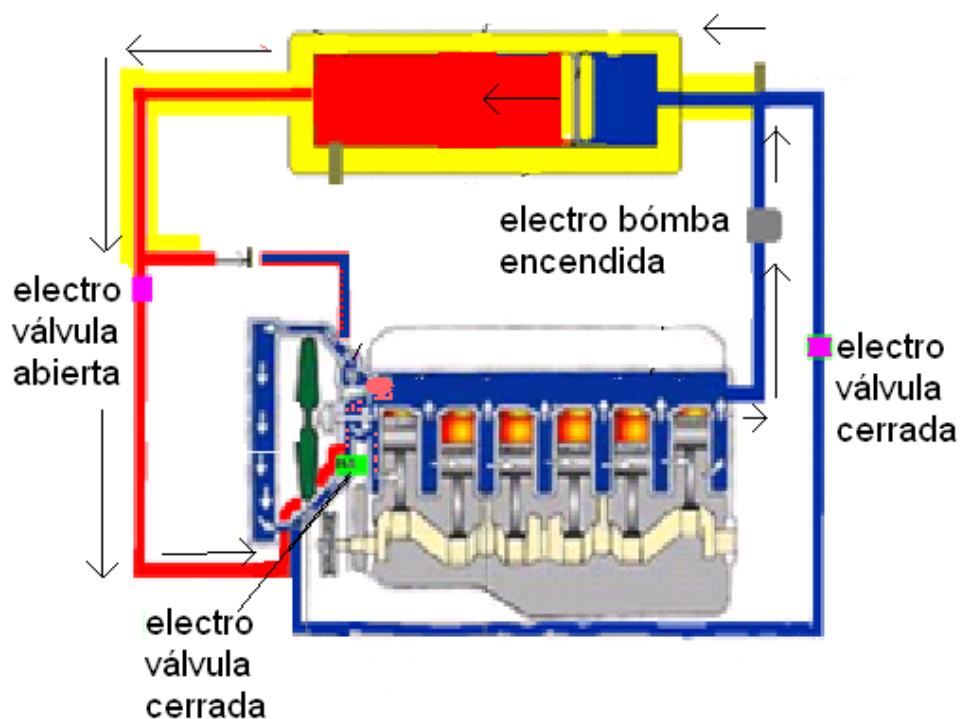


Figura 3. Adapta de aficionados a la mecánica fase de funcionamiento 1

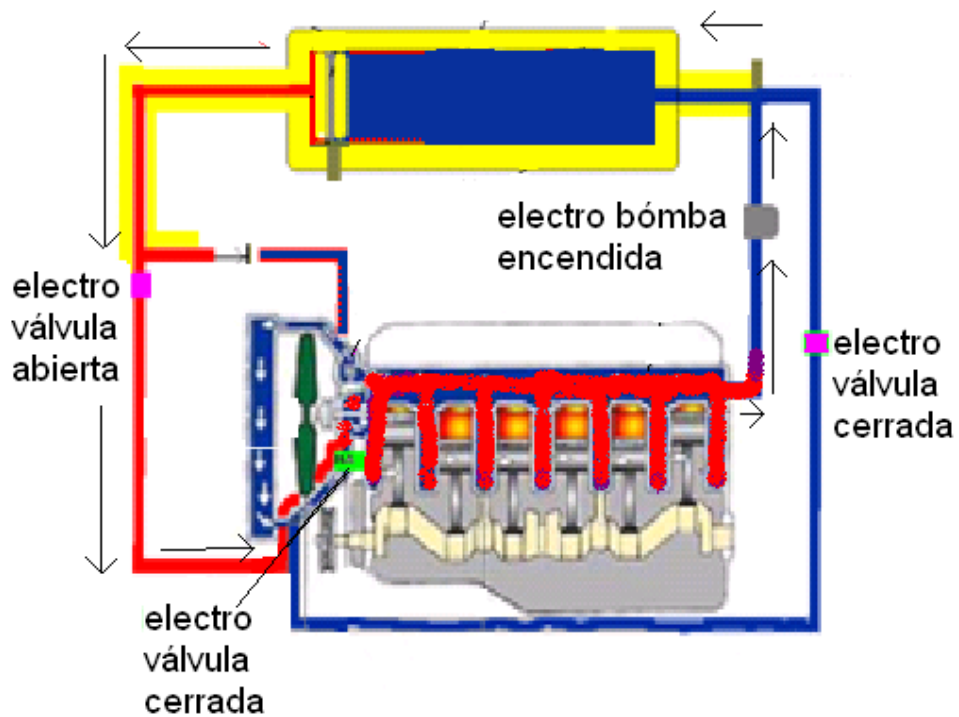


Cuando se abre el interruptor para encender el motor, una bomba eléctrica succiona el refrigerante frío representado con el color azul, en el interior de la culata enviándolo a presión al lado derecho del acumulador térmico, moviendo el pistón y este a su vez empuja el fluido caliente representado en color rojo, la válvula de paso se cierra y permite que el flujo de refrigerante ingrese al interior de la culata. Este proceso se muestra en la Figura 4



**Figura 4. Adaptada aficionados a la mecánica fase de funcionamiento 2**

El refrigerante frío succionado del interior de la culata, desplaza en su totalidad el refrigerante caliente, esto ocurre en un tiempo que es función del caudal de la bomba. En el interior de la culata recircula el refrigerante hasta que abre el termostato. Este proceso se muestra en la Figura 5



**Figura 5. Adaptada de aficionados al mecánica fase de funcionamiento 3**

Cuando el motor caliente y logre una temperatura aproximada de 90 °C, el refrigerante caliente sube al acumulador térmico y este desplaza el refrigerante frío lentamente hacia el interior de la culata, el motor en este momento está en su temperatura ideal de funcionamiento y necesita mantener una temperatura estable.

### 3.5 Metodología experimental

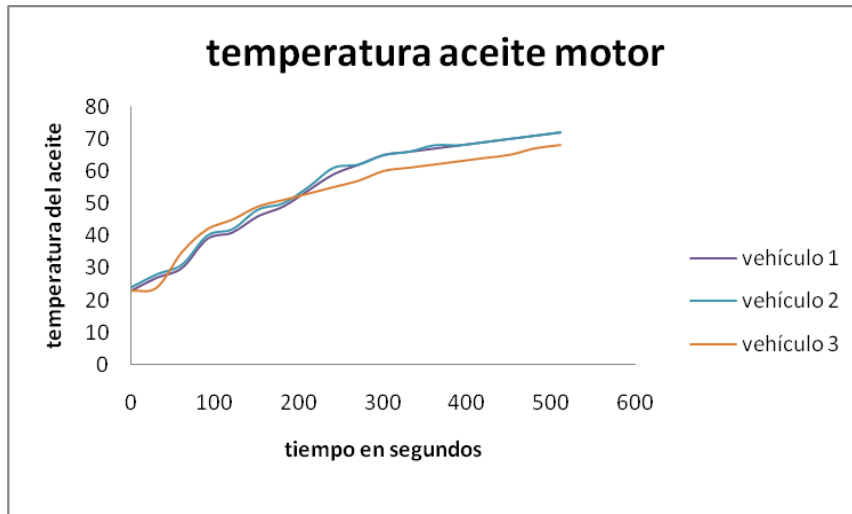
Las pruebas de arranque en frío se realizaron en 3 vehículos diferentes, los datos de esta prueba se tomaron cada 0,5 minutos. La medición de emisiones de HC, CO y temperatura la cual fue registrada desde la temperatura del aceite, esto con el fin de garantizar la temperatura real del motor, teniendo en cuenta que en los primeros ciclos de funcionamiento el registro de temperatura se da desde el termostato y este se encuentra cerrado, en la Figura 6 se muestra la tendencia de temperatura medida en el aceite de motor. Los vehículos fueron de características similares al motor de pruebas utilizado en esta tesis. Entre las características se encuentran el número de válvulas (8), la cilindrada (1600 cc) y la tecnología del sistema de inyección (OBD1).

Los resultados mostrados en la Tabla 6. Muestran que el tiempo de calentamiento es de 5 minutos aproximadamente, este tiempo se calculó teniendo en cuenta la norma colombiana de emisiones de gases. Las pruebas se realizaron bajo condiciones de revoluciones mínimas (800 rpm) y sin carga de motor, la temperatura del motor fue tomada en el aceite y en la Figura 6. Muestra los resultados de la temperatura.

Tabla 6. Elaboración propia emisiones de gases

Vehículo 1				Vehículo2			Vehículo 3		
Equipo de análisis de gases				Equipo de análisis de gases			Equipo de análisis de gases		
Bear pace 400				Cartek 57-200			Bear pace 400		
s	%	ppm	°C	%	Ppm	°C	%	ppm	°C
tiempo	CO	HC	temp	CO	HC	temp	CO	HC	temp
0,5	4,2	728	21	6,3	820	23	5,0	774	22
1,0	3,3	373	22	5,2	410	24	4,0	392	23
1,5	2,1	318	30	3,7	320	26	3,0	319	28
2	0,8	307	33	1,2	305	29	1,0	306	31
2,5	0,5	253	35	0,7	251	34	0,6	252	35
3	0,4	236	38	0,6	223	37	0,5	228	38
3,5	0,4	224	41	0,5	222	41	0,4	223	41

<b>4</b>	0,4	213	45	0,5	210	44	0,4	211	45
<b>4,5</b>	0,4	203	47	0,5	199	47	0,4	201	47
<b>5</b>	0,4	194	49	0,5	195	50	0,4	194	50
<b>5,5</b>	0,4	188	53	0,5	183	53	0,4	186	53
<b>6</b>	0,4	186	56	0,4	185	56	0,4	185	56
<b>6,5</b>	0,4	177	58	0,4	180	60	0,4	178	60
<b>7</b>	0,3	169	60	0,4	172	61	0,4	167	60
<b>7,5</b>	0,3	166	63	0,4	167	62	0,4	165	62
<b>8</b>	0,3	150	65	0,4	155	63	0,4	150	64
<b>8,5</b>	0,3	137	66	0,4	140	65	0,4	140	66
<b>9</b>	0,3	137	69	0,4	136	67	0,4	130	67
<b>9,5</b>	0,3	133	71	0,4	130	70	0,4	129	70
<b>10</b>	0,3	136	73	0,3	112	73	0,3	124	71
<b>10,5</b>	0,3	132	75	0,3	111	76	0,3	120	75
<b>11</b>	0,3	129	76	0,3	100	78	0,3	113	77
<b>11,5</b>	0,2	122	78	0,3	99	79	0,3	111	79
<b>12</b>	0,2	120	80	0,3	98	80	0,3	109	80
<b>12,5</b>	0,2	117	81	0,3	97	81	0,3	107	81



**Figura 6. Temperatura aceite de motor**

Antes de implementar el dispositivo, se realizaron las pruebas de puesta a punto del motor en banco. En las que se consideraron el estado del sistema de encendido del motor, bujías, cables de encendido, sistema de inyección, filtros de aire y combustible. Con el fin de garantizar un funcionamiento adecuado de la máquina.

Posteriormente, se realizaron pruebas de obstrucción del sistema de refrigeración, incluyendo el radiador, estado de la bomba del sistema de refrigeración. Al igual que las mangueras y ductos, de estos dependió en gran parte el correcto funcionamiento del dispositivo. Las pruebas se realizaron con herramientas como bomba de presión para detectar fugas u obstrucciones en el radiador, llaves y herramientas especializadas.

Adicionalmente, se realizaron pruebas de encendido, medición de análisis de gases en las fases de encendido en frío y en caliente para garantizar el correcto funcionamiento del motor. Posteriormente se adaptó el acumulador térmico para precalentar el motor y se realizaron las mismas medidas para determinar su efecto. Las especificaciones técnicas del analizador de gases se muestran en la Tabla 7. Con la geometría del dispositivo y las pérdidas del sistema ya evaluados, se continuó con la instalación del dispositivo acumulador en el motor de prueba. Para la instalación del dispositivo se utilizó una estructura metálica, teniendo en cuenta los diferentes componentes necesarios para su funcionamiento, tales como: acumulador, válvulas, bomba externa, mangueras, sensores de temperatura en la tapa superior del motor y en el bloque.

Las mangueras utilizadas en el sistema para el acople del acumulador térmico fueron del mismo diámetro de las mangueras utilizadas en el sistema de refrigeración original del vehículo, esto con el fin de evitar pérdidas de presión y reducción de caudal en el sistema de refrigeración, evitando de esta forma el recalentamiento del motor en funcionamiento normal. El material de dichas mangueras es de caucho y lona; las cuales soportan las temperaturas de funcionamiento normal del motor sin deformarse, resisten los ataques químicos por contacto de combustibles y soportan un grado de deformación por las temperaturas a las cuales se someten en el interior del habitáculo del motor. Las válvulas de acción manual que se instalaron en el sistema son del mismo material de construcción del acumulador térmico, con el fin de que soportarán las temperaturas sin deformasen.

En el momento de realizar la puesta en marcha del sistema de acumulación de energía térmica, se tuvieron problemas como el atascamiento del pistón, lo que en un momento aumento la presión del sistema y se desprendió uno de los acoples de la cámara del líquido refrigerante caliente. Para solucionar este inconveniente se desmonto el pistón y se cambio el anillo interno o-ring con el fin de garantizar el desplazamiento normal del pistón. Adicional por la longitud y el ángulo de acople de algunas mangueras estas se estrangulaban, ocasionando pérdidas de presión, por lo que se adaptaron mangueras con alma de acero forradas en caucho y lona.

**Tabla 7. Ficha técnica de los analizadores de gases utilizados.**

Componente	Resolución
HC:	1 ppm Vol.
CO:	0.01% Vol.
CO <sub>2</sub> :	0.1 % Vol.
NO <sub>x</sub> :	1 ppm
Presión de operación 50 mbar – 1100 mbar 1000 mbar nominal	

**QRO-40 gas analyzer. Fuente: manual de servicio del analizador**

Componente	Rango de medición	Resolución
HC:	0 ~ 9999 ppm Vol.	1 ppm
CO:	0.00 ~ 9.99% Vol.	0.01%
CO <sub>2</sub> :	0.0 ~ 20.0% Vol.	0.01 %
O <sub>2</sub>	0.00 ~ 25.00 %	0.01%
NO <sub>x</sub> :	0~5000ppm Vol.	1 ppm

Los 2 analizadores funcionan mediante espectrómetro infrarrojo no dispersivo (NDIR) y al momento de la medición contaban con registros de calibración.

Posterior a la instalación se realizaron pruebas preliminares de funcionamiento en las que se consideraron variables como: el flujo, la carga del motor y la temperatura de refrigerante en el sistema. La evaluación de estas variables permitió verificar fugas en el proceso y en el dispositivo de acumulación. Con el motor puesto a punto, se realizaron las pruebas de emisiones. Las mediciones registraron el tiempo de arranque en frío y la emisión de gases del tipo HC, CO, adicionalmente se midió el tiempo que tarda el motor en llegar a su temperatura ideal de trabajo. El límite tenido en cuenta en este proyecto, fue el establecido por la norma ambiental colombiana. Dichos ensayos se realizaron en tres repeticiones con intervalos de 4 horas entre las pruebas, en estos intervalos el motor fue ayudado a reducir la temperatura mediante un ventilador con el fin de reducir el tiempo de enfriamiento del motor entre pruebas, de esta forma se garantiza las condiciones iniciales de la prueba anterior. El diseño experimental implementado se muestra en la Tabla 8

**Tabla 8. Diseño experimental**

Factor	Descripción nivel	Designación nivel	Variable de salida
Con dispositivo	RPM	800	Emisiones de CO y HC
Sin dispositivo		2000	Tiempo de calentamiento

Se definieron como factores las RPM, el funcionamiento del motor con y sin el dispositivo de acumulación térmica, aun rango de revoluciones de 800 en ralentí o bajas y a 2000 rpm en altas revoluciones, estos dos rangos se definieron ya que son los regímenes de trabajo en las pruebas de emisiones de gases practicadas en Colombia.

El diseño experimental se corrió en el software minitab, este arroja un orden de realización de las pruebas con el fin de garantizar la aleatoriedad y de esta forma reducir el margen de error. En la **Tabla 9**. Se muestra el orden de las pruebas realizadas.

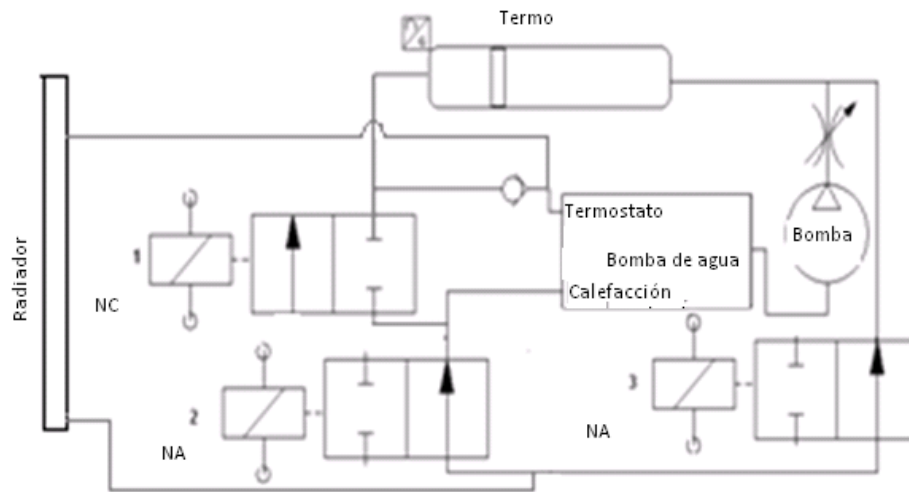
Tabla 9. Orden de pruebas realizadas.

OrdenEst	RPM	Dispositivo
3	800	Con dispositivo
4	2000	Con dispositivo
8	2000	Con dispositivo
5	800	Sin dispositivo
1	800	Sin dispositivo
2	2000	Sin dispositivo
6	2000	Sin dispositivo
7	800	Con dispositivo

### 3.6 Evaluación experimental del efecto del funcionamiento del dispositivo en las emisiones de escape del motor

Una vez conocido el tiempo que tarda el motor en calentar, después de iniciar la marcha en frío y la cantidad de gases emitidos en este lapso. Se evaluó el efecto térmico generado al recircular el fluido con energía almacenada durante el encendido en frío. Las variables consideradas en las pruebas experimentales fueron: la temperatura del refrigerante en el dispositivo acumulador antes de ingresar al interior del motor y las emisiones (teniendo en cuenta los gases de tipo HC, CO) generadas en los primeros ciclos del motor, el efecto generado en el motor con y sin el dispositivo de acumulación. El montaje experimental propuesto para el desarrollo del proyecto se muestra en la Figura 7.





**Figura 7. Diagrama experimental electro-hidráulico sistema de acumulación**

Para la medición de la temperatura del fluido en el dispositivo, se acoplo al contenedor de energía térmica un termopar tipo K, con el fin de determinar las variaciones de temperatura en el dispositivo. Dichos ensayos se realizaron en tres repeticiones con intervalos de 4 horas. Para reducir la temperatura del motor hasta la temperatura ambiente, se ayudo con un ventilador de aspas y el rocío de agua al motor; de esta forma se garantiza las condiciones iniciales de la prueba anterior.

Al recopilar los datos obtenidos y hacer las tabulaciones necesarias de los ensayos, se compararon los datos de las pruebas con y sin el dispositivo. Con el fin evaluar el efecto en el precalentamiento del bloque del motor y determinar el efecto en las emisiones generadas durante el encendido en frío.

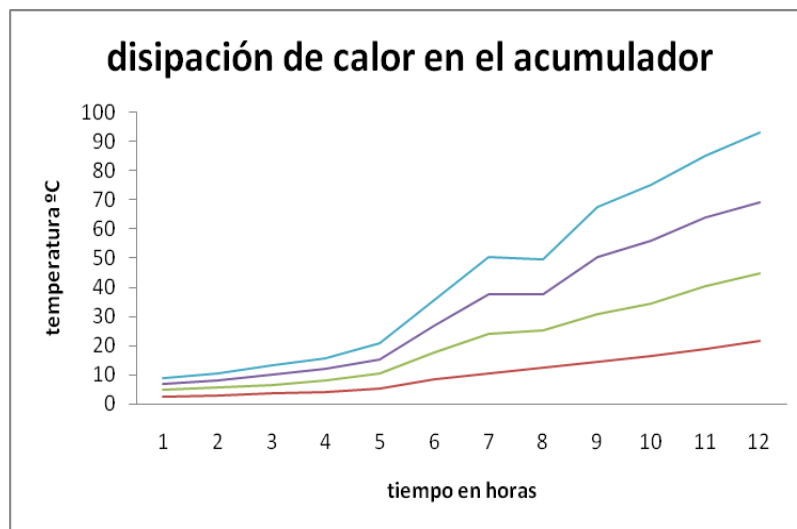
## Capítulo 4

## 4. Resultados

## Diseño del dispositivo de acumulación de energía térmica

El dispositivo diseñado permitió almacenar energía térmica en el refrigerante que circula en el interior del motor para aumentar rápidamente la temperatura de funcionamiento de este. Esta energía se hizo recircular en el interior de la culata cuando se va a realizar el encendido en frío, con esto se redujo el tiempo promedio de calentamiento del motor cuando está frío de 5 minutos a 2 minutos. Las pruebas se realizaron con válvulas activadas de manera manual, esta experimentación permitió valorar la eficiencia y funcionalidad en la reducción de emisiones de gases durante el encendido en frío, específicamente se evaluó la reducción de CO y HC.

En la **Figura 8**. Se muestra la variación de temperatura del refrigerante en el acumulador térmico, como se puede ver, la variación de temperatura en el sistema de acumulación fue de 1 °C en promedio por un periodo de 12 horas.



**Figura 8. Disipación de calor en el acumulador.**

Teniendo en cuenta que la geometría del acumulador térmico es cilíndrica, el volumen de residencia del sistema se definió mediante la siguiente ecuación:

$$V = D^2 \cdot \pi \cdot L / 4$$

$$V = (10 \text{ cm})^2 \cdot \pi \cdot (80 \text{ cm}) / 4 = 6283 \text{ cm}^3$$

El motor de combustión de 1.6L aproximadamente tiene un volumen en culata de 5 litros de fluido, se definió aumentar en 1 litro más la cantidad de refrigerante con el fin de tener presente el llenado de las mangueras y válvulas adicionales en la adaptación del sistema al motor.

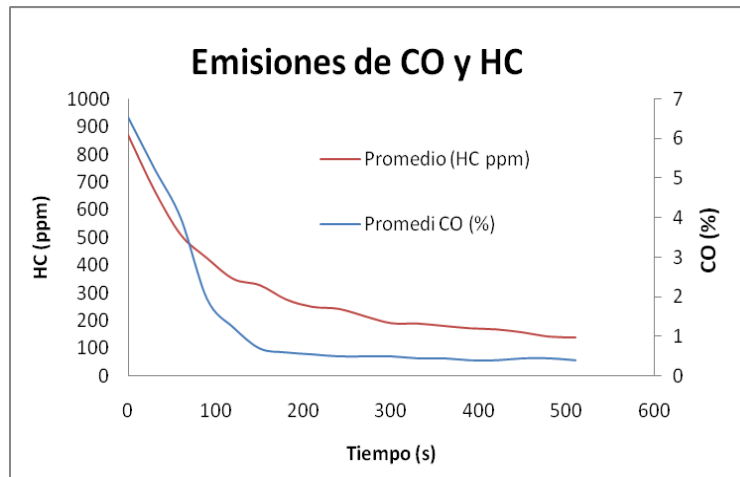
El acumulador térmico tiene internamente 2 cámaras, las cuales separan el fluido caliente del frío, por lo que se debió construir un sistema de pistón que separara las dos cámaras y a la vez impulsara el fluido según la necesidad de funcionamiento del sistema de acumulación. Este pistón se construyó en teflón, material que por su maleabilidad fue maquinado según las medidas internas del acumulador térmico y se adicionaron una serie de O-ring que ayudaron a la estanqueidad del fluido entre las 2 cámaras.

En el acumulador térmico se realizaron pruebas de estanqueidad, con refrigerante caliente y frío, pruebas de residencia de calor en el sistema y pruebas de presión.

Experimentalmente se realizaron varias pruebas, el sistema de acumulación se llenó con 7 litros de refrigerante, y cada hora se registró las pérdidas de calor, el tubo se aisló con 1 capa de aislante plástico thermolon, ver anexo 5. Este refrigerante tenía una temperatura de 90°C en el inicio de la medición y a las 12 horas de reposo el agua tenía una temperatura de 79°C, esta prueba se realizó dejando el acumulador sobre una plataforma de madera.

Se aplicaron diferentes pruebas de emisiones y tiempo de calentamiento, esto se realizó en diferentes motores con cilindrada y características similares al motor de pruebas, esto ayudó a tener un promedio del tiempo del calentamiento del motor al encenderlo a temperatura ambiente de 22 °C. Así mismo la cantidad de gases emitidos en este tiempo.

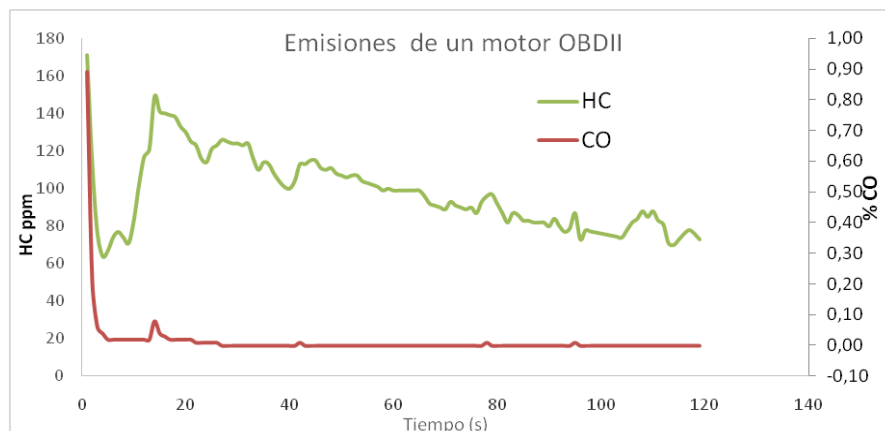
Los resultados de la Figura 9. Muestran que los HC tardan más tiempo en reducirse, comienzan en niveles muy altos y empiezan a disminuir después de 5 minutos, en este tiempo el motor de combustión con sistema de inyección OBD I, ya está emitiendo gases por debajo de la norma colombiana. Esto es debido a que en el motor al momento de arrancar en frío, los sistemas que ayudan a mitigar las emisiones como el catalizador, la sonda lambda no operan durante esta etapa; es importante aclarar que esto se da en motores que tengan equipamiento de sistema de inyección OBDI, en este tipo de sistemas la sonda lambda no tiene calefacción, esto hace que el sistema trabaje en lazo abierto hasta que el motor llega a su temperatura ideal de trabajo. El lazo abierto genera un funcionamiento con exceso de combustible para compensar la baja vaporización del combustible con el aire que ingresa al interior del motor. Al aumentar la cantidad de combustible la mezcla deja de ser estequiométrica y se convierte en una mezcla rica. Por otro lado la baja temperatura del aire incide en la disminución de la homogenización de esta mezcla, generando condensación del combustible y a su vez una alta emisión de HC durante la etapa de calentamiento del motor de combustión.



**Figura 9. Emisiones de CO y HC a 800 rpm sin el dispositivo**

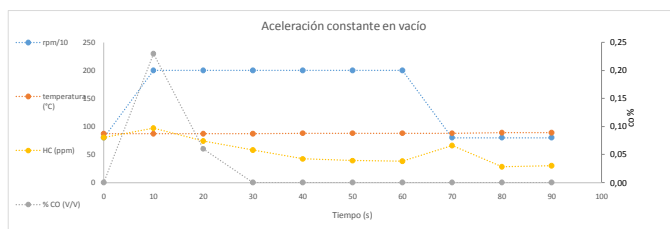
Cuando el motor va incrementando la temperatura de funcionamiento, los sistemas anti contaminación comienzan a captar señales, de esta forma el control electrónico o (unidad de control electrónica) ECU comienza a estabilizar el funcionamiento del motor, desde el pulso de inyección hasta la temperatura de los gases de escape.

Por otro lado la tecnología de los motores ha evolucionado con el fin de mejorar los procesos de emisiones es por ello que los motores tienen equipados sistemas como OBDII y sensor de oxígeno con calefacción, estos adelantos tienen una ventaja muy importante en comparación con el sistema OBDI y sensor de oxígeno sin calefacción. Esta ventaja consiste en que el motor entra en lazo cerrado en 20 segundos, teniendo una incidencia directa en las emisiones de gases emitidas al ambiente. Cuando el analizador de gases comienza con la captura de datos, las emisiones ya están por debajo de los niveles máximos permitidos por la norma legislativa colombiana. En la Figura 10. Se aprecia que los motores equipados con sistemas de inyección OBDII, aproximadamente en 20 segundos ya están por debajo de la norma ambiental colombiana. Las bajas emisiones de gases en los primeros ciclos de funcionamiento pueden ser atribuidas a la calefacción que tiene el sensor de oxígeno, esto hace que las señales lleguen de manera rápida a la ECU (unidad de control electrónica) y esta regula el funcionamiento del motor de lazo abierto a lazo cerrado, reduciendo la cantidad de combustible inyectado y por ende reduciendo las emisiones de gases emitidas en esta etapa.



**Figura 10. Emisiones de un motor OBD2 durante el arranque en frío**

En la Figura 11. Se puede observar cuando el motor con sistema OBDII y sensor de oxígeno con calefacción, tiene una demanda de carga en la potencia de manera repentina, los niveles de emisiones aumentan, superando los niveles permitidos en la legislación colombiana. Esto se da porque hay un enriquecimiento en la mezcla de combustible, dejando de ser estequiométrica ya que el sistema pasa de trabajar en lazo cerrado a lazo abierto, con el fin de lograr un aprovechamiento en el aumento de oxígeno que se da a la cámara de combustión y de este modo disponer del incremento de potencia que se ha exigido.



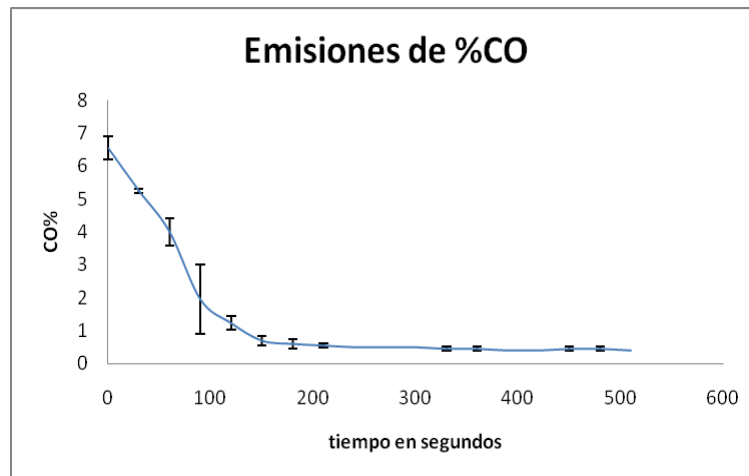
**Figura 11. Aceleración a 2000 rpm en vacío.**

Cuando las demandas de potencia se realizan de manera constante y progresiva, las emisiones tienden a disminuir incluso por debajo de los obtenidos con el motor en ralentí. Esto puede atribuirse a que el catalizador va aumentando de manera progresiva la temperatura de funcionamiento debido a que hay un flujo más alto y constante de gases de escape, los cuales incrementan la temperatura de funcionamiento del dispositivo y a su vez la eficiencia. Adicional a esto la señal del sensor de oxígeno tiene menos fluctuaciones y la ECU (unidad de control

electrónica), realiza las correcciones en la cantidad de combustible necesario optimizándolo en comparación con las aceleraciones repentinas.

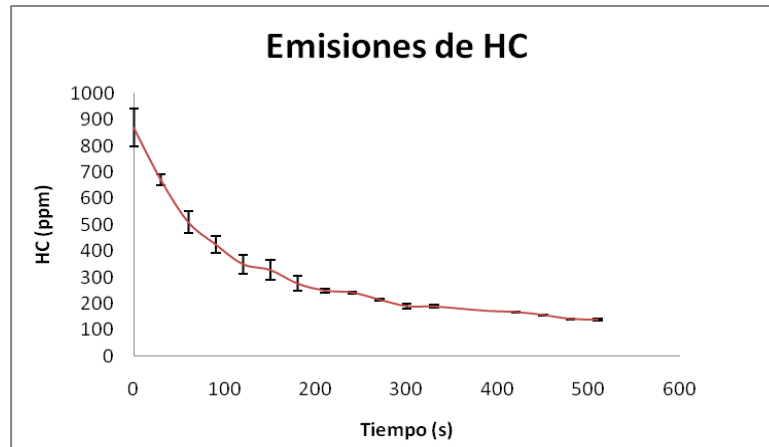
#### 4.1 Emisiones durante el arranque en frío sin el dispositivo de acumulación térmico

En la Figura 12. Se muestran las emisiones de CO sin el dispositivo, operando en ralentí, donde se puede observar que las emisiones de CO pasan de 6,55 a 0,7 %CO en aproximadamente 150 segundos, tiempo en el cual se cumplen los límites de la norma ambiental colombiana, esto es debido a que el motor está trabajando con un incremento de combustible para compensar la baja vaporización del combustible.



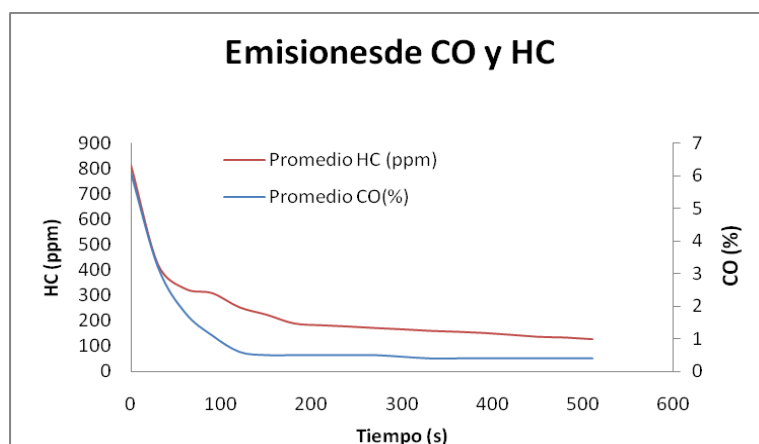
**Figura 12. Emisiones de % CO a 800 rpm sin el dispositivo**

En la Figura 13. Se muestran las emisiones de HC sin el dispositivo, operando en ralentí. Las emisiones se reducen desde 870 ppm hasta 190 ppm en un tiempo de 300 segundos, cumpliendo la norma colombiana. La mezcla fuera de los parámetros estequiométrica 14,7:1, debido al incremento en el tiempo de inyección hace que esta mezcla sea rica en combustible, ayuda a mejorar la estabilidad en el funcionamiento del motor, sin embargo incrementa los niveles de emisiones de gases en la etapa de encendido en frío.



**Figura 13. Emisiones de HC a 800 sin el dispositivo**

En la Figura 14. Se muestra el tiempo de calentamiento del motor sin el dispositivo con el motor funcionando a 2000 rpm. Se puede evidenciar una disminución del tiempo de calentamiento con respecto a la prueba a 800 rpm, en este rango de revoluciones el motor tiende a cumplir los parámetros de CO y HC en menor tiempo que a bajas revoluciones. Esto se debe a un calentamiento acelerado de las paredes del cilindro y la tapa superior de motor, mejorando la gasificación del combustible y con esto reduciendo el tiempo en llegar a cumplir la norma ambiental colombiana.

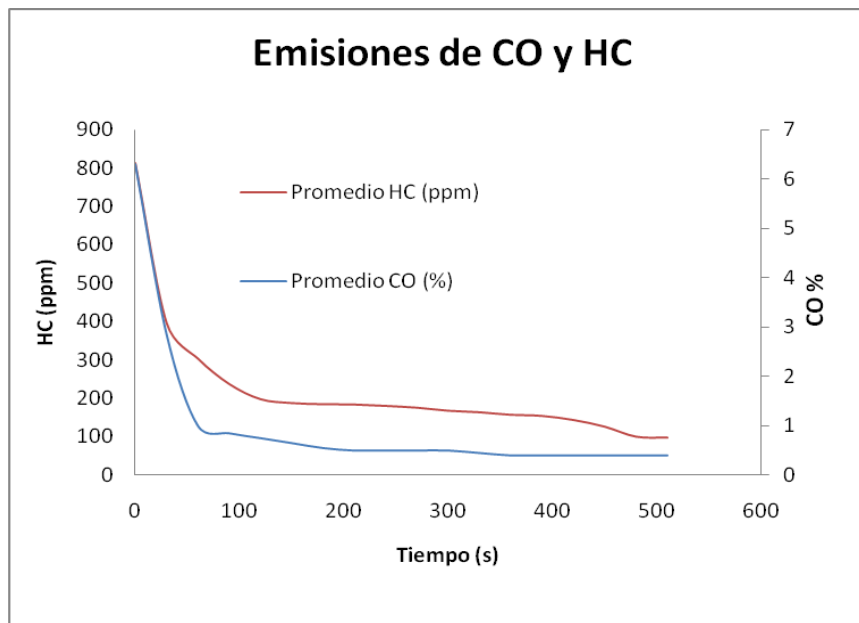


**Figura 14. Emisiones HC y CO a 2000 rpm sin dispositivo**

Los niveles de CO comienzan en 7% y se reducen a 0,95 en un tiempo de 120 segundos; De igual forma la tendencia se mantiene en la reducción del HC estos comienzan en 859 ppm y se reducen a 192 en 210 segundos.

#### 4.2 Emisiones durante el arranque en frío con el dispositivo de acumulación térmico

En la Figura 15. Se muestran las emisiones de HC con el dispositivo instalado, como se puede observar las emisiones de HC comienzan en 800 ppm, y llegan al límite de la norma ambiental colombiana en aproximadamente 120 segundos, teniendo una reducción del 50% en el tiempo que tarda el motor en sobrepasar la norma ambiental colombiana comparado sin el dispositivo. Por su parte las emisiones de CO inician con valor de 5,7% y llegan al límite de la norma colombiana. En un tiempo de 60 segundos, En estos gases se tiene una reducción del 40% en el tiempo que tarda el motor en sobrepasar la norma ambiental colombiana para un motor con tecnología OBDI, con respecto al calentamiento sin el dispositivo.



**Figura 15. Emisiones durante el arranque en frío a 800 rpm con dispositivo.**

En la Figura 16. Se muestran las emisiones de CO durante el arranque en frío, con el motor funcionando a 2000 rpm y con el acumulador térmico instalado. Como se puede observar, las emisiones de CO disminuyeron hasta cumplir la norma colombiana en un tiempo de 60 segundos. Mientras que las emisiones de HC se redujeron en un tiempo de 90 segundos.



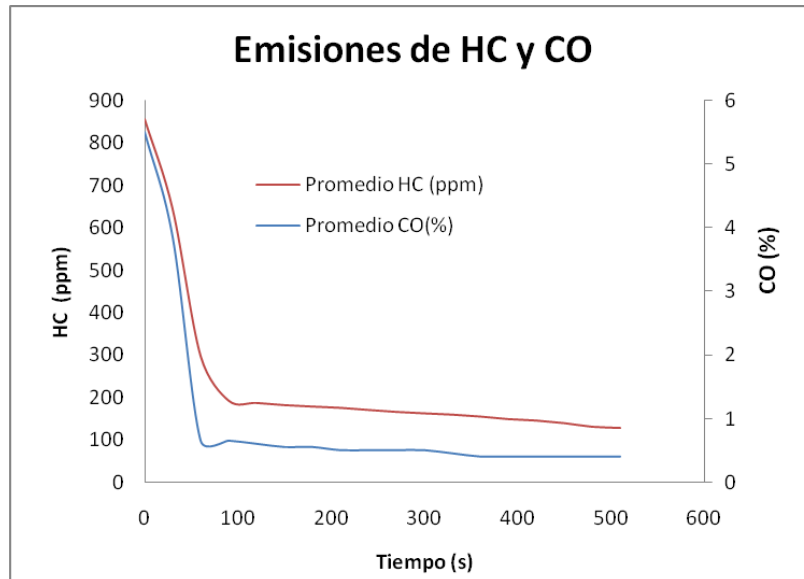


Figura 16. Emisiones durante el arranque en frío a 2000 rpm con el dispositivo.

En la Tabla 10. Se muestra el promedio de los resultados y el orden de realización de las pruebas

Tabla 10. Resultados diseño de experimentos.

Orden Est	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	RPM	Dispositivo	Tiempo de calentamiento	Delta a CO	Tiempo de calentamiento	Delta a HC
3	1	1	1	800	Con	60	1,0	150	197,0
4	2	1	1	2000	Con	60	0,65	90	194
8	3	1	1	2000	Con	60	0,75	120	199,6
5	4	1	1	800	Sin	150	0,7	300	195
1	5	1	1	800	Sin	120	0,9	250	201
2	6	1	1	2000	Sin	120	0,95	210	192
6	7	1	1	2000	Sin	120	0,6	180	188,

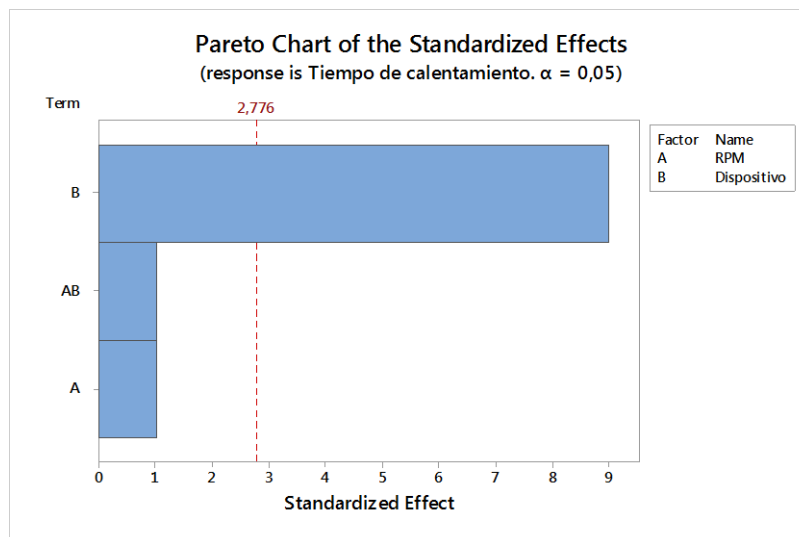
										5
7	8	1	1	800	Con	60	1	120	198,	5

El factor que influencia las emisiones de CO y HC es el dispositivo. Con estos resultados se verificó que las tendencias de variabilidad en el funcionamiento del motor fueran coherentes con lo reportado en la literatura. En la Tabla 11. Se muestran los valores P los cuales indican la influencia del dispositivo en las rpm de funcionamiento del motor. Un valor P menor que 0.05 indica una alta probabilidad de incidencia del factor.

**Tabla 11. Análisis de valor P.**

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		93,75	3,75	25,00	0,000	
RPM		-7,50	3,75	-1,00	0,374	1,00
Dispositivo		-67,50	3,75	-9,00	0,001	1,00
RPM*Dispositivo		7,50	3,75	1,00	0,374	1,00

Confirmando la información de la Tabla 11, el pareto chart de la Figura 17. Muestra que la variable más significativa es el uso del dispositivo para reducciones de emisiones de CO y HC. Teniendo disminuciones del 40 y 50% respectivamente, en el tiempo que tarda el motor en cumplir la norma ambiental colombiana. estos resultados comparados con los reportados por (Gumus, 2009) los cuales tiene reducciones de CO y HC del 64 y 15% respectivamente, pueden ser atribuibles a las condiciones de inicio de las pruebas que eran de 2 °C para la puesta en marcha del motor en los primeros ciclos de funcionamiento, esta baja temperatura crea un incremento en el tiempo de calentamiento y aumento en las emisiones.



**Figura 17. Pareto Chart**

La implementación del sistema de acumulación para aprovechar el calor contenido el refrigerante para precalentar el motor en sus primeros ciclos de funcionamiento, tiene una reducción en el tiempo que tarda el motor en cumplir la norma ambiental colombiana, en el motor de inyección electrónica con tecnología OBDI, los sistemas equipados con tecnología OBDII; las sondas calefactadas alcanzan la reducción de emisiones gracias a la rápido ingreso de la información de sonda lambda a la ECM.

## Capítulo 5

### 5. Conclusiones

La tecnología automotriz le falta desarrollo en los motores durante el arranque en frío por eso aún normas como EURO 6 permiten emisiones en frío muy superiores a las emisiones con el motor a temperatura de operación, la implementación de un sistema de precalentamiento del motor con un acumulador térmico, haría posible reducir las emisiones al punto que un motor pueda tener estándares de emisiones más rigurosos y cumplir con normas más exigentes.

Con la implementación del sistema de acumulación de energía térmica se logró la reducción del tiempo que tarda el motor en cumplir la norma ambiental colombiana 40% y 50%, de CO y HC respectivamente en motores OBD1.

El sistema de acumulación influye directamente en el tiempo que tarda el motor de combustión interna con sistema OBDI en los primeros ciclos de funcionamiento, reduciendo el tiempo en cumplir la norma ambiental colombiana.

El rango de revoluciones en los primeros ciclos de funcionamiento, es determinante ya que el motor ingreso rápidamente en el umbral de la norma de emisiones colombiana sin el dispositivo. Estuvo alrededor de los 90 y 180 segundos para CO y HC respectivamente. Con el dispositivo estuvo en un rango de 60 y 120 segundos para el CO y HC. Teniendo una reducción de emisiones en un rango de 2000 rpm en los primeros ciclos de funcionamiento.

#### 5.1 Recomendaciones

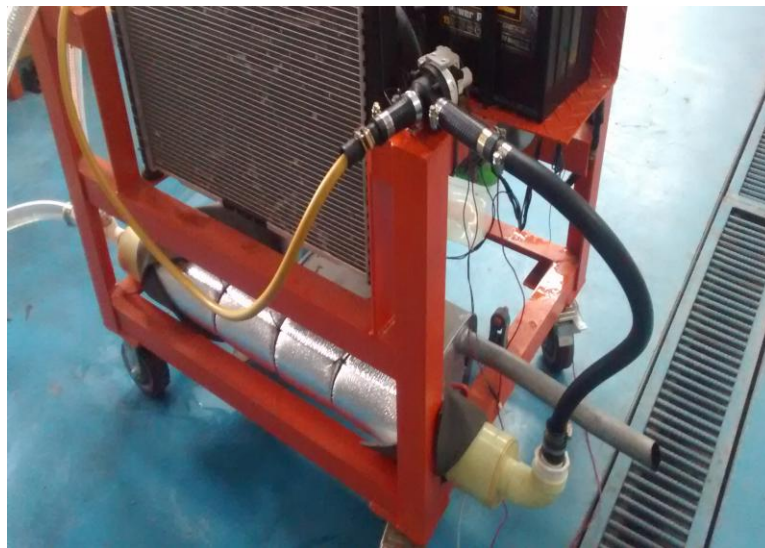
La adaptación del sistema de acumulación en motores con sistema OBDI y anteriores, puede presentarse en una solución para reducir el tiempo en cumplir la norma de emisiones colombiana. con esto se podría disminuir las emisiones más importantes que se generan en los primeros ciclos de funcionamiento que calentamiento ya que en esta etapa se emiten entre el 60 y 80% del total de las emisiones contaminantes producidas por el motor (Gumus, 2009) & (Vasiliev, Burak, Kulakov, Mishkinis, & Bohan, 1999).

El sistema de acumulación puede mejorar la temperatura de residencia, modificando los materiales de construcción del cilindro y el aislante térmico. Con ello se podría mejorar la temperatura disponible para el ingreso al bloque del motor.

## 6. Anexos



Anexo 1. Motor en banco



Anexo 2. Instalación acumulador



Anexo 3. Acumulador y pistón interno





## Anexo 4. Parte inferior de acumulador

## CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

### EFICACIA TÉRMICA\*: EQUIVALENTE A 80 mm DE LANA DE VIDRIO

\* Eficacia térmica equivalente medida según el método de ensayo en condiciones reales de uso, comparando el consumo energético de una construcción aislada con el aislante ACTIS respecto a otra idéntica aislada con 200 mm de lana de vidrio cuya conductividad térmica es  $\lambda = 0,04 \text{ W/m.K}$  (Método validado por el BM TRADA, laboratorio inglés acreditado, miembro de EOTA).

Nº de capas: 5

- 2 láminas externas en aluminio

- 1 espumas

- 2 capas de burbujas

Numero de láminas reflectoras: 2

Espesor aprox.: 10 mm

PROPIEDADES	VALORES	NORMAS DE REFERENCIAS
<b>Reacción al fuego</b>		
- Ensayo realizado sobre el aislante solo	E	EN ISO 11925-2
- Ensayo realizado sobre el aislante asociado a una placa de yeso de 10 mm mínimo (PV n°2005-CVB-R0131)	B-s1, d0	EN ISO 13823
<b>Resistencia mecánica</b>		
- Rotura	Longitudinal	> 80 N
	Transversal	> 80 N
- Alargamiento a la rotura	Longitudinal	> 50 %
	Transversal	> 50 %
- Rasgado	Longitudinal	> 20 N
	Transversal	> 10 N
<b>PRESENTACIÓN</b>		
	<b>20 m<sup>2</sup> (rollo)</b>	
Ancho	1,50 m	
Largo	13,34 m	
Peso/rollo	11,5 kg	

## Anexo 5. Características técnicas thermolon.

## 7. Bibliografía

Agarwal, A. K., Karare, H., & Dhar, A. (2014). Combustion, performance, emissions and particulate characterization of a methanol–gasoline blend (gasohol) fuelled medium duty spark ignition transportation engine. *Fuel Processing Technology*, 121(X), 16–24. doi:10.1016/j.fuproc.2013.12.014

Agarwal, D., Singh, S. K., & Agarwal, A. K. (2011). Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on performance, emissions, deposits and durability of a constant speed compression ignition engine. *Applied Energy*, 88(8), 2900–2907. doi:10.1016/j.apenergy.2011.01.066

Alejandro, D., Cortes, B., & Ambiental, I. (n.d.). Modelo calidad del aire air quality model. *MCS Consultoria*.

- Alonso, S., & Ignacio, J. (2001). Orrego y del Valle 2001 - 1 -, 1–31.
- Andrianov, D. I., Manzie, C., & Brear, M. J. (2013). Spark ignition engine control strategies for minimising cold start fuel consumption under cumulative tailpipe emissions constraints. *Control Engineering Practice*, 21(8), 1007–1019. doi:10.1016/j.conengprac.2013.03.011
- Breu, F., Guggenbichler, S., & Wollmann, J. (2008a). No Title. *Vasa*. Retrieved from <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>
- Breu, F., Guggenbichler, S., & Wollmann, J. (2008b). No Title. *Vasa*, 0282. Retrieved from <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>
- Carmen, M., & Florentino, R. (2010). Estudio de factibilidad técnico-económica de un proceso de adsorción para remover compuestos de azufre presentes en diesel Technical and economical feasibility study of an adsorption process for removing sulfur compounds from diesel. *Redalyc*.
- Chan, S. H., & Hoang, D. L. (1999). Heat transfer and chemical reactions in exhaust system of a cold-start engine. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42(22), 4165–4183. doi:10.1016/S0017-9310(99)00064-2
- Contaminación atmosférica principales contaminantes. (2005), 1–21.
- Dardiotis, C., Martini, G., Marotta, A., & Manfredi, U. (2013). Low-temperature cold-start gaseous emissions of late technology passenger cars. *Applied Energy*, 111, 468–478. doi:10.1016/j.apenergy.2013.04.093
- Engine, A. C. (2012). Advanced Combustion Engine Research and Development.
- Fan, Q., & Li, L. (2013). Study on first-cycle combustion and emissions during cold start in a TSDI gasoline engine. *Fuel*, 103, 473–479. doi:10.1016/j.fuel.2012.07.025
- Favez, J.-Y., Weilenmann, M., & Stilli, J. (2009). Cold start extra emissions as a function of engine stop time: Evolution over the last 10 years. *Atmospheric Environment*, 43(5), 996–1007. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.03.037
- Giechaskiel, B., Maricq, M., Ntziachristos, L., Dardiotis, C., Wang, X., Axmann, H., ... Schindler, W. (2014). Review of motor vehicle particulate emissions sampling and measurement: From smoke and filter mass to particle number. *Journal of Aerosol Science*, 67, 48–86. doi:10.1016/j.jaerosci.2013.09.003
- Gong, C., Huang, K., Deng, B., & Liu, X. (2011). Catalyst light-off behavior of a spark-ignition LPG (liquefied petroleum gas) engine during cold start. *Energy*, 36(1), 53–59. doi:10.1016/j.energy.2010.11.026

- Gong, C.-M., Li, J., Li, J.-K., Li, W.-X., Gao, Q., & Liu, X.-J. (2011). Effects of ambient temperature on firing behavior and unregulated emissions of spark-ignition methanol and liquefied petroleum gas/methanol engines during cold start. *Fuel*, *90*(1), 19–25. doi:10.1016/j.fuel.2010.08.012
- Gumus, M. (2009). Reducing cold-start emission from internal combustion engines by means of thermal energy storage system. *Applied Thermal Engineering*, *29*(4), 652–660. doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.03.044
- Henein, N. ., & Tagomori, M. . (1999). Cold-start hydrocarbon emissions in port-injected gasoline engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, *25*(6), 563–593. doi:10.1016/S0360-1285(99)00003-9
- Ji, C., Liang, C., Gao, B., Wei, B., Liu, X., & Zhu, Y. (2013). The cold start performance of a spark-ignited dimethyl ether engine. *Energy*, *50*, 187–193. doi:10.1016/j.energy.2012.10.028
- Khan, W. a., Culham, J. R., & Yovanovich, M. M. (2005). Fluid Flow Around and Heat Transfer From an Infinite Circular Cylinder. *Journal of Heat Transfer*, *127*(7), 785. doi:10.1115/1.1924629
- Ko, J., & Ju, H. (2013). Effects of cathode catalyst layer design parameters on cold start behavior of polymer electrolyte fuel cells (PEFCs). *International Journal of Hydrogen Energy*, *38*(1), 682–691. doi:10.1016/j.ijhydene.2012.05.154
- Li, T., Deng, K., Peng, H., & Wu, C. (2013). Effect of partial-heating of the intake port on the mixture preparation and combustion of the first cranking cycle during the cold-start stage of port fuel injection engine. *Experimental Thermal and Fluid Science*, *49*, 14–21. doi:10.1016/j.expthermflusci.2013.03.001
- Monteiro Sales, L. C., & Sodr e, J. R. (2012). Cold start characteristics of an ethanol-fuelled engine with heated intake air and fuel. *Applied Thermal Engineering*, *40*, 198–201. doi:10.1016/j.applthermaleng.2012.01.057
- Or , E., de Gracia, a., Castell, a., Farid, M. M., & Cabeza, L. F. (2012). Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. *Applied Energy*, *99*, 513–533. doi:10.1016/j.apenergy.2012.03.058
- Pan, J., Shu, G., & Wei, H. (2014). Research on in-cylinder pressure oscillation characteristic during knocking combustion in spark-ignition engine. *Fuel*, *120*, 150–157. doi:10.1016/j.fuel.2013.11.054
- Pastor, J. V., García-Oliver, J. M., Pastor, J. M., & Ramírez-Hernández, J. G. (2011). Ignition and combustion development for high speed direct injection diesel engines under low temperature cold start conditions. *Fuel*, *90*(4), 1556–1566. doi:10.1016/j.fuel.2011.01.008

- Peng, H., Cui, Y., Shi, L., & Deng, K. (2008). Effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions during cold start of direct injection (DI) diesel engine. *Energy*, 33(3), 471–479. doi:10.1016/j.energy.2007.10.014
- Qasim, S. A., Afzaal Malik, M., Ali Khan, M., & Mufti, R. a. (2011). Low viscosity shear heating in piston skirts EHL in the low initial engine start up speeds. *Tribology International*, 44(10), 1134–1143. doi:10.1016/j.triboint.2011.04.018
- Ramajo, D. E., & Nigro, N. (n.d.). MOTORES DE COMBUSTION INTERNA.
- Vasiliev, L. L., Burak, V. S., Kulakov, A. G., Mishkinis, D. a, & Bohan, P. V. (1999). Heat storage device for pre-heating internal combustion engines at start-up. *International Journal of Thermal Sciences*, 38(1), 98–104. doi:10.1016/S0035-3159(99)80020-8
- Will, F. (2012). Fuel conservation and emission reduction through novel waste heat recovery for internal combustion engines. *Fuel*, 102, 247–255. doi:10.1016/j.fuel.2012.06.044