

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

**TESIS DE GRADO PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO MECÁNICO AUTOMOTRIZ**

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE MÓDULOS
TERMOELÉCTRICOS PARA TRANSFORMACIÓN DEL
CALOR EXISTENTE EN EL COLECTOR DE ESCAPE A
ENERGÍA ELÉCTRICA EN UN MOTOR G10.”**

AUTORES:

GUAYLLAS GUAMAN LUIS FABRICIO

UZHU PALOMINO JUAN PABLO

DIRECTOR:

ING. ROBINSON PORTILLA

CUENCA - ECUADOR

2014

CERTIFICACIÓN

Certifico, que el presente trabajo de tesis fue desarrollado en su totalidad por los señores GUAYLLAS GUAMAN LUIS FABRICIO Y UZHU PALOMINO JUAN PABLO, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and strokes, positioned above a horizontal dashed line.

ING. ROBINSON PORTILLA

DECLARACIÓN

Este trabajo de grado declaramos bajo juramento que es de nuestra autoría; que no ha sido presentado previamente para ningún grado o calificación personal; y que hemos consultado todas las referencias bibliográficas que se adjuntan en el presente documento.

La Universidad Politécnica Salesiana, puede hacer uso de los derechos correspondientes al presente trabajo de tesis, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, para fines educativos.



Guayllas Guaman Luis Fabricio



Uzhu Palomino Juan Pablo

AGRADECIMIENTO

Expreso mi agradecimiento a Dios, por darme la fuerza para culminar esta meta; a mi Familia que siempre me apoyaron incondicionalmente durante la misma. También estoy en deuda con compañeros y amigos que contribuyeron de forma directa e indirecta en el desarrollo de este trabajo de tesis.

Guayllas Guaman Luis Fabricio

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mis profundos agradecimientos; primero a Dios, que me ha dado la sabiduría para culminar en esta etapa de mi vida.

Seguidamente a las personas que hicieron posible este proyecto de Tesis de grado; Ing. Fabricio Espinoza por sus conocimientos brindados y aportación de ideas en diferentes puntos relevantes. De igual manera un agradecimiento especial al Director de Tesis, Ing. Robinson Portilla; por su apoyo, y tiempo brindado en la culminación de este Trabajo de Grado.

Para finalizar, quiero dar las gracias a todos mis familiares, que de alguna forma siempre han estado apoyándome, brindándome toda la confianza y siempre he tenido su apoyo incondicional.

Uzhu Palomino Juan Pablo

DEDICATORIA

Este trabajo de Tesis la dedico a mi Esposa e Hijo, por su comprensión y su apoyo. A mis Padres, hermanos que siempre tuvieron influencias positivas en mi a través de los años para ser una persona de bien.

A ellos que siempre serán un pilar fundamental en mi vida, gracias.

Guayllas Guaman Luis Fabricio

DEDICATORIA

Esta Tesis de Grado, está dedicado a Dios y a todos mis familiares los cuales siempre me han brindado el apoyo suficiente en este proceso de mi vida, porque siempre puedo contar con ellos incondicionalmente, por ayudarme a crecer como persona y como ser humano, por saber entenderme, comprenderme y ayudarme en todo este tiempo.

Uzhu Palomino Juan Pablo

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| LISTA DE GRAFICOS | xii |
| LISTA DE TABLAS | xvi |
| 1 Investigación del funcionamiento y los tipos de módulos termoelectricos existentes en el mercado..... | 17 |
| 1.1 Historia de los efectos termoelectricos | 17 |
| 1.2 Termoelectricidad. | 19 |
| 1.2.1 Fundamentos teóricos de la termoelectricidad. | 20 |
| 1.2.2 Fenómenos termoelectricos..... | 20 |
| 1.2.2.1 Efecto Seebeck..... | 20 |
| 1.2.2.2 Efecto Joule..... | 21 |
| 1.2.2.3 Efecto Fourier. | 22 |
| 1.2.2.4 Efecto Peltier..... | 22 |
| 1.2.2.5 Efecto Thomson..... | 23 |
| 1.3 Corriente eléctrica y de calor simultánea en un conductor | 25 |
| 1.4 Efectos Seebeck y Peltier..... | 26 |
| 1.5 Efecto Thomson y ecuaciones de kelvin..... | 28 |
| 1.6 Dispositivos termoelectricos | 29 |
| 1.6.1 Partes principales que conforman un módulo termoelectrico | 29 |
| 1.7 Módulo Peltier de una sola etapa | 30 |
| 1.8 Difusión de portadores de carga en un módulo termoelectrico..... | 30 |
| 1.9 Características universales de Módulos Termoelectricos de efecto Peltier. | 31 |
| 1.10 Módulos termoelectricos comerciales..... | 31 |
| 1.10.1 Módulos termoelectricos Peltier..... | 32 |
| 1.10.2 Módulos termoelectricos de efecto Seebeck. | 35 |

| | |
|---|----|
| 2 Selección de los módulos termoelectricos más óptimos previos a la implementación y experimentación en el motor G-10. | 37 |
| 2.1 Perdidas en el motor de combustión interna. | 37 |
| 2.2 Formas de transferencia de calor del colector de escape. | 38 |
| 2.2.1 Conducción..... | 39 |
| 2.2.2 Convección..... | 40 |
| 2.2.3 Radiación..... | 41 |
| 2.3 Eficiencia de un módulo termoelectrico. | 43 |
| 2.4 Modelo teórico para la implementación del sistema de generación en el motor G10..... | 43 |
| 2.5 Características básicas del Testo 882 Cámara termográfica. | 45 |
| 2.6 Medición de temperaturas en el colector de escape del motor G10 previo a la implementación y selección del módulo termoelectrico tipo Peltier. | 47 |
| 2.6.1 Temperatura en el colector de escape del motor G10. | 47 |
| 2.6.2 Disponibilidad de área para la implementación del módulo termoelectrico. | 49 |
| 2.6.3 Geometría del colector de escape del motor G10..... | 50 |
| 2.7 Construcción de la protección superior del colector de escape del motor G10. .. | 52 |
| 2.8 Selección del disipador de calor..... | 56 |
| 2.9 Rendimiento de los módulos termoelectricos. | 58 |
| 2.10 Selección de los módulos termoelectricos. | 59 |
| | |
| 3 Instalación del módulo termoelectrico y realización del estudio estadístico del comportamiento en el colector de escape del motor G10. | 64 |
| 3.1 Optimización de las temperaturas. | 64 |
| 3.1.1 Temperatura superficial de la base del modelo experimental. | 64 |
| 3.1.2 Temperatura del disipador de calor. | 66 |
| 3.2 Entorno en el que se colocara el modelo experimental..... | 68 |
| 3.3 Instalación del modelo de experimentación..... | 69 |

| | |
|---|-----------|
| 3.4 Implementación de los sensores de temperatura en el sistema de generación de energía eléctrica. | 71 |
| 3.4.1 Sensor de temperatura LM35DZ. | 71 |
| 3.4.2 Implementación de los sensores LM35DZ. | 72 |
| 3.5 Implementación del sensor de velocidad y RPM en el vehículo Chevrolet Forsa II. | 73 |
| 3.5.1 El funcionamiento del sensor CNY70. | 74 |
| 3.6 Sistema de adquisición de datos. | 76 |
| 3.6.1 Partes de un Sistema de adquisición de datos. | 76 |
| 3.6.2 Sensores. | 77 |
| 3.6.3 Dispositivo DAQ NI USB 6212. | 77 |
| 3.6.3.1 Características generales. | 77 |
| 3.6.4 Software controlador y software de aplicación. | 78 |
| 3.7 Muestras para población Infinita. | 80 |
| 3.7.1 Formulas para calcular la muestra en estudios descriptivos. | 81 |
| 3.7.2 Cálculo del tamaño de la muestra para una población infinita. | 82 |
| 3.8 Experimentación. | 82 |
| 3.8.1 Pruebas estáticas. | 83 |
| 3.8.1.1 Calentamiento del MCI G10. | 83 |
| 3.8.1.2 Enfriamiento del MCI G10. | 83 |
| 3.8.2 Pruebas en Ciudad. | 84 |
| 3.8.3 Pruebas en Carretera. | 86 |
| 3.8.3.1 Pruebas en carretera plena carga. | 86 |
| 3.8.3.2 Pruebas en autopista. | 87 |
| | |
| 4 Analizar los resultados obtenidos sobre el comportamiento de los módulos termoelectricos en el motor G10. | 89 |
| 4.1 Calculo del número de muestras. | 89 |
| 4.2 Cálculo del tamaño de la muestra para una población infinita. | 89 |
| 4.3 Calor utilizado para la generación eléctrica. | 90 |
| 4.4 Análisis en estado estático del modelo experimental de generación termoelectrica. | 92 |
| 4.4.1 Calentamiento del MCI G10. | 92 |

| | |
|---|-----|
| 4.4.2 Enfriamiento del MCI G10..... | 93 |
| 4.5 Análisis de la influencia de la velocidad en el lado frío y de las RPM en el lado caliente del modelo experimental de generación termoeléctrica. | 94 |
| 4.5.1 Análisis en tránsito en ciudad o urbano..... | 94 |
| 4.5.2 Análisis tránsito en carretera. | 97 |
| 4.5.3 Análisis en tránsito en autopista. | 99 |
| 4.6 Revisión de resultados de la experimentación. | 100 |
| 4.7 Validación de datos. | 101 |
| 4.7.1 Validación de datos en ciudad..... | 102 |
| 4.7.2 Validación de datos en carretera. | 104 |
| 4.7.3 Validación de datos en Autopista. | 106 |
| 4.8 Posible montaje para aprovechar la temperatura superficial de la base..... | 108 |
| 4.8.1 Optimización de la refrigeración mediante toma de aire al disipador..... | 109 |
| 4.8.2 Generación con el montaje final, en las diferentes situaciones. | 110 |
| CONCLUSIONES | 113 |
| RECOMENDACIONES | 115 |
| BIBLIOGRAFÍA | 117 |
| ANEXOS | 121 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Grafico 1: Thomas Johann Seebeck..... | 17 |
| Grafico 2: Jean Charles Peltier..... | 18 |
| Grafico 3: William Thomson | 18 |
| Grafico 4: Efecto Seebeck..... | 21 |
| Grafico 5: Efecto Joule..... | 21 |
| Grafico 6: Efecto Fourier. | 22 |
| Grafico 7: Termopar formado por los conductores A y B con soldaduras T y T _R | 23 |
| Grafico 8: Efecto Thomson. | 24 |
| Grafico 9: Termopar formado por los alambres A y B unidos a los alambres de Cu C y C a los bornes de conexión de un potenciómetro..... | 26 |
| Grafico 10: Termounión de los dos conductores A y B a temperatura constante y uniforme T..... | 27 |
| Grafico 11: a) en ausencia de corriente eléctrica no hay flujo de calor entre una parte del alambre A a temperatura T y su fuente de calor a T. b) en presencia de la corriente eléctrica, la transferencia de calor entre una parte del hilo A a temperatura T y su fuente de calor a T es igual a $\Delta I_Q = I^2 \Delta R - I\sigma_A \Delta T$ | 28 |
| Grafico 12: Circuito termoeléctrico básico que muestra el calor absorbido y disipado cuando se establece una corriente eléctrica..... | 29 |
| Gráfico 13: Configuración de un módulo termoeléctrico | 30 |
| Grafico 14: Dimensiones de los módulos termoelectrónicos..... | 32 |
| Grafico 15: Esquema genérico de la distribución de la energía del combustible en un vehículo equipado con motor de combustión..... | 38 |
| Grafico 16: Conducción de calor a través de una pared plana grande de espesor Δx y área A. | 39 |
| Grafico 17: Transferencia de calor por convección desde una superficie caliente hacia el aire. | 40 |
| Grafico 18: Enfriamiento de un huevo cocido por convección forzada y convección natural..... | 41 |
| Grafico 19: Transferencia de calor por radiación entre una superficie y las superficies que la circundan. | 42 |
| Grafico 20: Esquema de un generador de energía termoeléctrica basado en Cheng. | 44 |
| Grafico 21: Sistema experimental de Cheng..... | 45 |

| | |
|--|----|
| Gráfico 22: Testo 882 Cámara termográfica..... | 46 |
| Grafico 23: Colector de escape del motor G10..... | 47 |
| Grafico 24: Grafica de perfil de los tres ductos de colector de escape. | 48 |
| Grafico 25: Histograma de temperatura superficial de la parte superior del colector de escape. | 49 |
| Grafico 26: Protector del colector de escape distancias y puntos de sujeción..... | 50 |
| Grafico 27: Protector del colector de escape motor G-10..... | 51 |
| Grafico 28: Protector de la parte superior del colector de escape simulado en Solidworks. | 51 |
| Grafico 29: Molde de la protección superior del colector de escape del motor G-10. | 52 |
| Grafico 30: Protector del colector de escape del motor G-10..... | 53 |
| Grafico 31: Distribución de temperaturas en el soporte para el modelo experimental. | 53 |
| Grafico 32: Línea de perfil..... | 54 |
| Grafico 33: Histograma del área de la base seleccionada en la imagen térmica..... | 55 |
| Grafico 34: Curva de estabilidad de temperatura en la base de la protección del colector de escape del motor G10. | 55 |
| Grafico 35: Medidas de un disipador de calor comercial. | 56 |
| Grafico 36: siguiente curva de resistencia térmica. | 56 |
| Grafico 37: Disipador de calor instalado en la cara fría del módulo termoeléctrico. | 57 |
| Grafico 38: Disipación de calor. | 57 |
| Grafico 39: Estabilidad de las temperaturas del módulo termoeléctrico. | 58 |
| Grafico 40: Diagrama de equilibrio Ge-Si..... | 60 |
| Grafico 41: Estructura cristalina del compuesto Bi ₂ Te ₃ | 61 |
| Grafico 42: Láminas de aluminio colocadas y sujetadas con dos pernos. | 64 |
| Grafico 43: Análisis térmico de la ubicación del módulo Peltier, con láminas de aluminio. | 65 |
| Grafico 44: Líneas de perfil de temperatura del área ocupada por el módulo Peltier. | 66 |
| Grafico 45: Temperatura máxima y mínima del análisis en ANSYS..... | 67 |
| Grafico 46: Evolución de la temperatura vs el tiempo con convección forzada..... | 67 |
| Grafico 47: Influencia de la velocidad y RPM..... | 69 |

| | |
|--|----|
| Grafico 48: Pasta térmica entre las diferentes superficies de contacto con el módulo Peltier | 70 |
| Grafico 49: Sujeción del módulo Peltier y el disipador de calor. | 70 |
| Grafico 50: Diagrama de conexión del sensor LM35dz. | 72 |
| Grafico 51: Esquema de conexión de los sensores de temperatura LM35DZ. | 72 |
| Grafico 52: sensores de temperatura lado caliente, derecha lado frio..... | 73 |
| Grafico 53: CNY70 emisor y receptor encapsulados..... | 73 |
| Grafico 54: Disposición de los pines del sensor CNY70..... | 74 |
| Grafico 55: Esquema de conexión del sensor CNY70..... | 75 |
| Grafico 56: Grafico Señal digital de salida del sensor..... | 75 |
| Grafico 57: Sistema de adquisición de datos. | 76 |
| Grafico 58: DAQ NI USB 6212..... | 77 |
| Grafico 59: Esquema del programa en Labview..... | 79 |
| Grafico 60: Visualización de las señales de los sensores y voltaje generado. | 80 |
| Grafico 61: Muestra de señales obtenidas en el calentamiento..... | 83 |
| Grafico 62: Señal en tiempo continuo de las señales..... | 84 |
| Grafico 63: Ruta para tomar las muestras en ciudad..... | 85 |
| Grafico 64: Muestras de señales tránsito en Ciudad. | 85 |
| Grafico 65: Ruta para prueba carretera plena carga..... | 86 |
| Grafico 66: Muestra de señales en carretera plena carga. | 87 |
| Grafico 67: Ruta tomada para las muestras Autopista. | 87 |
| Grafico 68: Muestra de señales en Autopista..... | 88 |
| Grafico 69: Temperatura superficial desperdiciada y recuperada..... | 91 |
| Grafico 70: Temperatura residual del proceso de generación..... | 91 |
| Grafico 71: Sensores de temperatura, voltaje, corriente y RPM del MCI G10, en calentamiento. | 93 |
| Grafico 72: Sensores de temperatura, voltaje del modelo experimental, en enfriamiento. | 94 |
| Grafico 73: Señales de la prueba en ciudad o urbana. | 95 |
| Grafico 74: Potencia y ΔT en ciudad o urbana. | 96 |
| Grafico 75: Eficiencia de tránsito en ciudad o urbana. | 96 |
| Grafico 76: Señales de la prueba en carretera plena carga..... | 97 |
| Grafico 77: Potencia y ΔT en carretera plena carga..... | 98 |
| Grafico 78: Eficiencia de tránsito en carretera plena carga. | 98 |

| | |
|--|-----|
| Grafico 79: Señales de la prueba en autopista. | 99 |
| Grafico 80: Potencia y ΔT en autopista. | 100 |
| Grafico 81: Eficiencia de la prueba en autopista. | 100 |
| Grafico 82: Diagrama de cajas para las muestras estudiadas en autopista. | 103 |
| Grafico 83: Diagrama de cajas para las muestras estudiadas en autopista. | 105 |
| Grafico 84: Diagrama de cajas para las muestras estudiadas en autopista. | 107 |
| Grafico 85: Montaje de 5 módulos conectados en serie, en la base del modelo experimental..... | 108 |
| Grafico 86: Montaje de los módulos conectados en serie, con el disipador de calor. | 109 |
| Grafico 87: a) Montaje del modelo experimental, con entrada y salida de aire, b) Flujo de aire por el sistema de generación termoeléctrica. | 110 |
| Grafico 88: Voltaje generado por cinco módulos. | 111 |
| Grafico 89: Potencia generada por los cinco módulos..... | 112 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1: Simbología..... | 26 |
| Tabla 2: Simbología..... | 27 |
| Tabla 3: Modulo termoeléctricos CP20serie..... | 32 |
| Tabla 4: Modulo termoeléctricos CP30serie..... | 33 |
| Tabla 5: Modulo termoeléctricos CP60serie..... | 34 |
| Tabla 6: Modulo termoeléctricos CP85serie..... | 35 |
| Tabla 7: Módulos termoeléctricos de Generación..... | 36 |
| Tabla 8: Distribución de temperaturas en el colector de escape de un motor G-10... 48 | 48 |
| Tabla 9: Distribución de temperaturas en el colector de escape de un motor G-10... 54 | 54 |
| Tabla 10: Materiales de los módulos termoeléctricos..... | 60 |
| Tabla 11: Módulos termoeléctricos CP85 series..... | 62 |
| Tabla 12: Precauciones generales de los módulos termoeléctricos CP85438..... | 63 |
| Tabla 13: Distribución de temperaturas en el colector de escape de un motor G-10. 65 | 65 |
| Tabla 14: El nivel de confianza..... | 80 |
| Tabla 15: La precisión absoluta (d)..... | 81 |
| Tabla 16: Simbología..... | 81 |
| Tabla 17: Simbología..... | 82 |
| Tabla 18: Simbología..... | 89 |
| Tabla 19: Simbología..... | 90 |
| Tabla 20: Descriptivos de las muestras para ciudad..... | 102 |
| Tabla 21: Prueba de homogeneidad de varianzas para ciudad..... | 102 |
| Tabla 22: ANOVA de un factor para ciudad..... | 103 |
| Tabla 23: Descriptivos de las muestras para carretera..... | 104 |
| Tabla 24: Prueba de homogeneidad de varianzas para carretera..... | 104 |
| Tabla 25: ANOVA de un factor para carretera..... | 105 |
| Tabla 26: Descriptivos de las muestras para Autopista..... | 106 |
| Tabla 27: Prueba de homogeneidad de varianzas para Autopista..... | 106 |
| Tabla 28: ANOVA de un factor para Autopista..... | 107 |

1 Investigación del funcionamiento y los tipos de módulos termoeléctricos existentes en el mercado.

1.1 Historia de los efectos termoeléctricos

En el año 1821 fue descrito el primer fenómeno termoeléctrico el cual fue llamado efecto Seebeck en honor a su descubridor el físico Alemán Thomas Johann Seebeck. Este efecto consiste en la aparición de una corriente eléctrica entre dos metales cuando existe diferencia de temperatura, el cual es utilizado para generación de potencia.



Grafico 1: Thomas Johann Seebeck

Fuente: [14]

En el año 1835 fue descrito el segundo fenómeno termoeléctrico el cual fue llamado efecto Peltier, en honor a su descubridor el físico Francés Jean Charles Peltier, él se percató que al aplicar una corriente eléctrica en la unión de dos materiales distintos este producía calor.



Grafico 2: Jean Charles Peltier

Fuente: [15]

Finalmente en el año de 1854 el físico Inglés William Thomson descubre una relación entre estos dos efectos antes mencionados, además anuncia de un tercer efecto, llamado efecto Thomson el cual se refiere al transporte de calor cuando instaura una corriente eléctrica y un gradiente de temperatura en un material conductor.

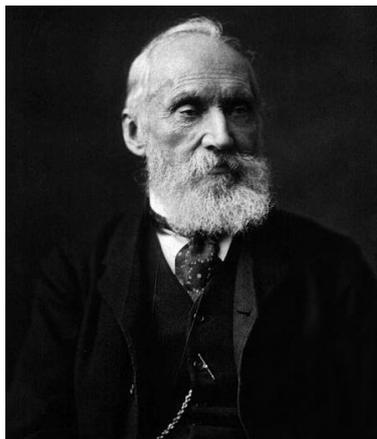


Grafico 3: William Thomson

Fuente: [16]

Los primeros estudios ingenieriles acerca de la termoelectricidad datan de 1885, con la publicación por parte del físico inglés John William Strutt Rayleigh (Lord Rayleigh) de un estudio (con resultados erróneos) sobre la eficiencia térmica de un generador termoeléctrico. Dicho estudio fue corregido en 1909 por el físico alemán Edmund Altenkirch, quien también trató en 1910 el problema técnico del calentamiento y enfriamiento termoeléctrico. En sus trabajos Altenkirch obtuvo valores de rendimiento muy bajos para los dispositivos estudiados [1].

1.1.1 Desarrollo histórico de los módulos termoeléctricos.

Los primeros módulos termoeléctricos fueron nombrados como termopilas, porque su similitud con las pilas voltaicas utilizadas en esa época, Fueron inventadas por Orsted y Fourier en 1823, y desarrolladas por Leopoldo Nobili y Macedonio Melloni en 1925 [1].

Se tuvo que esperar al descubrimiento de los materiales semiconductores y poner en práctica las teorías de Loffe para conseguir fabricar los primeros módulos (generadores) termoeléctricos con eficiencias cercanas al 3% ya que se contaba con generadores de muy baja eficiencia por debajo del 1%, la única utilización de los módulos termoeléctricos en el pasado era precisamente para la obtención de corriente eléctrica en zonas remotas y aisladas [1].

1.2 Termoelectricidad.

La termoelectricidad es la generación de corriente eléctrica, por efecto de aplicación de calor en uno (o varios) materiales relacionados entre sí, los módulos termoeléctricos se encuentran regidos por tres principales efectos:

Efecto Seebeck, Efecto Peltier, Efecto Thomson.

1.2.1 Fundamentos teóricos de la termoelectricidad.

La termoelectricidad es la fuerza electromotriz causada en uno (o varios) materiales debido a la presencia de una pendiente de temperatura, se mantienen tres efectos termoeléctricos reversibles en un módulo termoeléctrico, pero solo el efecto Seebeck es el responsable de generar corriente en el módulo termoeléctrico, el efecto Peltier está unido al efecto Seebeck por las relaciones de Thomson, por lo tanto, en modelización matemática la generación eléctrica de los módulos termoeléctricos se encontrara los tres efectos reflejados, sin embargo, cuando se sueldan dos materiales metálicos o semiconductores diferentes, mantenidos a distintas temperaturas en sus uniones, no solo existen los tres efectos antes mencionados, también están presentes el efecto Joule y el efecto Fourier.

1.2.2 Fenómenos termoeléctricos.

Los principales efectos que se presentan en la termoelectricidad:

- Efecto Seebeck.
- Efecto Joule.
- Efecto Fourier.
- Efecto Peltier.
- Efecto Thomson.

1.2.2.1 Efecto Seebeck.

Este efecto se produce por el hecho de que la densidad de los portadores de carga (electrones) difiere de un conductor al otro y esto depende de la temperatura. Cuando se sueldan dos conductores diferentes y cada uno se mantiene a temperaturas diferentes, la difusión de los portadores de carga se origina en las uniones a distintas velocidades. Existe un movimiento neto de portadores de carga para cada conductor como si fuesen conducidos por un campo no-electrostático.

Este efecto se muestra como la aparición de una diferencia de potencial eléctrico en un circuito formado por la unión de dos (o más) materiales distintos donde sus uniones se encuentran a diferente temperatura [1].

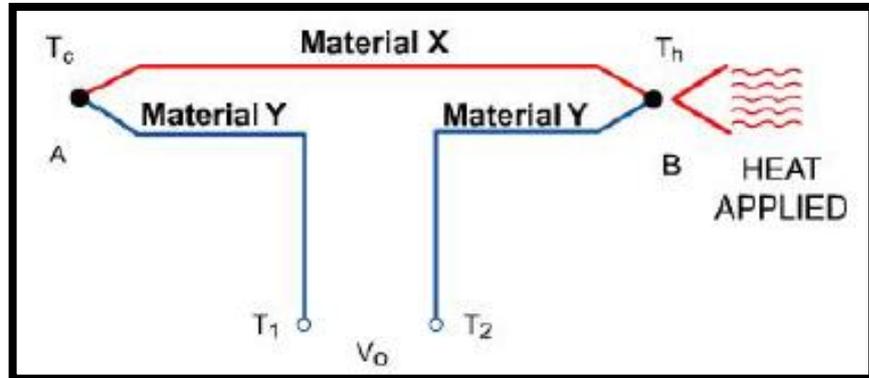


Grafico 4: Efecto Seebeck.

Fuente: [17]

1.2.2.2 Efecto Joule.

Este efecto está presente cuando circula corriente eléctrica a través de un conductor, existe corriente I y esto se puede ajustar variando la fuente externa este efecto es de naturaleza irreversible. Disipa energía eléctrica de valor I^2R en el circuito.

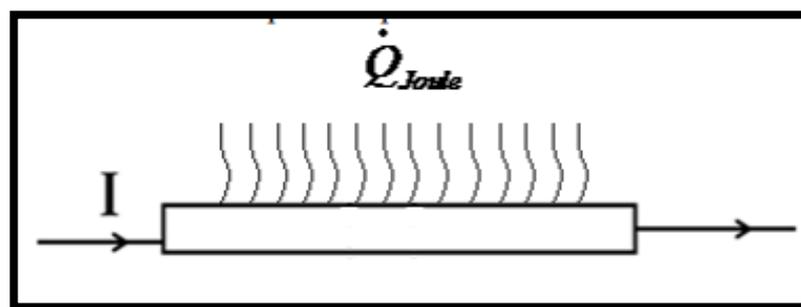


Grafico 5: Efecto Joule.

Fuente: [3]

1.2.2.3 Efecto Fourier.

En un conductor el cual se encuentre a temperaturas diferentes a T_1 y T_2 en sus extremos, al seccionar en cualquier punto intermedio de este conductor se tendrá una temperatura intermedia T_i de valor no mayor a T_1 y no menor a T_2 , por lo que habrá un flujo de calor del extremo T_1 al extremo T_2 el fenómeno de la conducción de calor se denomina Efecto Fourier.

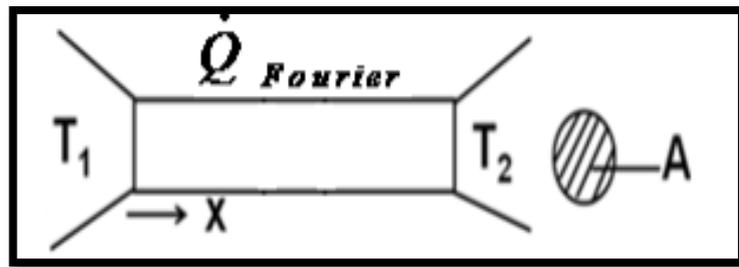


Grafico 6: Efecto Fourier.

Fuente: [3]

1.2.2.4 Efecto Peltier.

El calor que se debe añadir o quitar para mantener una unión a temperatura inicial a esto se lo conoce como calor Peltier.

El Efecto Peltier se produce tanto si le aplicamos corriente desde una fuente externa o si es generada por el propio par termoeléctrico, el calor Peltier se mide aplicando una corriente conocida a una temperatura conocida en una unión de dos distintos conductores. Esta unión se usa como una especie de calorímetro.

El efecto Peltier se define como la absorción (o liberación) de calor en la unión entre dos materiales distintos originada por el paso de una corriente eléctrica a través de ellos [1].

Resultados de algunos experimentos concluyen:

- La velocidad a la que se transfiere el calor Peltier es proporcional a la primera potencia de la corriente o igual a πI . La cantidad π se llama coeficiente Peltier y es igual al calor transferido cuando una unidad de carga atraviesa la unión [2].
- El calor Peltier es reversible. Cuando se invierte el sentido de la corriente, manteniendo su magnitud, el calor Peltier es el mismo, pero en sentido opuesto [2].
- El coeficiente Peltier depende de la temperatura y de los materiales de la soldadura, siendo independiente de la temperatura de la otra unión [2].
- Se aceptan convencionalmente tomar π_{AB} como positivo cuando una corriente eléctrica desde A a B produce una absorción de calor por la soldadura [2].

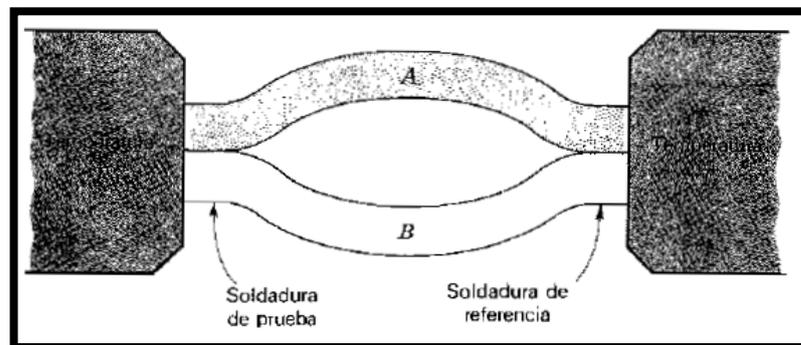


Grafico 7: Termopar formado por los conductores A y B con soldaduras T y T_R.

Fuente: [2]

1.2.2.5 Efecto Thomson.

Cuando existe conducción de calor a lo largo de los alambres del par termoeléctrico que no transporta corriente esto produce una distribución uniforme de calor en cada alambre, pero si existe corriente, esta distribución de calor uniforme en el alambre se ve alterada en una cantidad que no solo se debe al Efecto Joule. Sino que este cambio adicional en la distribución de temperatura se la conoce Efecto Thomson.

El calor que hay que ceder o extraer lateralmente a lo largo de los alambres del par termoeléctrico para poder restablecer la distribución inicial de temperatura se la conoce calor Thomson.

El efecto Thomson se define como la absorción o generación de calor (reversible) en un material homogéneo sometido a una diferencia de temperatura entre sus extremos a través del cual se hace circular una corriente eléctrica [1].

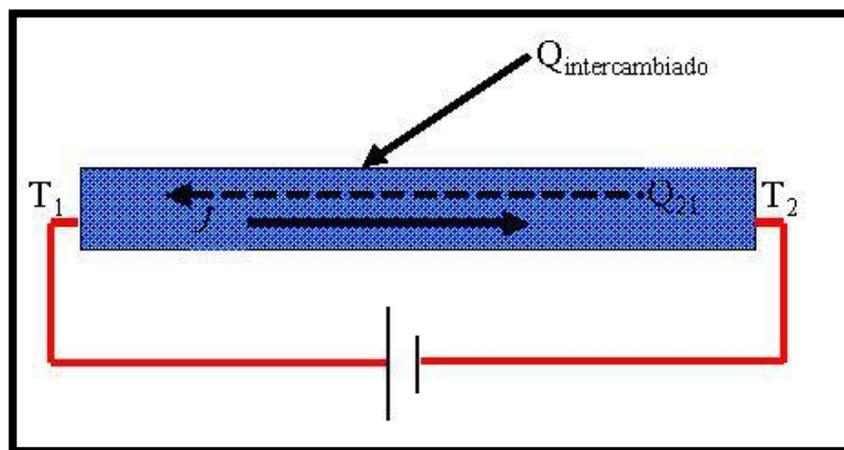


Grafico 8: Efecto Thomson.

Fuente: [18]

Resultados de algunos experimentos concluyen:

- La velocidad con que se transfiere el calor Thomson en una región pequeña de un alambre que conduce una corriente I y que soporta una diferencia de temperatura dT es igual a $\sigma I dT$, siendo σ el coeficiente Thomson [2].
- El calor Thomson es reversible [2].
- El coeficiente Thomson depende del material del alambre y de la temperatura medie de la pequeña región que se considera [2].

- Se aceptan convencionalmente que σ tiene un valor positivo cuando una corriente de sentido opuesto al del gradiente de temperatura (de temperatura baja a alta) produce una absorción de calor por el conductor [2].

1.3 Corriente eléctrica y de calor simultánea en un conductor.

El efecto Joule y la conducción de calor, no se pueden eliminar. Ya que si elegimos un alambre delgado para poder disminuir la conducción de calor este aumenta su resistencia eléctrica, ya que si utilizamos un alambre grueso para poder disminuir la resistencia eléctrica, aumentamos la conducción de calor [2].

Los efectos Seebeck, Peltier y Thomson están atados de forma confusa a los efectos irreversibles, una pequeña diferencia de temperatura ΔT establecida a través de un alambre perturbado el equilibrio térmico y produce una corriente de calor I_Q dado que una fuente fría en un extremo del alambre gana entropía procedente del alambre en mayor proporción de la que la pierde hacia el alambre una fuente más caliente en el otro extremo, se produce entropía a una velocidad como se expresa en la siguiente ecuación [2].

$$\frac{ds}{d\tau} = I_Q \frac{\Delta T}{T^2} = I_S \frac{\Delta T}{T} \quad (1.1)$$

I_S = Corriente de entropía.

I_Q = Corriente de calor

1.4 Efectos Seebeck y Peltier.

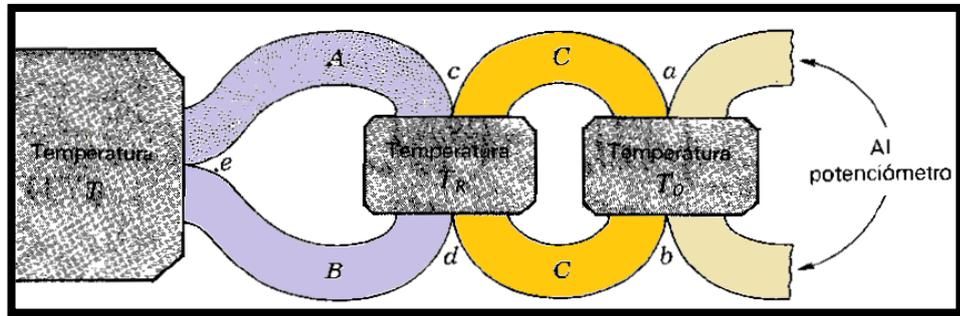


Grafico 9: Termopar formado por los alambres A y B unidos a los alambres de Cu C y C a los bornes de conexión de un potenciómetro.

Fuente: [2]

Tabla 1: Simbología.

Fuente: los autores

| Simbología | |
|------------|-----------------------|
| A, B | Alambres |
| C | Alambre de cobre (Cu) |
| E | Soldadura |
| a, b, c, d | Uniones |

Se supone que el potenciómetro está equilibrado, de manera $I = 0$ y $\varepsilon_a - \varepsilon_b$ es la FEM. Seebeck ε_{AB} [2].

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dT}\right)I = 0 = -\varepsilon \quad (1.2)$$

$$\varepsilon_{AB} = (\varepsilon_{AC} - \varepsilon_{BC}) \quad (1.3)$$

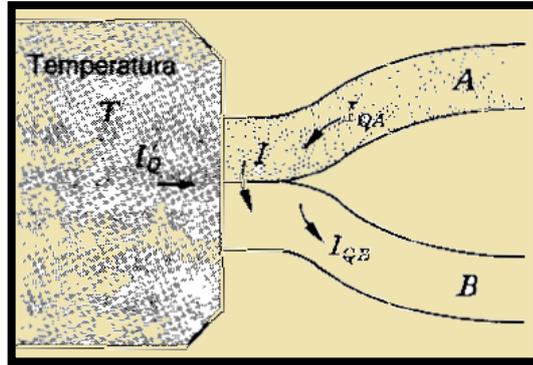


Grafico 10: Termounión de los dos conductores A y B a temperatura constante y uniforme T.

Fuente: [2]

$$I'_Q = I^2 R_j + (I_{QA})\Delta T = 0 - (I_{QB})\Delta T = 0 \quad (1.4)$$

Tabla 2: Simbología.

Fuente: los autores

| Simbología | |
|------------|-------------------------|
| I'_Q | Corriente de calor |
| R_j | Resistencia de la unión |
| I_{QA} | Corriente de calor |
| I_{QB} | Corriente de calor |

Coefficiente Peltier.

$$\Pi_{AB} = T (\epsilon_A - \epsilon_B) \quad (1.5)$$

1.5 Efecto Thomson y ecuaciones de kelvin.

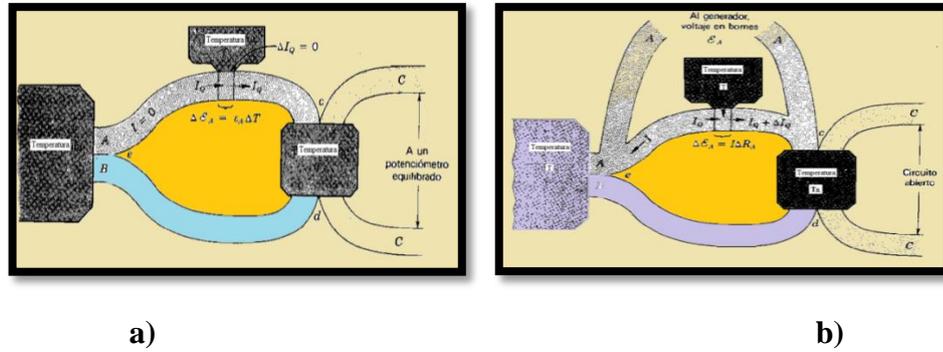


Grafico 11: a) en ausencia de corriente eléctrica no hay flujo de calor entre una parte del alambre A a temperatura T y su fuente de calor a T. b) en presencia de la corriente eléctrica, la transferencia de calor entre una parte del hilo A a temperatura T y su fuente de calor a T es igual a $\Delta I_Q = I^2 \Delta R - I\sigma_A \Delta T$.

Fuente: [2]

Efecto Thomson.

$$\sigma_A - \sigma_B = -T \frac{d}{dT} (\epsilon_A - \epsilon_B) \quad (1.6)$$

Primera ecuación de Kelvin.

$$\frac{\pi_{AB}}{T} = \frac{d\epsilon_{AB}}{dT} \quad (1.7)$$

Segunda ecuación de Kelvin.

$$\frac{\sigma_A - \sigma_B}{T} = - \frac{d^2 \epsilon_{AB}}{dT^2} \quad (1.8)$$

1.6 Dispositivos termoeléctricos.

Los dispositivos termoeléctricos se apoyan en los materiales semiconductores para la creación de energía eléctrica a través de diferencias de temperaturas existentes entre un extremo y el otro extremo.

1.6.1 Partes principales que conforman un módulo termoeléctrico.

Los módulos termoeléctricos acogen la geometría más básica en el cual están compuestas de un par de materiales con diferentes propiedades físicas, los cuales son conocidos como termopar sus componentes son:

Dos materiales tipo p y n, dispuestos en forma paralela, no siempre teniendo la misma longitud ni la misma sección transversal, tiene una placa superior el cual une todos los extremos de la parte alta de los materiales semiconductores y otra placa inferior que une todos los extremos de la parte baja de los materiales semiconductores, de esta forma se obtiene un circuito termoeléctrico, donde se puede aplicar un gradiente de temperatura entre los extremos de la placa y de esta forma obtener una diferencia de potencial.

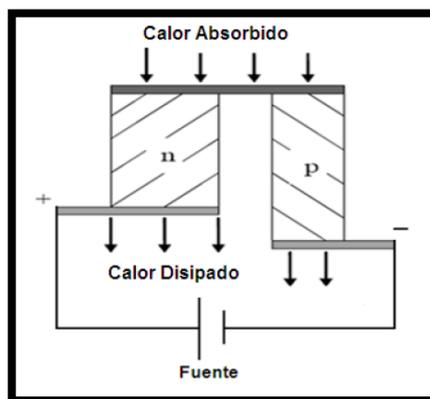


Grafico 12: Circuito termoeléctrico básico que muestra el calor absorbido y disipado cuando se establece una corriente eléctrica

Fuente: [3]

1.7 Módulo Peltier de una sola etapa.

Los módulos termoeléctricos consisten en la conexión de un número determinado de termopares de tipo p y tipo n que se encuentra conectado eléctricamente en serie y conectado térmicamente en paralelo, estos módulos se encuentran integrados dentro de dos placas cerámicas que impiden el paso de corriente eléctrica, las superficies fría y caliente de la placa del módulo termoeléctrico hace que aporte integridad mecánica, buen aislamiento eléctrico y tenga una buena conductividad térmica, de esta forma hace que el desecho de calor sea más eficiente y una extracción de calor del cuerpo enfriado sea mucho más directa [3].

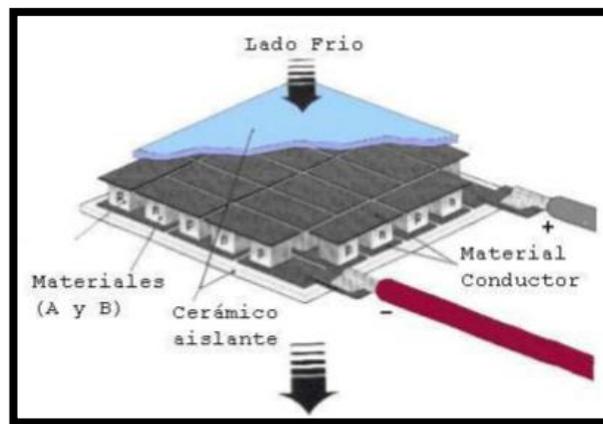


Gráfico 13: Configuración de un módulo termoeléctrico

Fuente: [3]

1.8 Difusión de portadores de carga en un módulo termoeléctrico.

Los portadores de carga en un módulo termoeléctrico existe siempre que exista diferencia de temperatura entre la cara superior y la cara inferior del módulo termoeléctrico, los portadores de carga se encuentran en el lado de mayor temperatura se difundirá al lado que tiene menor temperatura, ya que este último tiene una densidad más baja de portadores de carga, de modo similar los portadores del lado frío se difundirán al lado más caliente por las mismas razones, Los portadores de carga se encuentran en constante movimiento por existencia de diferencia de temperaturas entonces existirá una corriente eléctrica [3].

Si se mantiene una temperatura constante entre las dos caras del módulo termoelectrico entonces se obtendra un equilibrio termico y no se obtendra una diferencia de potencial.

1.9 Características universales de Módulos Termoelectricos de efecto Peltier.

Enunciemos todos los parámetros importantes que se necesitan para lograr operar los módulos de forma concreta y según los requerimientos para su aplicación:

I: corriente utilizada.

V: Tensión suministrada.

P: Entrada de potencia eléctrica.

T_C: Temperatura de las soldaduras frías.

T_H: Temperatura de las soldaduras calientes.

Q_C: Cantidad de calor adsorbido por las soldaduras frías.

Q_H: Cantidad de calor disipado por las soldaduras calientes.

1.10 Módulos termoelectricos comerciales.

Existen módulos termoelectricos para:

- Refrigeración.
- Generación.

Los módulos de efecto Peltier, estos módulos dependen de su corriente, voltaje y su diferencia de temperatura entre sus caras, la mayoría de los módulos que podemos encontrar en el mercado son utilizados para fines de refrigeración.

1.10.1 Módulos termoelectricos Peltier.

Estos tipos de módulos termoelectricos abarcan un rango amplio de tamaños de superficie cerámica, desde 10x10mm con Q_{max} 1.6W – 480W, I_{max} 3.3A – 80ª, V_{max} 0.82V – 30V.

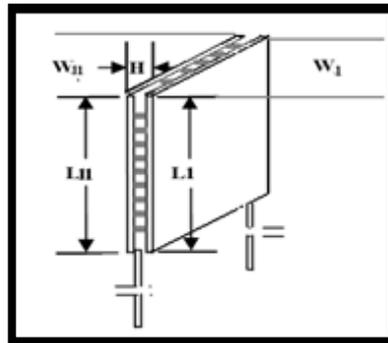
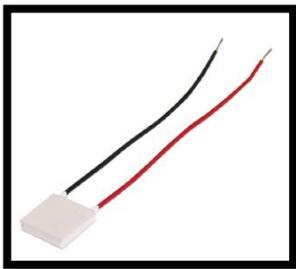


Grafico 14: Dimensiones de los módulos termoelectricos.

Fuente: [20]

Tabla 3: Módulo termoelectricos CP20serie.

Fuente: los Autores

| CP20 SERIES | | | | | | | |
|---|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------|
|  | | | | | | | |
| Numero de modelo | Resistencia ($\Omega \pm 10\%$) | I_{max} (A) | V_{max} (V) | Q_{max} (Th = 27°C) (W) | Q_{max} (Th = 50°C) (W) | ΔT_{max} (Th = 27°C) | Dimensiones LxWxH (mm) |
| CP20151 | 1.6 | 2 | 3.8 | 3.7 | 4 | 66 | 15X15X5.1 |

| | | | | | | | |
|---------|-----|---|------|------|------|----|-----------|
| CP20251 | 3.7 | 2 | 8.6 | 8.5 | 9.4 | 66 | 20X20X5.1 |
| CP20351 | 6.7 | 2 | 15.4 | 16.9 | 16.9 | 66 | 30X30X5.1 |

Tabla 4: Modulo termoelectricos CP30serie.

Fuente: los Autores

| CP30 SERIES | | | | | | | |
|--|-----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------|
|  | | | | | | | |
| Numero de modelo | Resistencia ($\Omega \pm 10\%$) | I _{max} (A) | V _{max} (V) | Q _{max} (Th = 27°C) (W) | Q _{max} (Th = 50°C) (W) | ΔT_{max} (Th = 27°C) | Dimensiones LxWxH (mm) |
| CP30138 | 1 | 3 | 3.8 | 6.5 | 7.2 | 66 | 15X15X3.8 |
| CP30238 | 2.3 | 3 | 8.6 | 15 | 16.7 | 66 | 20X20X3.8 |
| CP30338 | 4 | 3 | 15.4 | 27 | 30.1 | 66 | 30X30X3.8 |

Tabla 5: Modulo termoelectricos CP60serie.

Fuente: los Autores

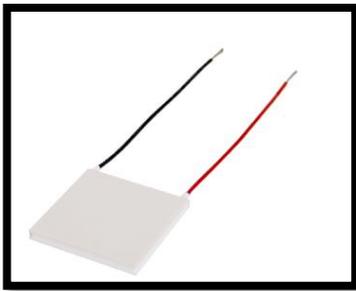
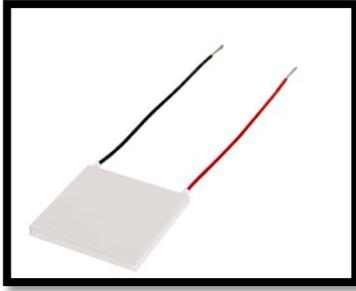
| CP60 SERIES | | | | | | | |
|--|-----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------|
|  | | | | | | | |
| Numero de modelo | Resistencia ($\Omega \pm 10\%$) | I _{max} (A) | V _{max} (V) | Q _{max} (Th = 27°C) (W) | Q _{max} (Th = 50°C) (W) | ΔT_{max} (Th = 27°C) | Dimensiones LxWxH (mm) |
| CP60133 | 0.5 | 6 | 3.8 | 12.2 | 13.6 | 66 | 15X15X3.3 |
| CP60140 | 0.29 | 6 | 2.1 | 7.1 | 7.9 | 68 | 15X15X4 |
| CP60233 | 1.2 | 6 | 8.6 | 27.9 | 31.2 | 66 | 20X20X3.3 |
| CP60240 | 0.53 | 6 | 3.8 | 13 | 14.5 | 68 | 20X20X4 |
| CP60333 | 2.2 | 6 | 15.4 | 50.5 | 56.5 | 66 | 30X30X3.3 |
| CP60340 | 1.21 | 6 | 8.6 | 29 | 32.4 | 68 | 30X30X4 |
| CP60440 | 2.17 | 6 | 15.4 | 53 | 59.3 | 68 | 40X40X4 |

Tabla 6: Modulo termoelectricos CP85serie.

Fuente: los Autores

| CP85 SERIES | | | | | | | |
|--|-----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------|
|  | | | | | | | |
| Numero de modelo | Resistencia ($\Omega \pm 10\%$) | I _{max} (A) | V _{max} (V) | Q _{max} (Th = 27°C) (W) | Q _{max} (Th = 50°C) (W) | ΔT_{max} (Th = 27°C) | Dimensiones LxWxH (mm) |
| CP85138 | 0.2 | 8.5 | 2.1 | 10 | 11.1 | 68 | 15X15X3.8 |
| CP85238 | 0.4 | 8.5 | 3.8 | 18 | 20.1 | 68 | 20X20X3.8 |
| CP85338 | 0.9 | 8.5 | 8.6 | 42 | 46.9 | 68 | 30X30X3.8 |
| CP85438 | 1.5 | 8.5 | 15.4 | 75 | 83.9 | 68 | 40X40X3.8 |

1.10.2 Módulos termoelectricos de efecto Seebeck.

Estos módulos termoelectricos son de generación, lo cual se le aplica un gradiente de temperatura y este me produce energía eléctrica, estos módulos soportan altas temperaturas de hasta 300⁰C - 250⁰C y son construidos con materiales como Telurio – Bismuto lo cual encarece al producto, en la Tabla 21 podemos apreciar los tipos de módulos termoelectricos de generación.

Módulos de generación (TPG) deben instalarse en una superficie plana. Este requisito es especialmente vital para el lado frío del TPG.

Tabla 7: Módulos termoeléctricos de Generación.

Fuente: [21]

| Numero de Pieza Tellurex | Dimensión A | Dimensión B | Dimensión H | Materiales Optimizado rango de temperatura de Th °C | Optima potencia de salida Th 300°C a 30°C Tc vatios | Potencia de salida en la solicitud de Th 250°C 80°C Tc vatios |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|---|---|---|
| G2-30-0313 | 30 | 30 | 3,3 | 200-250 | 5,4 | 2,2 |
| G2-35-0315 | 35 | 35 | 3,9 | 200-250 | 5,4 | 2,2 |
| G2-40-0313 | 40 | 40 | 4,0 | 200-250 | 5,4 | 2,2 |
| G2-40-0352 | 40 | 40 | 3,5 | 200-250 | 7,3 | 2,6 |
| G2-56-0352 | 56 | 56 | 5,1 | 200-250 | 14,5 | 5,6 |
| G2-56 hasta 0375 | 56 | 56 | 4,3 | 200-250 | 16,2 | 6,0 |
| G2-56-0570 | 56 | 56 | 4,0 | 200-250 | 17,6 | 7,0 |
| G3-30-0508 | 30 | 30 | 3,3 | 250-300 | 5,7 | 2,2 |
| G3-35-0508 | 35 | 35 | 3,7 | 250-300 | 7,9 | 2,8 |
| G3-40-0407 | 40 | 40 | 3,2 | 250-300 | 9,8 | 4,0 |
| G3-56-0419 | 56 | 56 | 3,2 | 250-300 | 19,3 | 8,8 |

Los módulos termoeléctricos tipo Peltier de la serie CP85 son los más comerciales y por ende son más económicos en comparación a un módulo termoeléctrico tipo Seebeck lo cual no son muy construidos ya que su uso es limitado así como sus materiales y su precio es muy alto en comparación a los de efecto Peltier, los módulos tipo Peltier soportan una temperatura de hasta 135⁰C en su Th, lo cual hace que sea un módulo útil para la experimentación e estudio en el colector de escape del motor G10.

2 Selección de los módulos termoelectricos más óptimos previos a la implementación y experimentación en el motor G-10.

2.1 Perdidas en el motor de combustión interna.

Debido a la contaminación que los automotores generan por la quema de combustibles fósiles y las leyes más rigurosas para el control de los gases contaminantes hacen que al M.C.I. se realicen mejoras para un aprovechamiento adecuado de la energía entregada por el combustible [4].

El M.C.I. tiene pérdidas por fricción entre las diferentes piezas que lo conforman y por el calor que tiene que ser controlado para el óptimo funcionamiento del mismo, hay que tener en cuenta los siguientes rendimientos [4]:

- Rendimiento mecánico.- Es el que relaciona el trabajo efectivo medido en el eje motor y el que desarrollan los gases en el cilindro (trabajo indicado). Tiene en cuenta el trabajo absorbido por los rozamientos de los órganos propios del motor (biela, aros, bulón), los auxiliares (accionamiento de la distribución, bomba de aceite, de agua, etc.) y la del aire para barrido.
- Rendimiento térmico.- Es la relación entre el trabajo desarrollado por los gases (trabajo indicado) y la energía calórica (energía térmica) del combustible.
- Rendimiento volumétrico.- Es el que permite determinar el grado o porcentaje de llenado de los gases de admisión en relación al volumen que dispone en el cilindro.

En el grafico podemos apreciar el balance energético en un motor de 4 tiempos de gasolina. Como puede verse del 100% de la energía aportada, solamente del 25 al 30% se recupera para hacer mover el cigüeñal [4].

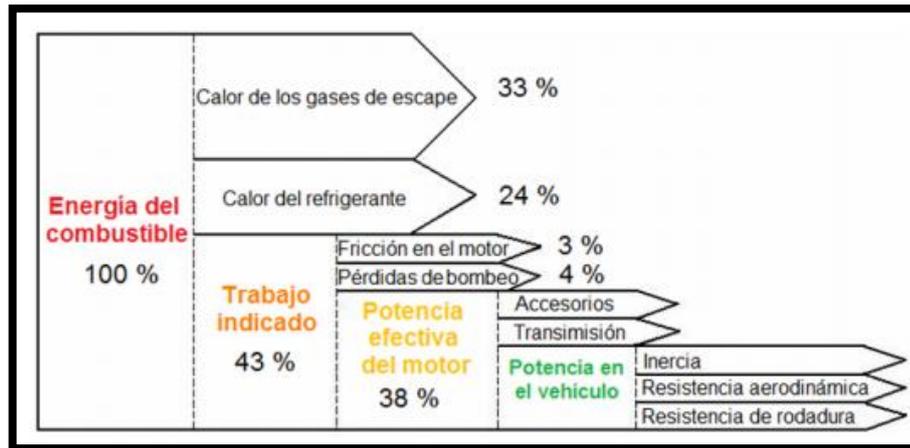


Grafico 15: Esquema genérico de la distribución de la energía del combustible en un vehículo equipado con motor de combustión.

Fuente: [4]

Parece claro que muy poca de la energía aportada es transformada en energía mecánica.

Llamamos rendimiento de un motor a la relación entre la cantidad de energía aportada y la que suministra.

2.2 Formas de transferencia de calor del colector de escape.

La mayor pérdida de energía se encuentra presente en el calor de los gases de escape con un 33 % de la energía aportada por el combustible.

La transferencia de calor se da de un medio con temperatura elevada a otra de menor temperatura y esta se detiene cuando se encuentran en equilibrio térmico.

La transferencia de calor en el colector de escape es de tres formas:

- Conducción.

- Convección.
- Radiación.

2.2.1 Conducción.

La conducción se puede dar en un gradiente de temperatura de una temperatura mayor a una menor tanto en sólidos, líquidos y gases. Para los líquidos y gases la conducción se da por los choques entre las moléculas que se mueven aleatoriamente mientras tanto que para los sólidos se da por el transporte de energía de los electrones libres en las zonas de contacto [5].

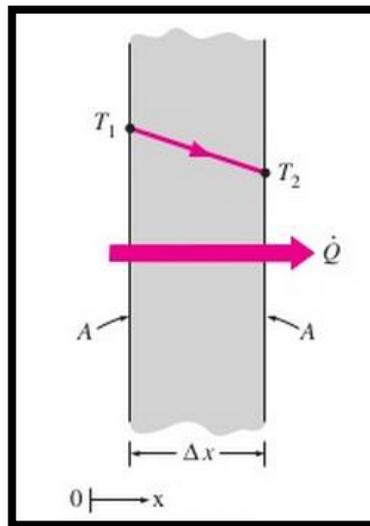


Grafico 16: Conducción de calor a través de una pared plana grande de espesor Δx y área A .

Fuente: [5]

La tasa de conducción de calor \dot{Q}_{cond} por una capa de espesor constante x es proporcional a la diferencia de temperatura T en la capa y el área A normal a la dirección de transferencia de calor, mientras que es inversamente proporcional al espesor de la capa. Por lo tanto [5].

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -k_1 A \frac{dT}{dx} \quad (\text{W}) \quad (2.1)$$

Donde la constante de proporcionalidad k_1 es la conductividad térmica del material, la cual es una medida de la capacidad del material para conducir calor.

El calor es conducido en la dirección de temperatura decreciente, y el gradiente de temperatura se vuelve negativo cuando la temperatura disminuye con x creciente. Por consiguiente, se agrega un signo negativo en la ecuación anterior para hacer de la transferencia de calor en la dirección x positiva una cantidad positiva [5].

2.2.2 Convección.

Este se da entre un sólido y un líquido o gas que están en movimiento mientras más rápido sea este mayor será la transferencia por convección.

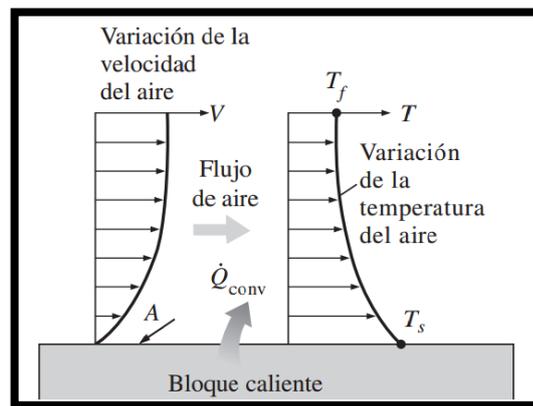


Grafico 17: Transferencia de calor por convección desde una superficie caliente hacia el aire.

Fuente: [5]

La transferencia por convección puede ser forzada o natural, en la transferencia forzada el líquido o gas es movido por una fuente externa como puede ser una bomba, ventilador, etc.

Mientras que en la natural esta se da sin agentes externos simplemente con el cambio de densidad producido por la temperatura.

En el siguiente grafico se muestra un ejemplo de convección forzada y natural de un huevo cocido.

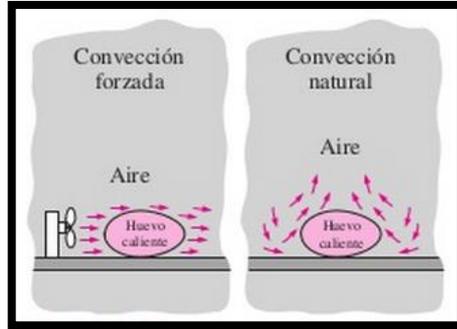


Grafico 18: Enfriamiento de un huevo cocido por convección forzada y convección natural.

Fuente: [5]

La tasa de transferencia de calor por convección Q_{conv} se determina a partir de la ley de enfriamiento de Newton, expresada como:

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_f)(W) \quad (2.2)$$

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, A es la superficie en la cual tiene lugar la transferencia de calor, T_s es la temperatura de la superficie y T_f es la temperatura del fluido lejos de la superficie. (En la superficie, la temperatura del fluido es igual a la temperatura superficial del sólido) [5].

2.2.3 Radiación.

A diferencia los dos tipos de transferencia de calor anteriores este no necesita un medio como necesitan las anteriores. Todo cuerpo que se encuentra por encima de la temperatura cero absoluto emiten radiación [5].

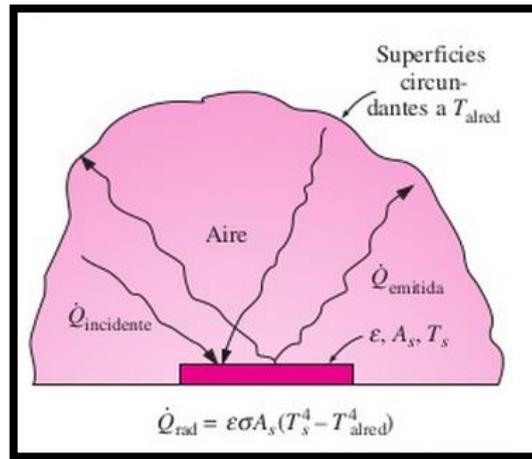


Grafico 19: Transferencia de calor por radiación entre una superficie y las superficies que circundan.

Fuente: [5]

La radiación se emite en forma de ondas electromagnéticas como las que emite el sol a la tierra. La materia puede emitir, recibir radiación en sus tres estados (Sólido, líquido, gaseoso).

La ecuación que rige este fenómeno se describe a continuación:

La tasa máxima de radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura absoluta T_s se determina mediante la ley de Stefan-Boltzmann donde A es el área superficial y $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ es la constante de Stefan-Boltzmann. La superficie idealizada que emite radiación a esta tasa máxima se llama cuerpo negro, y la radiación emitida por un cuerpo negro se denomina radiación de cuerpo negro. La radiación que emiten todas las superficies reales es menor que la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa como [5].

$$\dot{Q}_{\text{emitida}} = \varepsilon \sigma A T_s^4 \quad (\text{W}) \quad (2.3)$$

Donde ε es la emisividad de la superficie se encuentra en un intervalo de $0 \leq \varepsilon \leq 1$ aproximada a un cuerpo negro que tiene $\varepsilon = 1$.

2.3 Eficiencia de un módulo termoelectrico.

La eficiencia η de un generador termoelectrico se puede escribir como:

$$\eta = \frac{P}{Q_h} = \frac{\alpha \Delta T I - I^2 R}{Q_h} = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} \quad (2.4)$$

Se encontraron que la eficiencia del generador termoelectrico es igual a la eficiencia teórica de Carnot. La ecuación (2.26) se convierte así en [6].

$$\eta = \frac{\alpha \Delta T I}{\alpha T_h I} = \frac{T_h - T_c}{T_h} = \eta_{\text{carnot}} \quad (2.5)$$

2.4 Modelo teórico para la implementación del sistema de generación en el motor G10.

El modelo que se escogió para la implementación del sistema de generación en el motor G10 es el modelo de Cheng el cual se puede apreciar en el Grafico 20.

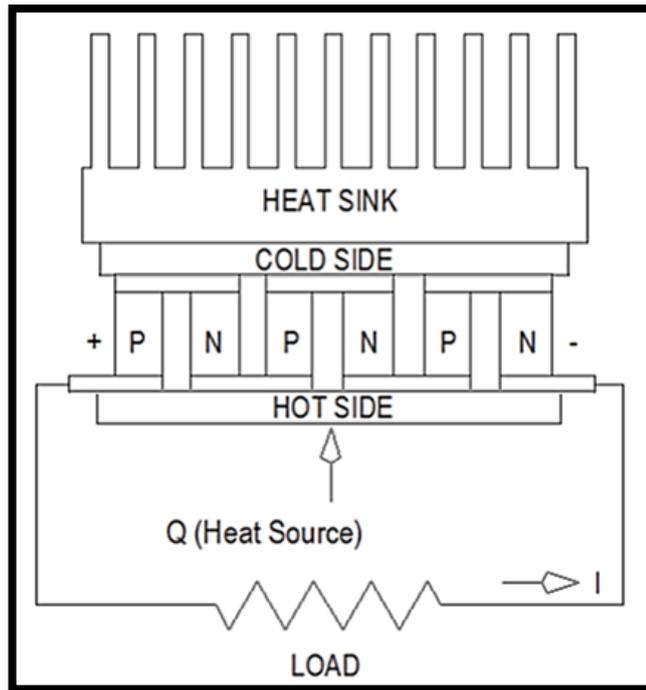


Grafico 20: Esquema de un generador de energía termoeléctrica basado en Cheng.

Fuente: [7]

Este modelo se utiliza ya que el módulo termoeléctrico puede aprovechar mejor el T_h el cual se encuentra en contacto directo con la placa a la temperatura (T_h) y la parte superior del módulo se ubica un disipador de esta forma se obtendrá una disipación de calor, obteniendo de esta forma un ΔT el cual nos brindara una diferencia de potencial.

Los aparatos utilizados para la experimentación del sistema de Cheng se los puede ver en el Grafico 21.

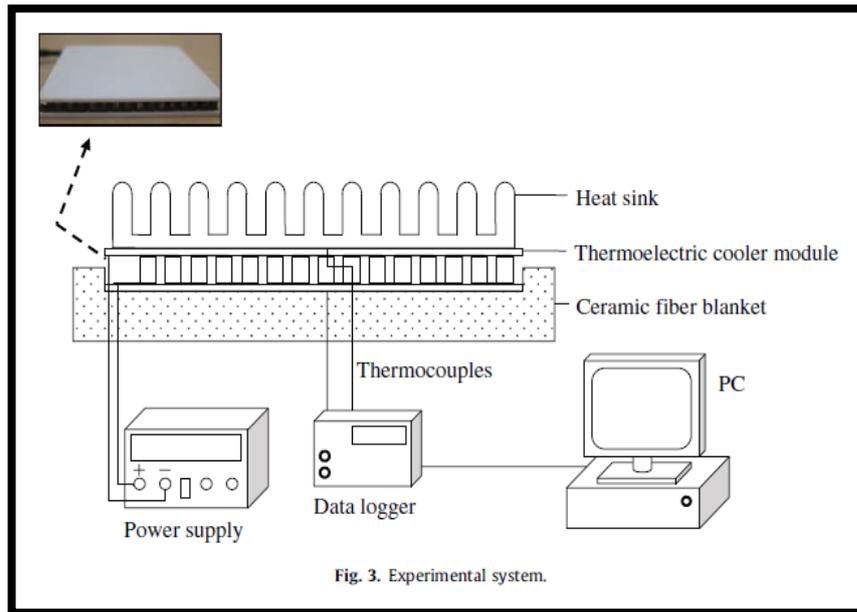


Grafico 21: Sistema experimental de Cheng.

Fuente: [7]

El modelo de Cheng es utilizado para refrigeración por módulos termoeléctricos, pero como el módulo termoeléctrico tiene procesos reversibles entonces este modelo se puede utilizar para generación contando con el mismo principio de Cheng, pero cambiando la posición del disipador de calor, se colocara en la cara fría del módulo termoeléctrico.

2.5 Características básicas del Testo 882 Cámara termográfica.

La testo 882 es una cámara térmica práctica y resistente que le permite determinar y representar la distribución de la temperatura en superficies sin contacto [8].



Gráfico 22: Testo 882 Cámara termográfica

Fuente: [8]

La cámara posee las siguientes características [8]:

- Objetivo gran angular de alta calidad de $32^\circ \times 23^\circ$.
- Detector de 320 x 240.
- NETD < 60 mK.
- Tarjeta SD de 2 GB para aprox. 1000 imágenes.
- Distancia mínima de enfoque 20 cm.
- Cámara digital integrada con LED potentes para la iluminación
- Enfoque motorizado dinámico.
- Isoterma.
- Mín. /máx. en área.
- Comentarios de audio.
- Indicación de la distribución de la humedad superficial (indicación en tiempo real con sonda de humedad por radio opcional).
- Filtro Alta temperatura (opcional).

2.6 Medición de temperaturas en el colector de escape del motor G10 previo a la implementación y selección del módulo termoelectrico tipo Peltier.

Previo a la implementación y selección del módulo se tomaron en cuenta los siguientes puntos:

- La mayor temperatura obtenida con el estudio térmico.
- El espacio disponible para el modelo de experimentación (modulo y disipador).
- La geometría del colector de escape y la forma de sujeción.

2.6.1 Temperatura en el colector de escape del motor G10.

Análisis térmico del colector de escape en estado estacionario para ello se utilizó la cámara termográfica testo 882, la obtención de datos se la realizo desde el arranque hasta la temperatura de funcionamiento del motor a 85°C aproximadamente, con una temperatura ambiente de 20°C una humedad de 60% emisividad de 0,95 y una temperatura reflejada de 20°C, la mayor temperatura se ubica en la parte superior del colector de escape en sus tres ductos como se indica en el Grafico 23.

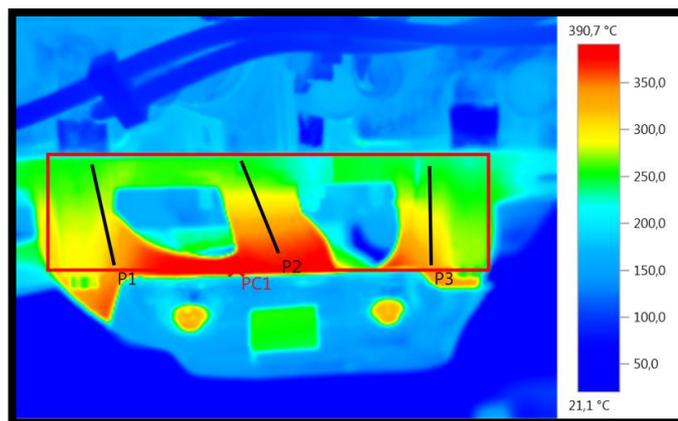


Grafico 23: Colector de escape del motor G10.

Fuente: Los Autores.

En la siguiente tabla se muestra el punto más caliente PC1.

Tabla 8: Distribución de temperaturas en el colector de escape de un motor G-10.

Fuente: Los Autores

| Objetos de medición | Temp. [°C] | Emis. | Temp. refl. [°C] |
|---------------------|------------|-------|------------------|
| Punto más caliente | 390,4 | 0,95 | 20,0 |

Se colocó líneas de perfil en cada salida de escape como se indica en la imagen térmica, dando como resultado que el segundo tubo del colector de escape P2 tiene mayor calor superficial, mientras tanto que el primero P1 y tercero P3 están aproximadamente iguales, esto se debe a que los tubos exteriores P1 y P3 tienen un grosor extra por los pernos de sujeción del colector con el cabezote esto se puede constatar en la siguiente gráfica de perfil.

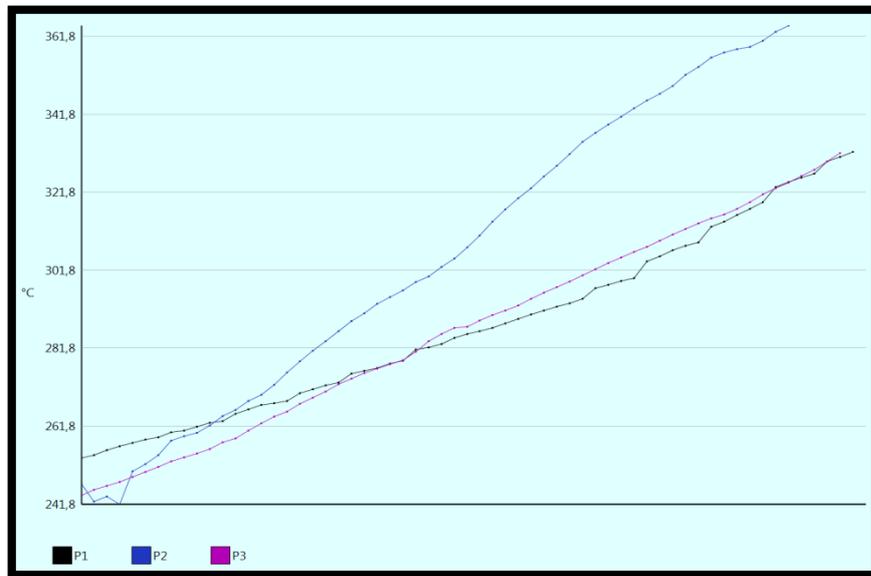


Grafico 24: Grafica de perfil de los tres ductos de colector de escape.

Fuente: Los Autores

En la selección con rojo de la imagen térmica se obtuvo un histograma de la distribución de la temperatura superficial de las respectivas salidas del colector de escape de donde se visualiza la temperatura superficial.

Con el motor G10 en su temperatura de funcionamiento a 85°C aproximadamente se tiene según el histograma una gran cantidad temperatura superficial de 230°C a 380°C utilizable.

Mínimo: 58.4 °C Máximo: 390.7 °C Valor medio: 259.0 °C

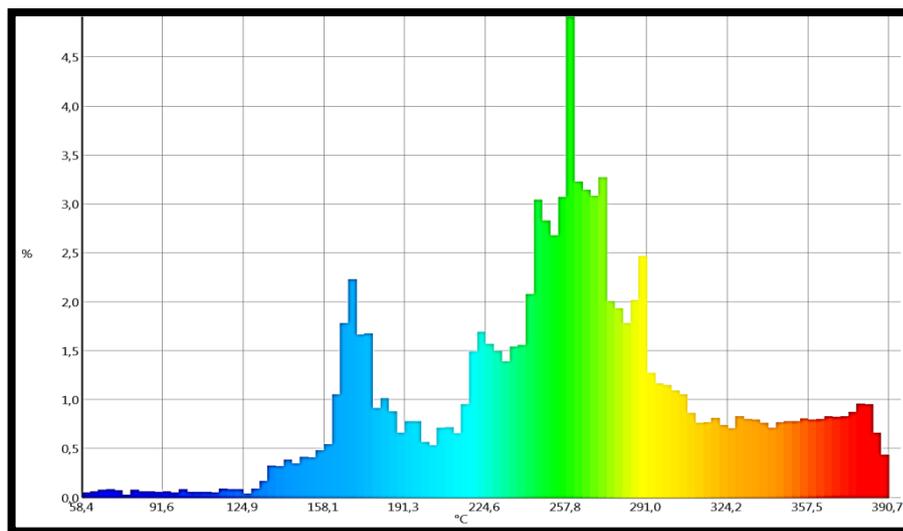


Grafico 25: Histograma de temperatura superficial de la parte superior del colector de escape.

Fuente: Los Autores.

2.6.2 Disponibilidad de área para la implementación del módulo termoelectrico.

El área disponible para el montaje del sistema de generación existe en la parte superior y frontal del colector de escape, como se muestra en el Grafico 26.

a = 20 cm

b = 5 cm

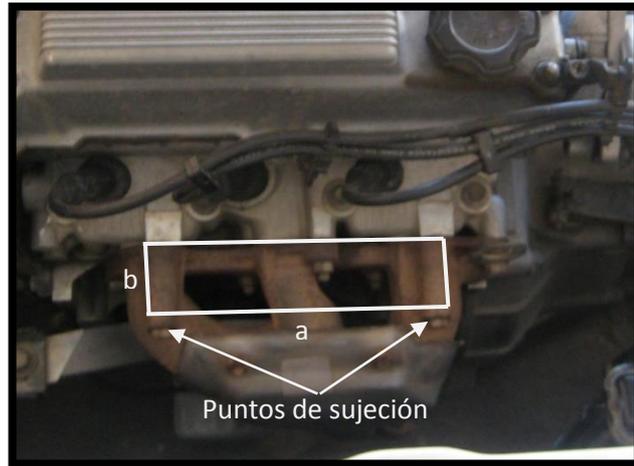


Grafico 26: Protector del colector de escape distancias y puntos de sujeción.

Fuente: Los Autores.

2.6.3 Geometría del colector de escape del motor G10.

En la parte frontal del colector de escape no se puede realizar el montaje ya que en la protección no cuenta con una superficie plana lo cual no permite un contacto entre superficie eficaz para maximizar la transferencia de calor por conducción entre la protección del colector del escape y la cara caliente del módulo termoeléctrico, también es difícil la sujeción.

Tomando en cuenta la mayor temperatura superficial que se genera en la parte superior del colector de escape y que brindara una sujeción firme del sistema de generación, se procedió a medir para el posterior diseño, la geometría y los puntos de sujeción escogida se muestra en el Grafico 27.

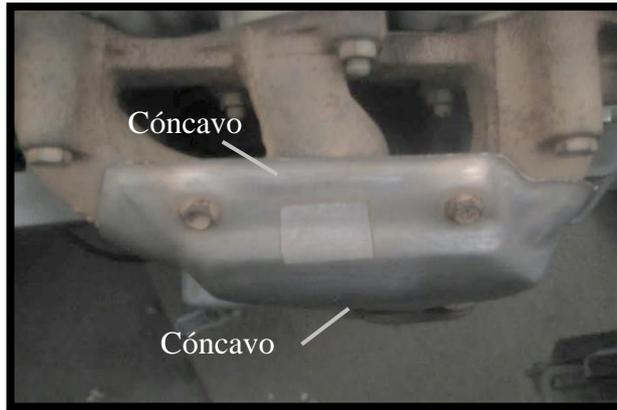


Grafico 27: Protector del colector de escape motor G-10.

Fuente: Los Autores.

Un diseño en Solidworks de la base y el área que ocupara un módulo termoeléctrico dependiendo de las dimensiones que tiene la base que es de 5 cm de ancho por 20 cm de largo, esta se muestra a continuación en el siguiente gráfico.

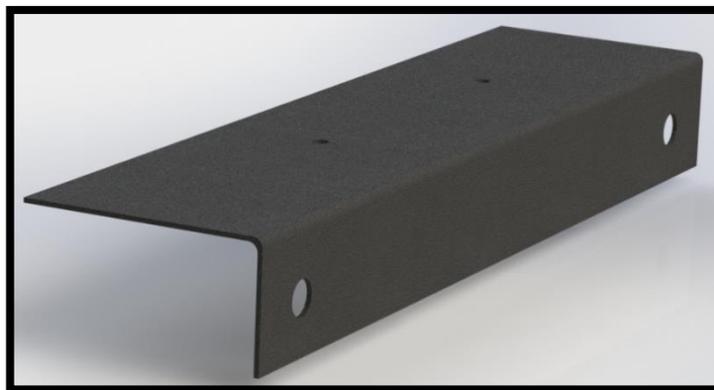


Grafico 28: Protector de la parte superior del colector de escape simulado en Solidworks.

Fuente: Los Autores.

2.7 Construcción de la protección superior del colector de escape del motor G10.

Esta base se lo realiza para tener una superficie plana y mejorar el contacto entre las superficies del módulo Peltier y soporte del conjunto que será el lado caliente, se realizó un molde en cartulina según el diseño anteriormente propuesto para posteriormente ser fabricado en metal.

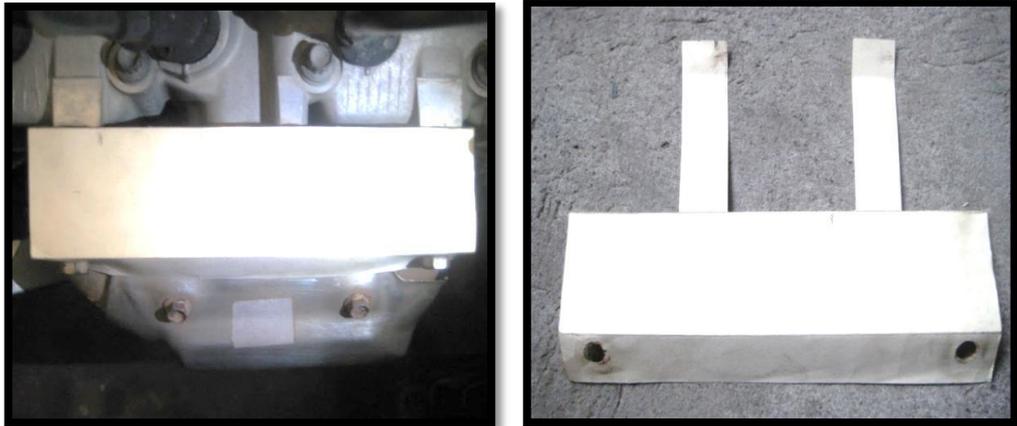


Grafico 29: Molde de la protección superior del colector de escape del motor G-10.

Fuente: Los Autores.

Luego de la construcción del protector se procedió a la instalación del mismo en la parte superior del colector de escape, para que el protector se mantenga lo más estático posible se procede a asegurar con dos pernos delanteros del colector de escape y dos tuercas que se encuentran en la parte inferior del mismo como se indica en el siguiente Grafico.

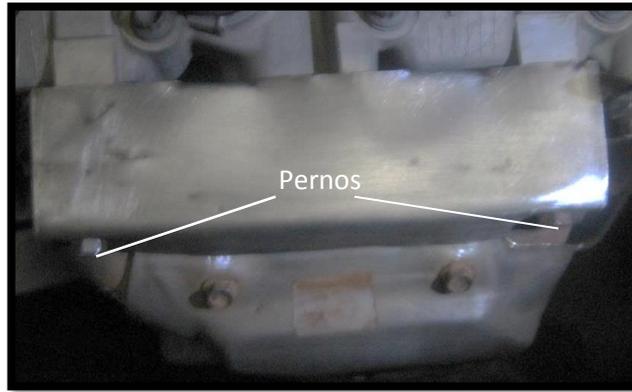


Grafico 30: Protector del colector de escape del motor G-10

Fuente: Los Autores.

Con el soporte del conjunto montado, se procedió a medir el calor superficial con la cámara termográfica testo 882 para lograr apreciar las temperaturas en el soporte superior del colector de escape del motor G-10, se logra ver todas las temperaturas existentes en la base colocado en el colector de escape a temperatura de funcionamiento del motor.

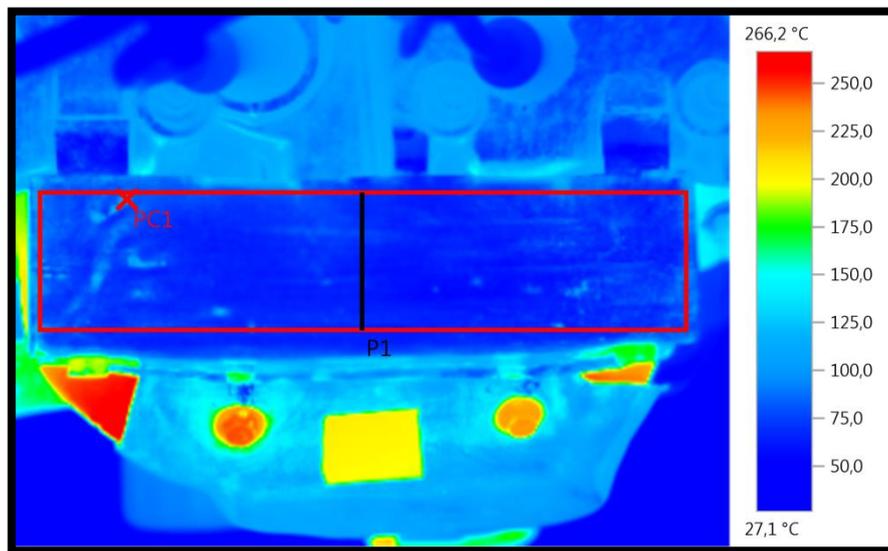


Grafico 31: Distribución de temperaturas en el soporte para el modelo experimental.

Fuente: Los Autores.

En la siguiente tabla se muestra el punto más caliente PC1 de 119,5 esto se debe a que la base (a) se produjo un golpe, lo cual hace que el espesor en ese punto sea más fino que en el resto de la superficie, se colocó una línea de perfil donde se colocara el modulo termoelectrico.

Tabla 9: Distribución de temperaturas en el colector de escape de un motor G-10.

Fuente: Los Autores.

| Objetos de medición | Temp. [°C] | Emis. | Temp. refl. [°C] |
|---------------------|------------|-------|------------------|
| Punto más caliente | 119,5 | 0,95 | 20,0 |

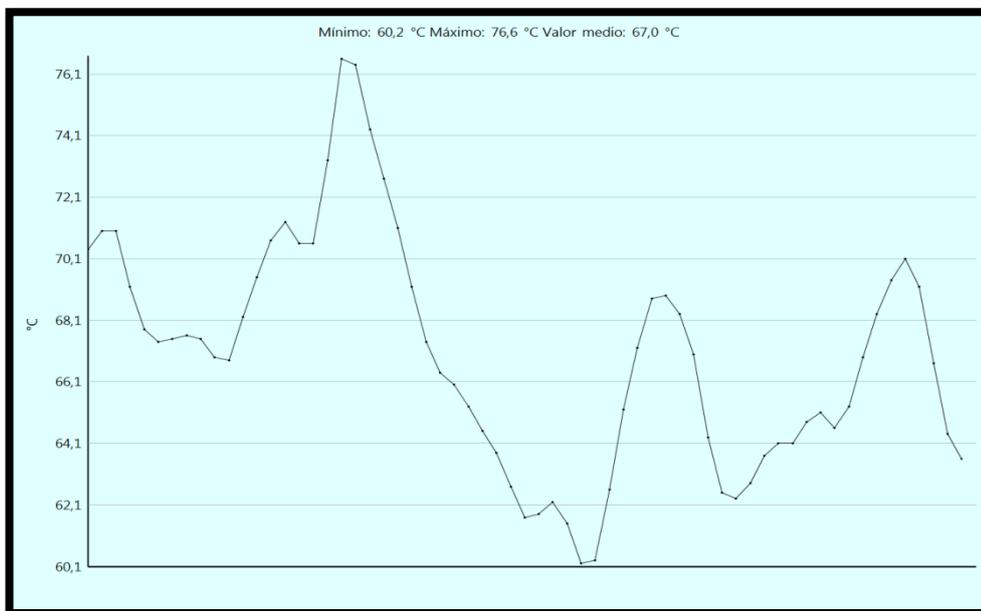


Grafico 32: Línea de perfil

Fuente: Los Autores.

La temperatura utilizable sobre el área seleccionada se muestra en el histograma siguiente, donde la temperatura se estabiliza en un promedio de 60°C a 76°C aproximadamente que es la temperatura utilizable sobre toda la base, el resto de temperatura hasta 113°C son puntos o focos de temperatura por golpes en la base donde ha disminuido su espesor.

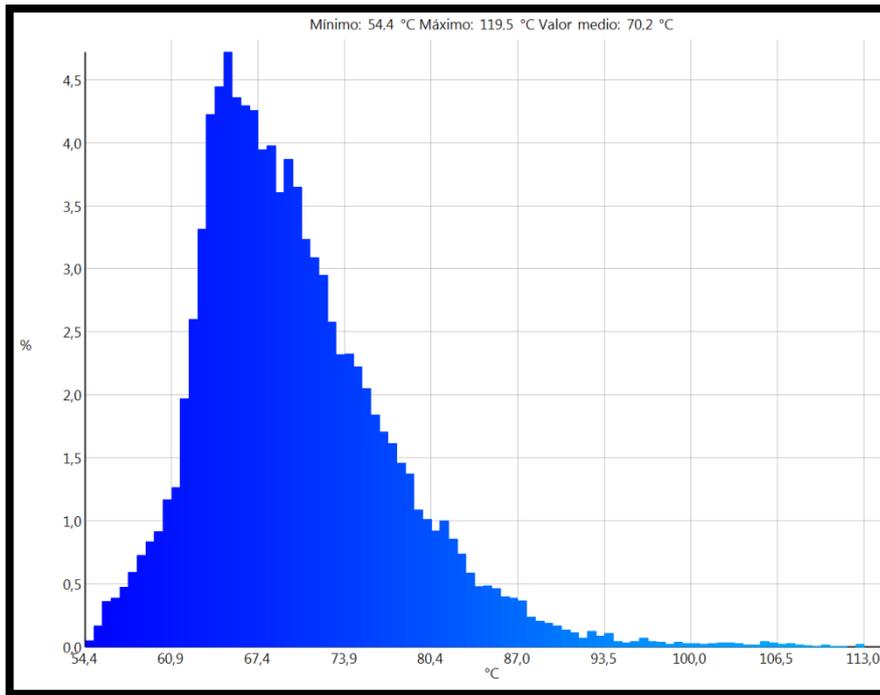


Grafico 33: Histograma del área de la base seleccionada en la imagen térmica.

Fuente: Los Autores.

Con las muestra obtenidas con un intervalo de 1 minuto, se graficó desde el instante del encendido del motor G10 hasta la estabilización de la temperatura que es cuando el motor alcanza su temperatura de funcionamiento aproximadamente en 28 min.

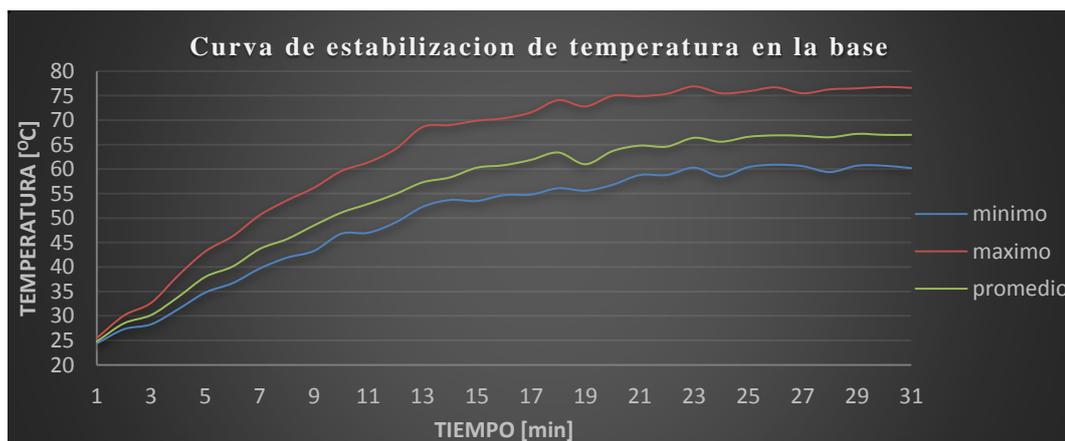


Grafico 34: Curva de estabilidad de temperatura en la base de la protección del colector de escape del motor G10.

Fuente: Los Autores.

2.8 Selección del disipador de calor.

La selección se realizó dependiendo de las medidas del módulo termoelectrico CP85438 que son de 40 x 40 mm ya que de esta área se requiere extraer el calor al ambiente.

Se buscó un disipador comercial. Se obtuvo el siguiente disipador de calor utilizado para refrigeración [28], se aprecia en el Grafico 35.

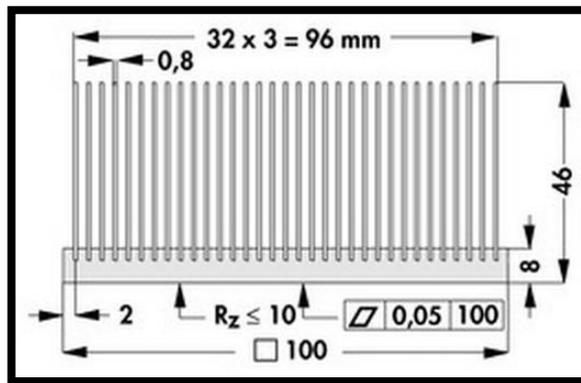


Grafico 35: Medidas de un disipador de calor comercial.

Fuente: [28]

El fabricante del disipador proporciona la siguiente curva de resistencia térmica.

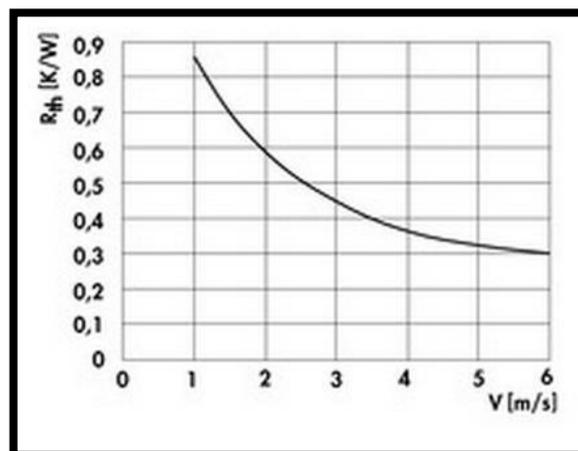


Grafico 36: siguiente curva de resistencia térmica.

Fuente [28].

Para comprobar si nuestro disipador va realizara un trabajo eficaz se realiza un estudio en ANSYS, en el cual presentaremos la disipación en estado estático del motor G10 ya que en ese estado presentara el mayor problema el modulo termoelectrico, el cual necesitamos que disipe el mayor calor posible de la cara fría del mismo, también se quiere que se mantenga una diferencia de temperatura entre ambas caras del módulo termoelectrico tipo Peltier, se aprecia la disipación de calor en el Grafico 37 y 38.

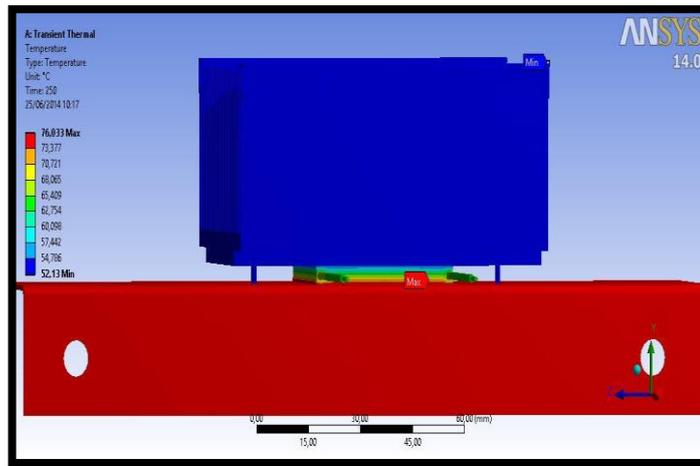


Grafico 37: Disipador de calor instalado en la cara fría del módulo termoelectrico.

Fuente: Los Autores.

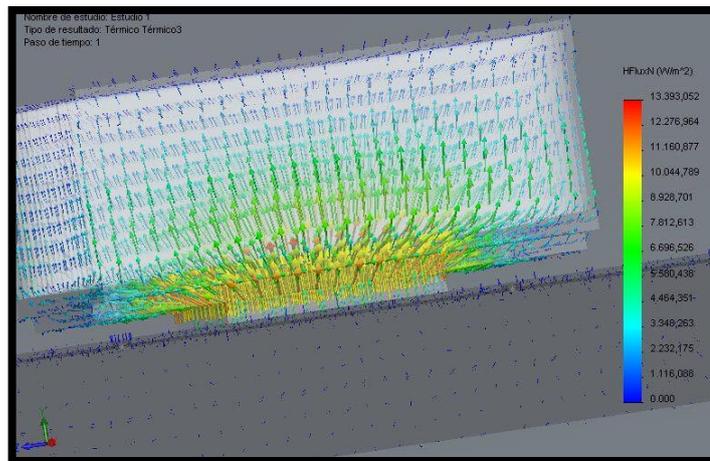


Grafico 38: Disipación de calor.

Fuente: Los Autores.

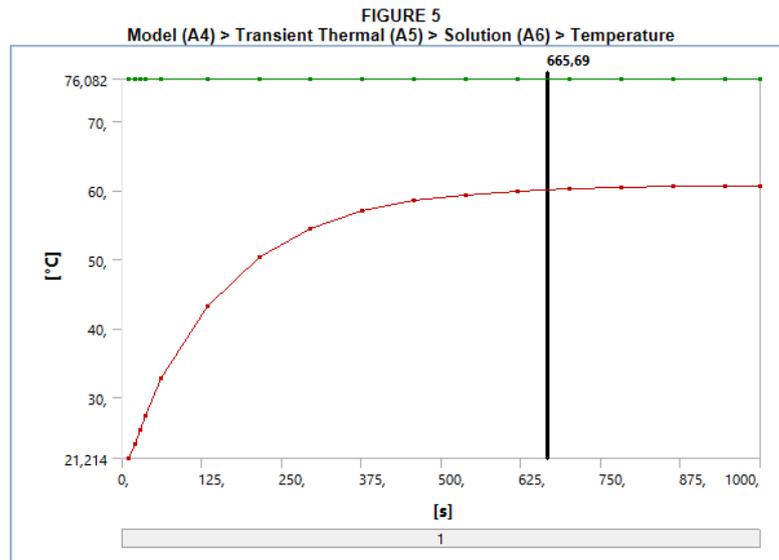


Grafico 39: Estabilidad de las temperaturas del módulo termoelectrico.

Fuente: Los Autores.

Se aprecia en el Grafico 39 que en el estado estacionario del motor G10 se obtiene una diferencia de temperaturas entre las caras del módulo termoelectrico, esto nos brinda como conclusión que nuestro disipador si cumple con lo requerido para la experimentación.

2.9 Rendimiento de los módulos termoelectricos.

En el mercado se puede encontrar una gran cantidad de módulos termoelectricos la cual se encuentra clasificada según su tamaño, su intensidad (I_{max}), su voltaje (V_{max}), su potencia de refrigeración (Q_{max}).

Las dimensiones de los elementos termoelectricos son dependientes de la corriente óptima de operación, a la cual es fabricado un módulo termoelectrico.

Se hace uso de 4 parámetros de rendimiento máximo, con una temperatura fija en la parte caliente de 303K (30°C), sus parámetros son:

I_{max} (A): DC que produce la máxima diferencia de temperatura entre los acoplamientos del módulo termoeléctrico, sin ninguna carga de calor en el lado frío (poder de enfriamiento igual a 0), I_{max} no es el valor de la corriente máxima I (es el que circula por el circuito), sino es el que corresponde al valor de corriente que genera ΔT_{max} .

ΔT_{max} (°K): máxima temperatura en los acoplamientos a través del módulo termoeléctrico, ΔT_{max} de los módulos comerciales es alrededor de 68°K a 72°K con temperatura fija en la parte caliente 303°K (30°C).

Q_{max} (W): potencia de enfriamiento con diferencia de temperatura a través del módulo de $\Delta T = 0$ con I_{max} .

V_{max} (V): Voltaje en terminales de cada módulo termoeléctrico para una I_{max} .

El rendimiento de cada módulo termoeléctrico es dependiente de la temperatura, también las propiedades físicas de los materiales termoeléctricos.

2.10 Selección de los módulos termoeléctricos.

Para seleccionar un módulo termoeléctrico correcto se debe tomar dos condiciones importantes:

La primera condición es el tipo de material del módulo termoeléctrico, existen algunos materiales que pueden producir energía a partir de una diferencia de temperatura, estos materiales varían de acuerdo a costes, eficiencia y temperatura de operación.

La segunda condición es la forma de construcción del módulo termoeléctrico, ya que de esto depende la máxima potencia de un módulo y la tensión característica del

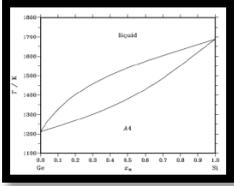
sistema. Para poder seleccionar un módulo se tomara en cuenta cada aspecto, ya que de esto depende todo el sistema.

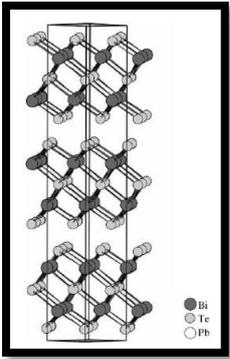
Para la construcción de módulos termoeléctricos se han realizado diversas mezclas de materiales semiconductores (con su correspondiente dopaje P y N) Tabla 10 y para más información el Anexo 4.

- Silicio – Germanio
- Telurio – Bismuto

Tabla 10: Materiales de los módulos termoeléctricos.

Fuente: [1]

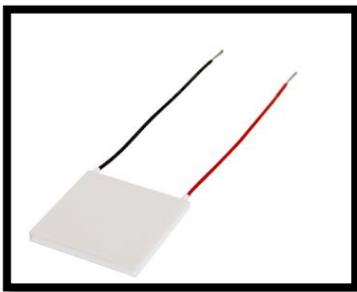
| MATERIALES DE LOS MÓDULOS TERMOELÉCTRICOS. | | |
|--|---|---|
| Tipos de materiales. | Dopaje de los materiales. | Características de los materiales. |
| <p>Silicio – Germanio</p>  <p>Grafico 40: Diagrama de equilibrio Ge-Si Fuente: [1]</p> | <p>Se emplean en el campo espacial, concretamente en satélites con misiones de exploración en órbitas alejadas del sol. Su utilización a temperaturas moderadas resulta inviable por su bajo rendimiento, al tener su temperatura de máxima eficiencia alrededor de 1200 K, y su elevadísimo precio, el dopaje permite obtener materiales de tipo p y</p> | <p>Tanto el silicio como el germanio cristalizan con una estructura de tipo diamante. Sus enlaces son rígidos y su ordenamiento cristalino altamente simétrico, lo que unido a un peso atómico bajo o moderado da como resultado una conductividad térmica elevada [1].</p> |

| | | |
|---|---|---|
| | tipo n [1] son utilizados para generación. | |
| <p>Telurio – Bismuto</p>  <p>Grafico 41: Estructura cristalina del compuesto Bi_2Te_3. Fuente: [1]</p> | <p>El Bi_2Te_3 tiene un amplio rango composicional de estabilidad, lo cual permite obtener materiales de tipo p y tipo n en función del exceso de Bi o Te respectivamente son utilizados para refrigeración.</p> | <p>El telurio de bismuto, de fórmula química Bi_2Te_3, tiene estructura cristalina de tipo tetradimita ($\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$). En su forma natural se encuentra en el mineral telurobismutita, habitualmente asociado a trazas de selenio [13].</p> |

Se realizó una clasificación de acuerdo a su I_{max} , V_{max} que pueden generar cada módulo termoelectrico y se concluyó que los siguientes módulos cuentan con una intensidad (I_{max}) de 8.5A y con voltaje (V_{max}) de 8.6V y 15.4V con ΔT de 68K, también del material que son fabricado estos módulos termoelectricos que son de Telurio de Bismuto.

Tabla 11: Módulos termoelectricos CP85 series.

Fuente: Los Autores.

| CP85 SERIES | | | | | | | |
|--|-----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------|
|  | | | | | | | |
| Numero de modelo | Resistencia ($\Omega \pm 10\%$) | I _{max} (A) | V _{max} (V) | Q _{max} (Th = 27°C) (W) | Q _{max} (Th = 50°C) (W) | ΔT_{max} (Th = 27°C) | Dimensiones LxWxH (mm) |
| CP85138 | 0.2 | 8.5 | 2.1 | 10 | 11.1 | 68 | 15X15X3.8 |
| CP85238 | 0.4 | 8.5 | 3.8 | 18 | 20.1 | 68 | 20X20X3.8 |
| CP85338 | 0.9 | 8.5 | 8.6 | 42 | 46.9 | 68 | 30X30X3.8 |
| CP85438 | 1.5 | 8.5 | 15.4 | 75 | 83.9 | 68 | 40X40X3.8 |

Los módulos termoelectricos que se seleccionaron fueron del grupo CP85 series de efecto Peltier ya que son más económicos y son más comerciales, se escogió el CP85438 por su I_{max}, V_{max} y su Th (135°C) máximo que puede soportar, también por sus características dimensionales ya que cuenta con un área 16cm², lo cual nos permite poder implementar 4 módulos más en el protector superior del colector de escape como se aprecia en el Grafico 26.

Tabla 12: Precauciones generales de los módulos termoelectricos CP85438.

Fuente: [27]

PRECAUCIONES GENERALES

Precauciones de uso:

- 1) No permita que el lado Th del módulo Peltier exceda 80°C o 90°C en otros módulos.
- 2) Dejar caer o ejercer golpes mecánicos en la unidad puede causar que se rompa. Por favor, tenga cuidado en la manipulación del producto.
- 3) Por favor, asegúrese de no almacenar el módulo Peltier en la exposición directa a la luz solar de alta humedad. Evite también la exposición al rocío o la condensación. La temperatura y la humedad adecuada para el almacenamiento es $5 \sim 35^{\circ}\text{C}$ y $20 \sim 75\%$ de humedad relativa.

3 Instalación del módulo termoelectrico y realizacion del estudio estadístico del comportamiento en el colector de escape del motor G10.

3.1 Optimización de las temperaturas.

Se realizó una platina de aluminio para tratar de aprovechar el mayor calor que se transfiere del colector de escape al ambiente de esta forma podemos aumentar nuestra temperatura (T_h) del módulo termoelectrico y aumentar nuestra diferencia de temperatura.

3.1.1 Temperatura superficial de la base del modelo experimental.

En el estudio térmico del colector de escape en el capítulo anterior, la gráfica de línea de perfil se observa que el ducto central poseían una mayor temperatura superficial con respecto a los dos restantes que tenían temperaturas superficiales aproximadamente iguales una vez con la base montada sobre el colector de escape se tuvo una temperatura estable de 76°C , con una distancia entre el colector central y la base del modelo experimental aprovechando solo la energía radiada por el colector en cuestión.

Se colocó láminas de aluminio entre el ducto y la base, con pasta térmica entre cada superficie esto con la finalidad de tener también conducción de calor y no solo radiación.



Grafico 42: Láminas de aluminio colocadas y sujetadas con dos pernos.

Fuente: Los Autores.

Con el nuevo análisis térmico con las láminas de aluminio fijadas, la temperatura superficial es de 117,7°C siendo el punto más caliente, y teniendo 98°C como temperatura promedio.

Teniendo 22°C de ganancia con las láminas, en la siguiente grafica se muestra el nuevo análisis térmico realizado sobre la base donde se colocara el modulo termoelectrico como se indicó anteriormente.

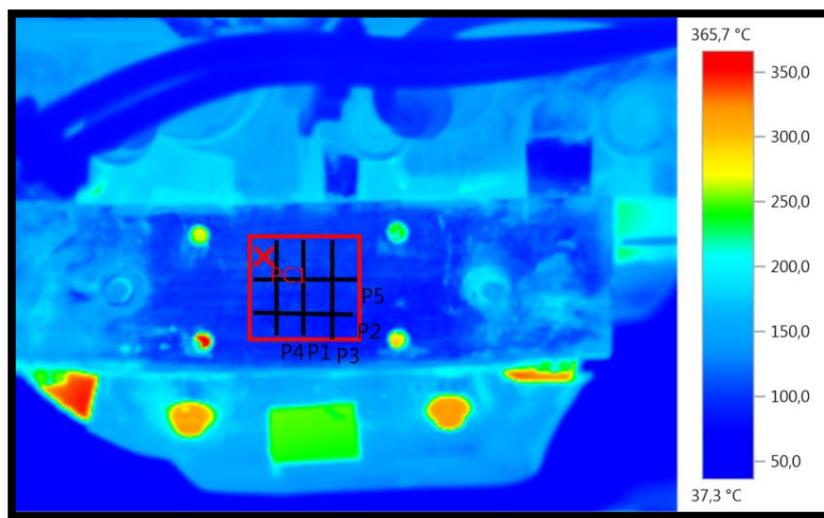


Grafico 43: Análisis térmico de la ubicación del módulo Peltier, con láminas de aluminio.

Fuente: Los Autores.

Tabla 13: Distribución de temperaturas en el colector de escape de un motor G-10.

Fuente: Los Autores.

| Objeto de medición | Temp. [°C] | Emis. | Temp. refl. [°C] |
|----------------------|------------|-------|------------------|
| Punto más caliente 1 | 117,7 | 0,95 | 20,0 |

Con las líneas de perfil de temperatura se puede apreciar la distribución de temperatura sobre el rectángulo rojo (Grafico 44) donde se colocó el módulo Peltier CP85438.

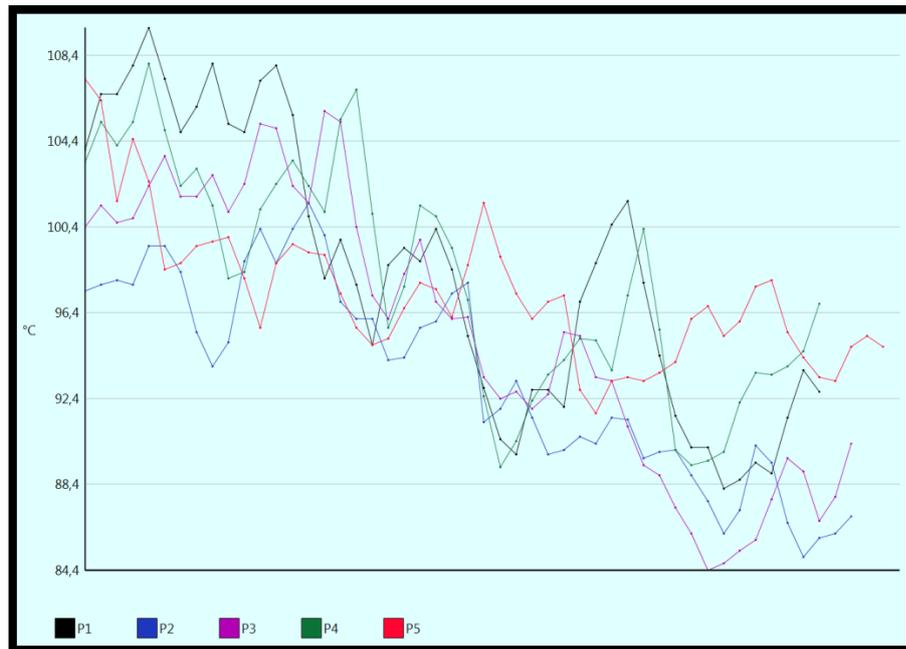


Grafico 44: Líneas de perfil de temperatura del área ocupada por el módulo Peltier.

Fuente: Los Autores.

3.1.2 Temperatura del disipador de calor.

Una vez que la temperatura superficial de la base caliente se ha logrado incrementar a 98°C de promedio, con la finalidad de tener un óptimo gradiente de temperatura se realizó un análisis en el programa ANSYS del disipador de calor sometido a convección forzada tomando en cuenta la nueva temperatura y con una convección forzada de 10 a 100 W/m²°C, ya que esta tiene mayor influencia porque está relacionada con la velocidad del vehículo.

En el Grafico 45 se puede apreciar las temperaturas de la base caliente y del disipador de calor.

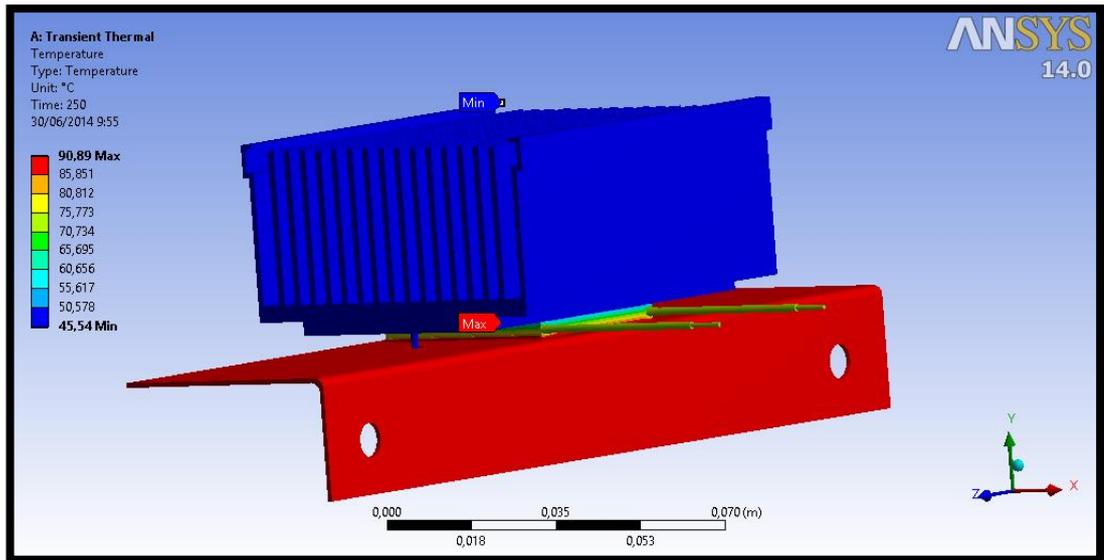


Grafico 45: Temperatura máxima y mínima del análisis en ANSYS.

Fuente: Los Autores.

En el Grafico 46 del análisis se observa la diferencia de temperatura que se lograra con la convección forzada un gradiente de 48°C.

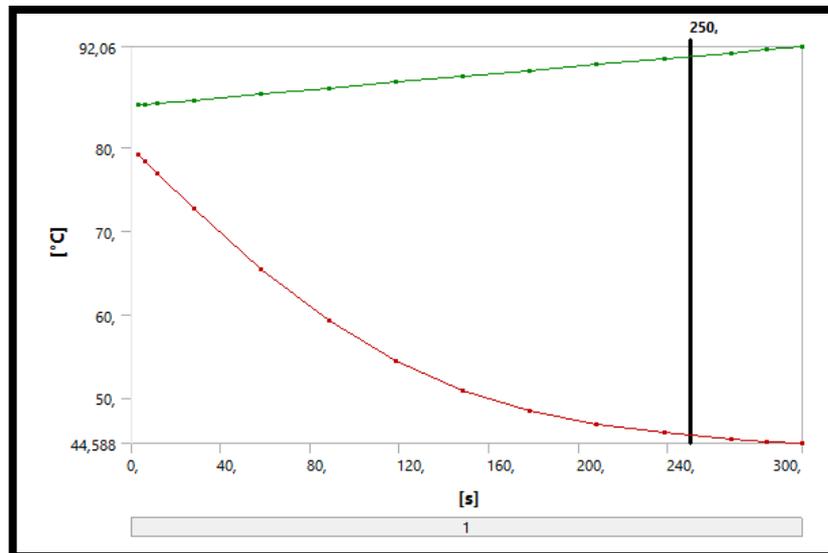


Grafico 46: Evolución de la temperatura vs el tiempo con convección forzada.

Fuente: Los Autores.

3.2 Entorno en el que se colocara el modelo experimental.

El entorno al que se va a someter el modelo experimental tiene influencia en el lado caliente y lado frio del modelo:

- Para el lado caliente será el calor que aportara el colector de escape y este dependerá de la carga del motor y por consiguiente las RPM del mismo.
- Lado frio la disipación de calor en estado estacionario será critica porque se encontrara en convección natural, pero esta mejorara cuando el vehículo este en movimiento pasando de convección natural a convección forzada dependiendo de la velocidad.

Con estos dos parámetros que tienen influencia en el modelo experimental se tienen los siguientes puntos a medir.

- Temperatura lado caliente del módulo Peltier.
 - Revoluciones por minuto del motor G10.
- Temperatura lado frio del módulo Peltier disipador.
 - Velocidad del vehículo.
- Temperatura circundante al disipador.

Para el procesamiento de las señales obtenidas de los diferentes sensores se utilizara el programa Labview y se creara una base de datos que en el capítulo 4 se analizaran.

Estos dos parámetros se muestran en el Grafico 47.

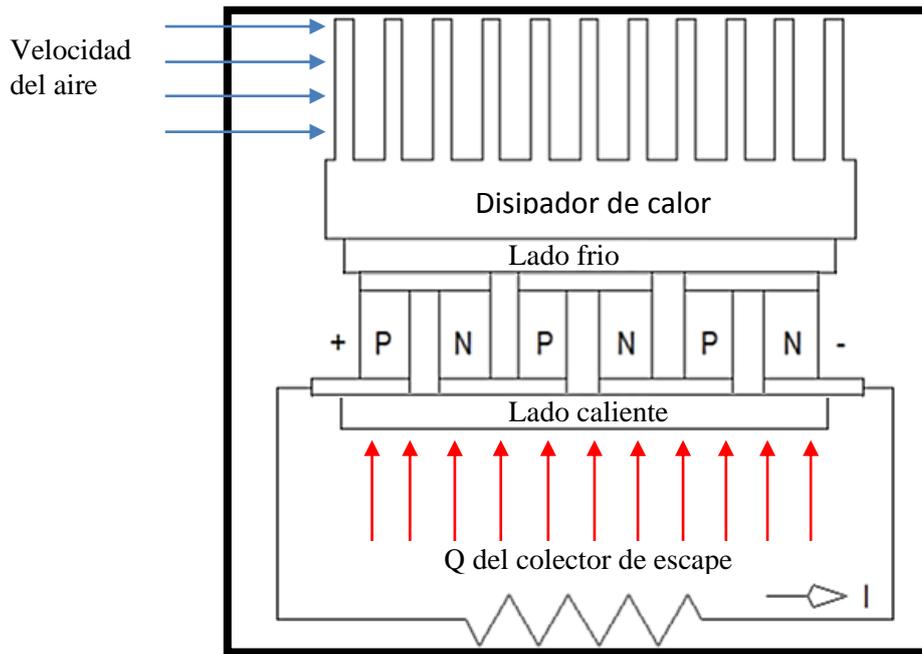


Grafico 47: Influencia de la velocidad y RPM.

Fuente: [7]

3.3 Instalación del modelo de experimentación.

Como se indicó en el capítulo anterior el modelo experimental a montar será el propuesto por C.-H Cheng, donde constan las siguientes partes:

- Lado caliente.- este lo proporcionara el colector de escape con la base montada con anterioridad.
- Entre la superficie de la base con la superficie del módulo termoeléctrico se colocó la pasta térmica CT40 para disminuir la resistencia por contacto.
- Lado frío.- este consta de un disipador de calor de aletas, también se colocó pasta térmica para que la disipación de calor sea la más óptima.

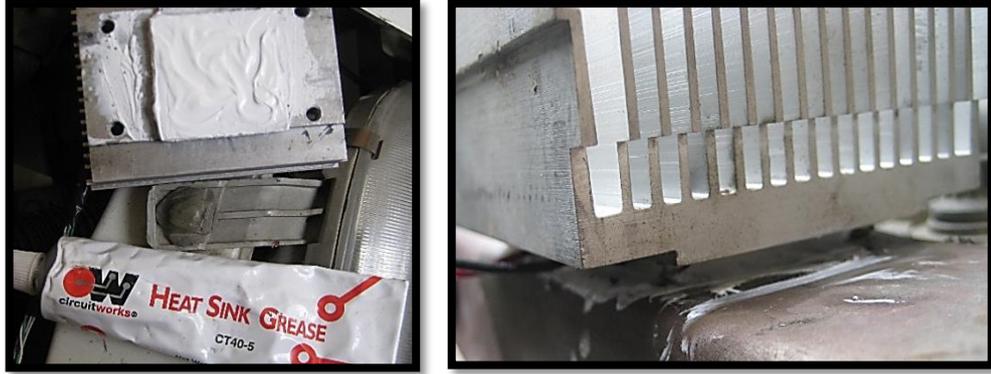


Grafico 48: Pasta térmica entre las diferentes superficies de contacto con el módulo Peltier

Fuente: Los Autores.

Se fijó en el modelo experimental con cuatro tornillos en la parte central de toda la base caliente y se montó en el colector de escape como se indica en la siguiente foto.

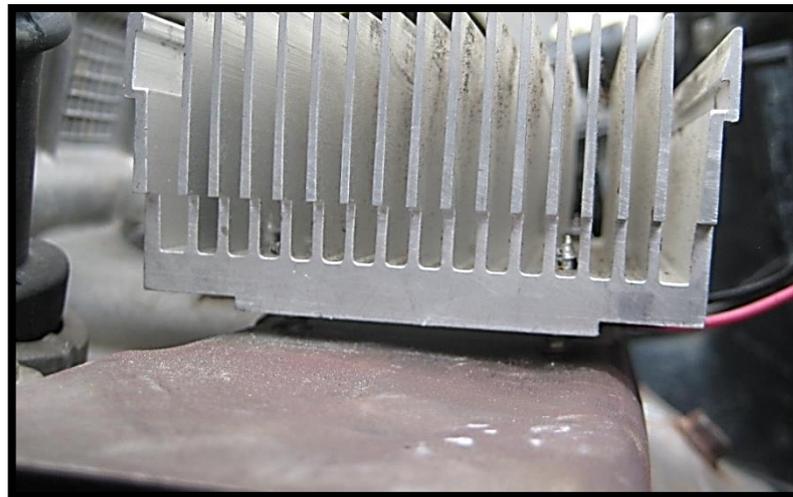


Grafico 49: Sujeción del módulo Peltier y el dissipador de calor.

Fuente: Los Autores.

3.4 Implementación de los sensores de temperatura en el sistema de generación de energía eléctrica.

Para poder observar la diferencia de temperatura que existe en el módulo se coloca sensores de temperatura en el base superior del colector de escape y en el disipador de calor, estos sensores nos indicaran las temperaturas existentes en el módulo termoelectrico y en el ambiente del sistema de generación, los sensores utilizados para medir estas temperaturas es el LM35DZ.

3.4.1 Sensor de temperatura LM35DZ.

La serie LM35 son sensores de temperatura de circuitos integrados de precisión, cuya tensión de salida es linealmente proporcional a la temperatura en grados Celsius (centígrados). Así pues, el LM35 tiene una ventaja sobre los sensores de temperatura lineales calibradas en kelvin. El LM35 no requiere ninguna calibración externa o el recorte para proporcionar precisiones típicas de $\pm 1/4$ °C a temperatura ambiente y $\pm 3/4$ °C durante un rango de temperatura de -55 a 150 °C, todas las especificaciones y curvas de los sensores LM35dz [22].

LM35 Sensores de temperatura de precisión, estos sensores nos brinda un factor de escala lineal de 10.0mV / °C, soporta desde -55 a 150°C, con estos sensores se pueden obtener la curva de comportamiento de las temperaturas existentes en el módulo, ya que también cuenta con una ventaja que no requiere de calibración y esto brinda una facilidad para poder leer temperaturas con LabVIEW.

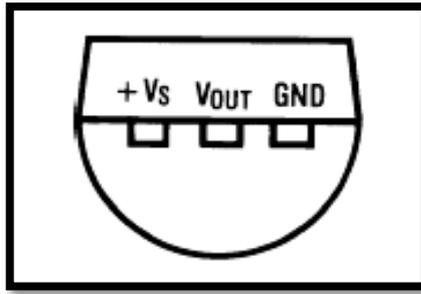


Grafico 50: Diagrama de conexión del sensor LM35dz.

Fuente: [22]

3.4.2 Implementación de los sensores LM35DZ.

Para la obtención de las señales de los sensores de temperatura se procede a soldar cada terminal del sensor a un cable multipar de esta manera se podrá conectar la alimentación 5V, GND y las señales de los tres sensores a la entrada de las señales analógicas de la DAQ NI USB 6212 para que posteriormente sean graficadas en Labview.

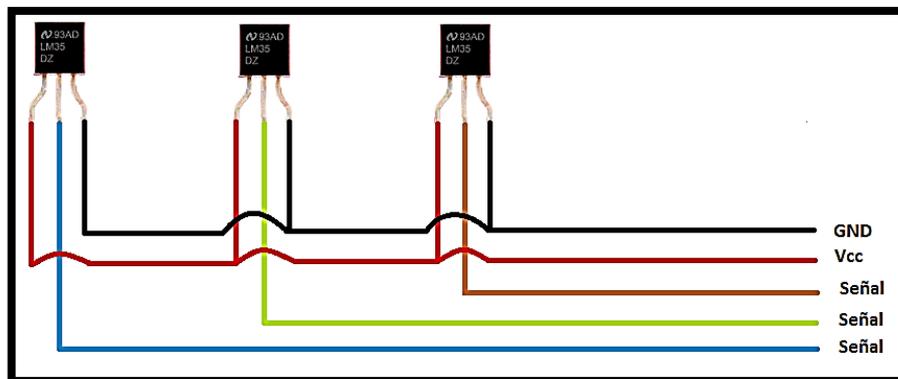


Grafico 51: Esquema de conexión de los sensores de temperatura LM35DZ.

Fuente: Los Autores.

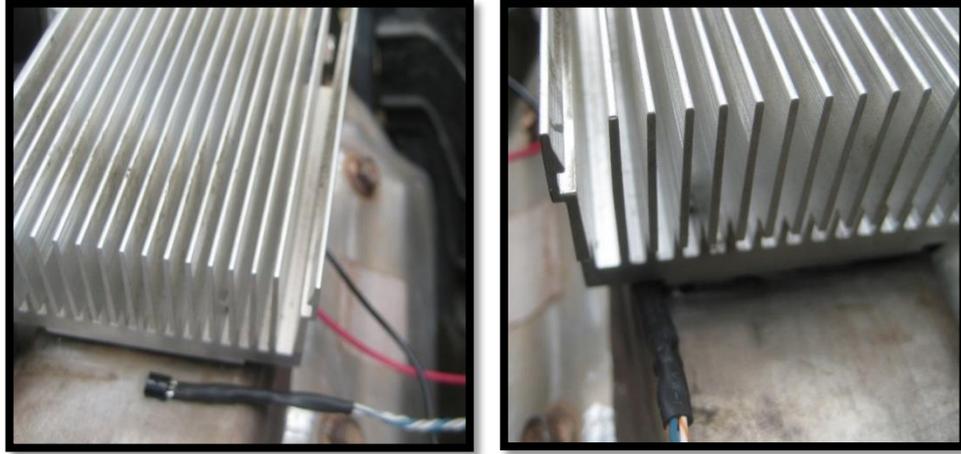


Grafico 52: sensores de temperatura lado caliente, derecha lado frio.

Fuente: Los Autores.

3.5 Implementación del sensor de velocidad y RPM en el vehículo Chevrolet Forsa II.

Para la obtención de las señales de velocidad y rpm se utilizó dos sensores ópticos CNY70 que consta de una fuente de luz (diodo emisor) y el detector (fototransistor) se montan en la misma dirección.



Grafico 53: CNY70 emisor y receptor encapsulados.

Fuente: [23]

Características.

- Longitud de onda del haz infrarrojo de 950nm.
- Intensidad del diodo emisor $I=50\text{mA}$.
- Intensidad de colector $I_c=50\text{mA}$.
- Tensión colector emisor $V_{ce}=32\text{V}$
- Tensión emisor colector $V_{ec}=7\text{V}$.
- Consumo aproximado de 200mW.

La distancia de detección óptima es de 0.3 a 5mm, mientras más cerca de 0.3mm la sensibilidad del sensor mejora.

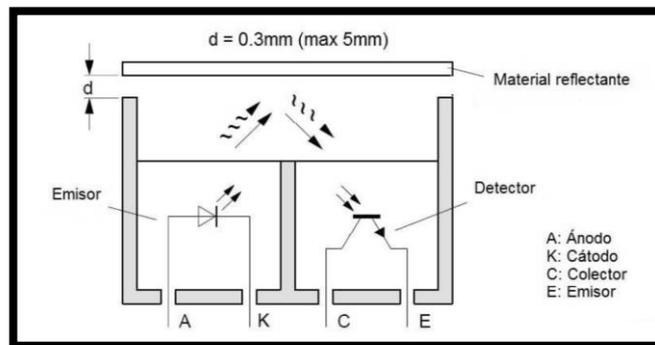


Grafico 54: Disposición de los pines del sensor CNY70.

Fuente: [23]

3.5.1 El funcionamiento del sensor CNY70.

El sensor varía su nivel de tensión en función del color del objeto teniendo en cuenta una aproximación de un tono (claro) u (oscuro) en función del tono entregará una voltaje de 5v sin objeto o bien este es muy oscuro (negro), 0v con un objeto muy claro dándonos una señal digital, a continuación se muestra el conexionado típico del sensor CNY70 [24].

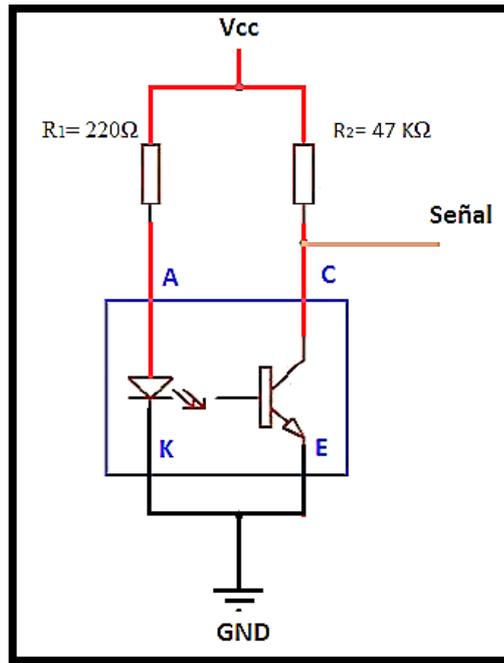


Grafico 55: Esquema de conexión del sensor CNY70.

Fuente: [24]

El sensor de velocidad se ubicó sobre el disco de freno y su periferia se pintó de color negro y blanco. El sensor de RPM se ubicó sobre la patea de accesorios del cigüeñal pintando su periferia de color negro y blanco para obtener una señal digital de onda cuadrada como se muestra a continuación en el siguiente gráfico.

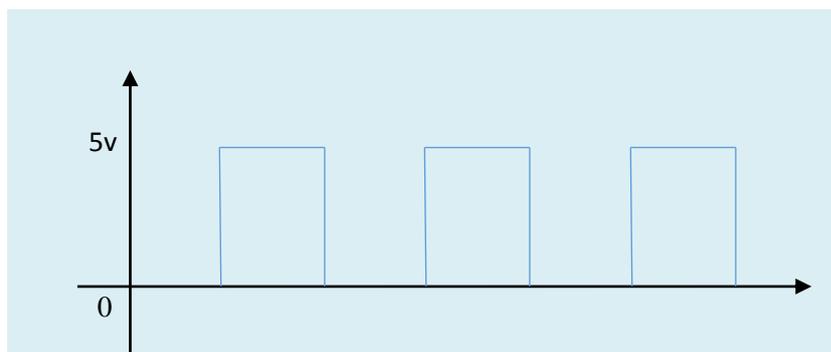


Grafico 56: Grafico Señal digital de salida del sensor.

Fuente: Los Autores.

3.6 Sistema de adquisición de datos.

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema DAQ consiste de sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable. Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs estándares en la industria proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable.

3.6.1 Partes de un Sistema de adquisición de datos.

Este consta de sensores unidad de adquisición y software o aplicación que controle o simplemente lea las señales de sensores estas partes se muestran en el Grafico 58.

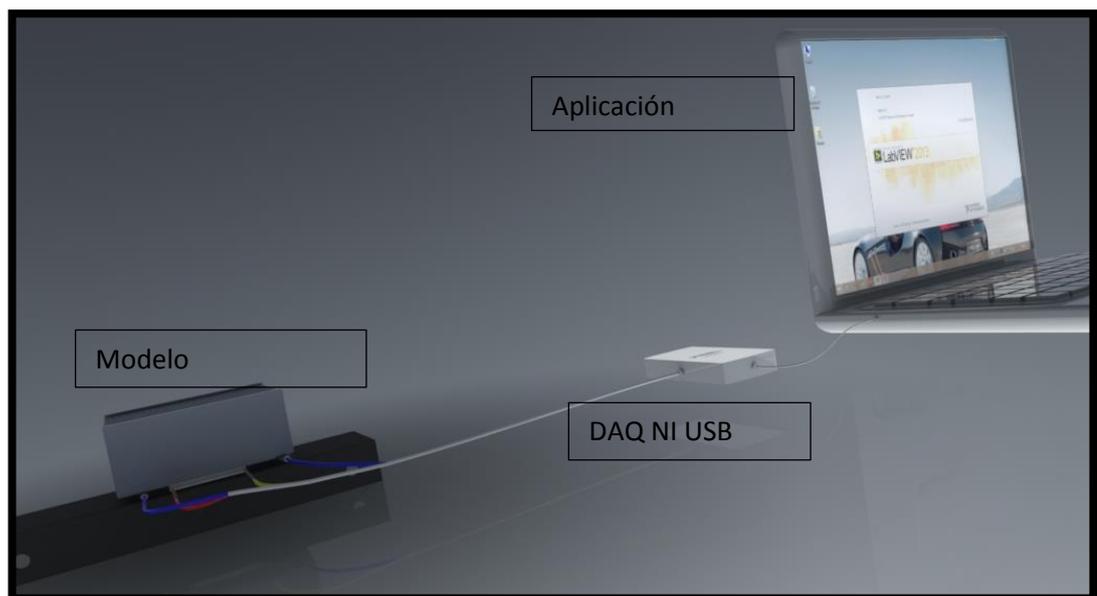


Grafico 57: Sistema de adquisición de datos.

Fuente: Los Autores.

Las diferentes partes del sistema de adquisición de datos se describen a continuación.

3.6.2 Sensores.

Los sensores son las descritas anteriormente como las temperaturas montadas en el modelo experimental con LM35DZ, velocidad y rpm con el CNY70.

3.6.3 Dispositivo DAQ NI USB 6212.



Grafico 58: DAQ NI USB 6212.

Fuente: [25]

El hardware DAQ actúa como la interfaz entre una PC y señales del mundo exterior. Funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que una PC pueda interpretarlas. Los tres componentes clave de un dispositivo DAQ usado para medir una señal son el circuito de acondicionamiento de señales, convertidor analógico-digital (ADC) y un bus de PC. Varios dispositivos DAQ incluyen otras funciones para automatizar sistemas de medidas y procesos. Por ejemplo, los convertidores digitales-analógicos (DACs) envían señales analógicas, las líneas de E/S digital reciben y envían señales digitales y los contadores/temporizadores cuentan y generan pulsos digitales.

3.6.3.1 Características generales.

- 16 entradas analógicas (16 bits, 400 kS/s)

- 2 salidas analógicas (16 bits, 250 kS/s), 32 E/S digitales (24 para terminación masiva), 2 contadores de 32 bits.
- Energizado por bus USB para una mayor movilidad, conectividad de señal integrada.
- Tecnología NI Signal Streaming para transferencia de datos sostenida a alta velocidad en USB; la versión OEM está disponible.
- Compatible con LabVIEW, ANSI C/C++, C#, Visual Basic .NET y Visual Basic 6.0.
- El software de NI-DAQmx y software interactivo LabVIEW Signal Express LE para registro de datos.

3.6.4 Software controlador y software de aplicación.

El software controlador y aplicación es Labview que tiene la facilidad de programación las funciones son bloques que se interconectan entre sí, intercambiando la información de programar, solo con arrastrar y soltar en la ventana de edición, además el dispositivo DAQ consta en las librerías de Labview ya que pertenecen a National Instruments siendo totalmente compatibles y reduciendo así el tiempo empleado en la programación, que es una de las mayores ventajas.

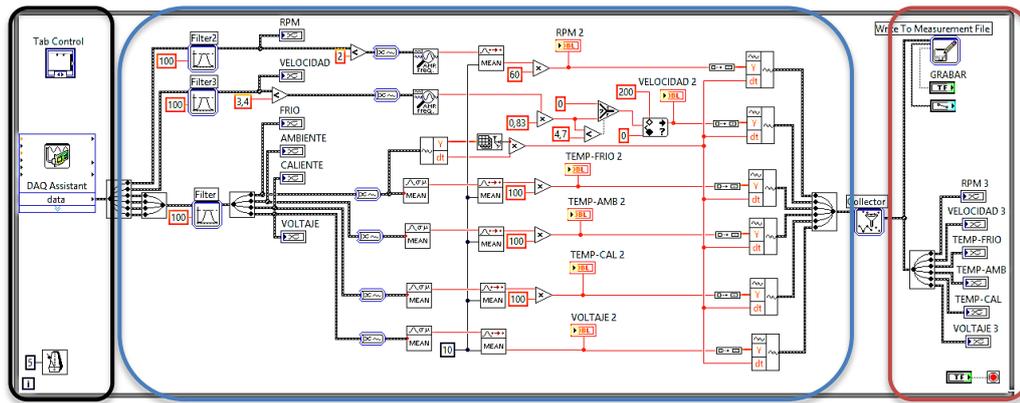


Gráfico 59: Esquema del programa en Labview.

Fuente: Los Autores.

El programa diseñado en Labview se divide en los siguientes bloques de programación que se muestran el gráfico anterior.

1.- Este bloque se tiene la visualización de las señales y la conexión del programa Labview con la DAQ NI USB 6212 mediante el asistente incorporado en el programa Labview, este se configuro con 6 puertos analógicos A0, A1, A2, A3, A4, A5, A6, de los cuales A0...A5 están conectados las siguientes señales RPM, Velocidad, Temperatura lado Frio, Temperatura Ambiente, Temperatura Caliente respectivamente con conexión tipo RSE, mientras que A6 tiene conexión del tipo Diferencial.

2.- En este bloque se filtra y calibran las señales antes mencionadas, y se las pasa a función del tiempo.

3.- En este bloque se graban las muestras el tiempo, la visualización y parada del programa.

En el Grafico 60 se muestra la ventana del programa de adquisición de datos para el modelo experimental luego de ser filtrados y calibrados.

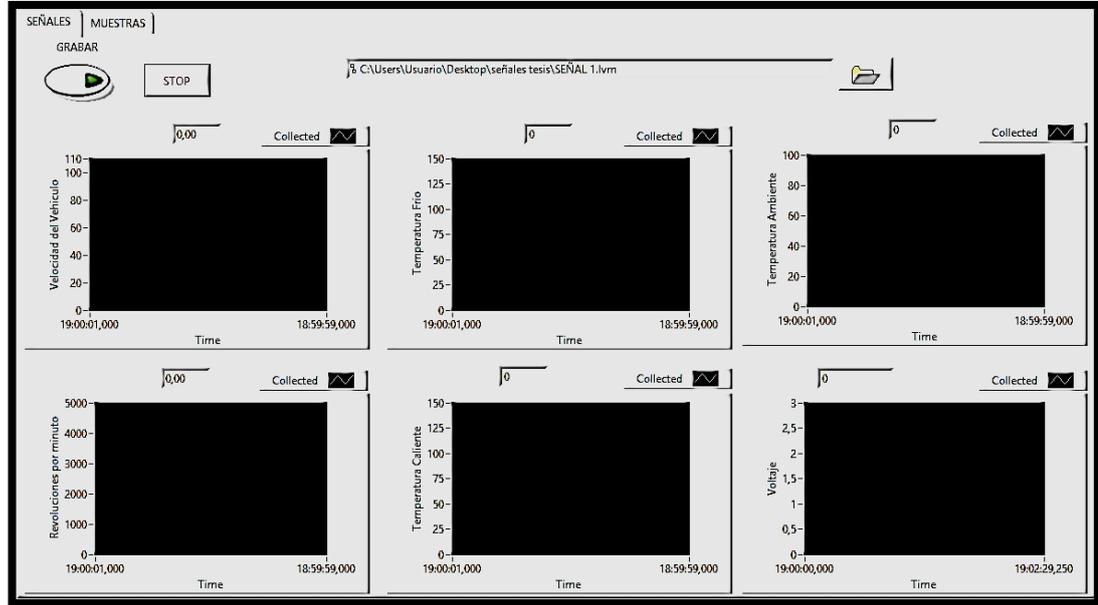


Grafico 60: Visualización de las señales de los sensores y voltaje generado.

Fuente: Los Autores.

3.7 Muestras para población Infinita.

Para saber cuántas muestras se van a necesitar para la validación del experimento se realiza el cálculo del número de muestras para una población infinita, tomando en cuenta que los datos se obtendrán de la Tabla 14 y la Tabla 15.

Tabla 14: El nivel de confianza

Fuente: [25]

| % Error | Nivel de Confianza | Valor de Z calculado en tablas |
|----------------|---------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 99 % | 2.58 |
| 5 | 95 % | 1.96 |
| 10 | 90 % | 1.645 |

Tabla 15: La precisión absoluta (d).

Fuente: [25]

| % | Valor d |
|----|---------|
| 90 | 0.1 |
| 95 | 0.05 |
| 99 | 0.001 |

3.7.1 Formulas para calcular la muestra en estudios descriptivos.

Para estudios cuya variable principal es de tipo cuantitativo se tiene la siguiente fórmula para población infinita.

$$n = \frac{Z^2 * S^2}{d^2} \quad (3.1)$$

Tabla 16: Simbología.

Fuente: Los Autores.

| Simbología | |
|--------------|---|
| n | Tamaño muestral. |
| $Z_{(0.05)}$ | Valor correspondiente a la distribución de Gauss. |
| S | Varianza de la población en estudio(es el cuadrado de la desviación estándar y puede obtenerse de estudios similares o pruebas piloto). |
| d | Nivel de precisión absoluta. |

3.7.2 Cálculo del tamaño de la muestra para una población infinita.

$$n = \frac{Z^2 * p * q}{i^2} \quad (3.2)$$

Tabla 17: Simbología.

Fuente: Los Autores.

| Simbología | |
|--------------|--|
| N | Tamaño muestral. |
| $Z_{(0.05)}$ | Valor correspondiente a la distribución de Gauss. |
| P | Prevalencia esperada del parámetro a evaluar. (p = 70%, q = 30%) |
| Q | 1- p |
| I | Error que se prevé cometer. |

3.8 Experimentación.

Para tener la descripción del comportamiento del módulo termoelectrico, se realizó la obtención de datos en la ciudad de Cuenca, para posteriormente ser analizada.

Las señales se tomaron con las siguientes condiciones.

- Porcentaje de humedad del 60%.
- Con una altura aproximada de 2400 msnm.
- Temperatura de 23 a 20°C.
- Estático.
 - Encendido (Calentamiento del MCI G10).
 - Apagado (Enfriamiento del MCI G10).
- Dinámico.
 - Ciudad.
 - Carretera.
 - Autopista.

Las tres primeras condiciones anteriores fueron medidas en cada prueba y se corroboraron con la tesis [29]. Las condiciones restantes son en las que el motor estará funcionando.

3.8.1 Pruebas estáticas.

Estas pruebas se realizaron en donde se tenía una convección natural a un régimen constante del motor.

3.8.1.1 Calentamiento del MCI G10.

La obtención de datos en el calentamiento se llevó a cabo a temperatura ambiente con un promedio de 20°C, y en un tiempo de 30 min.

Se grafica la siguiente muestra, las señales obtenidas en calentamiento, rpm, temperaturas, voltaje, la corriente será obtenida luego del análisis respectivo.

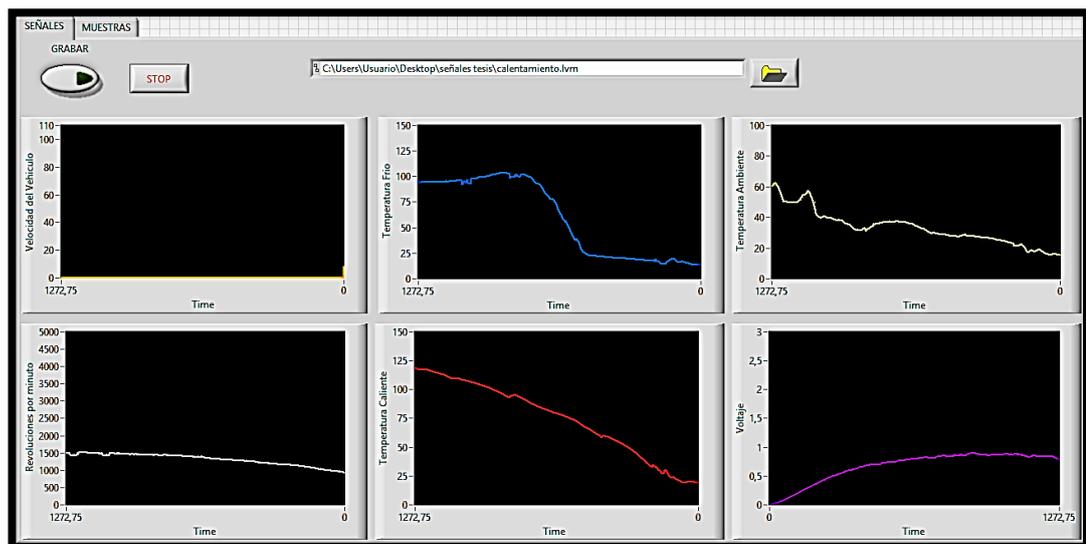


Grafico 61: Muestra de señales obtenidas en el calentamiento.

Fuente: Los Autores.

3.8.1.2 Enfriamiento del MCI G10.

Las lecturas de los sensores en enfriamiento se realizaron luego de haber llegado el motor a temperatura de funcionamiento apagando el motor las primeras señales se obtuvieron los primeros 2 min de grabación, luego con intervalos de 15 min se

tomaron puntos para ser graficados en Excel, ya que esta prueba se demora aproximadamente 2 horas en realizarse.

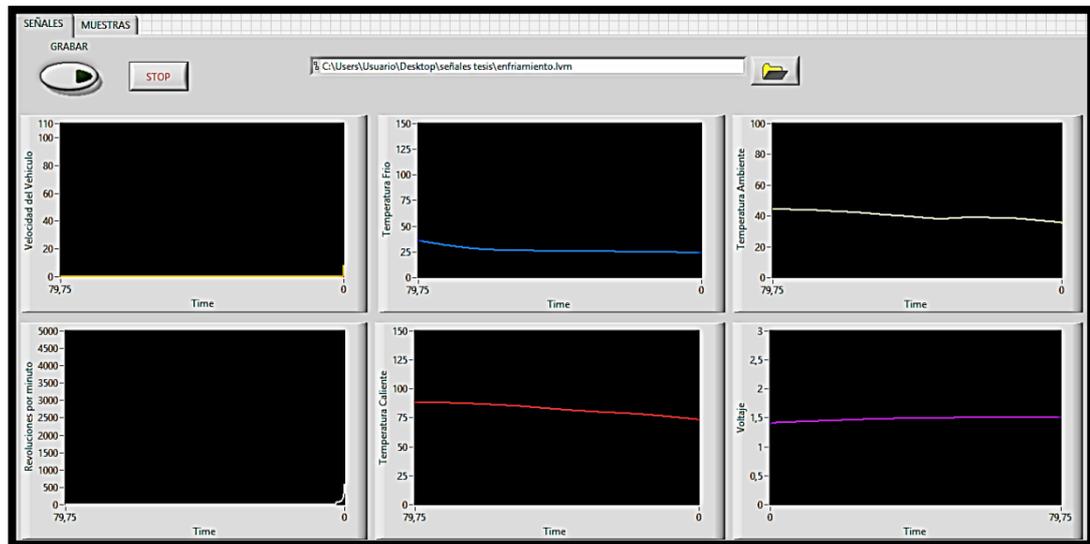


Grafico 62: Señal en tiempo continuo de las señales.

Fuente: Los Autores.

3.8.2 Pruebas en Ciudad.

Las muestras se tomaron con una temperatura promedio de 21°C, y con la reglamentación de la ANT para tránsito en ciudad o urbana hasta una velocidad de 50 Km/h considerado como moderado en el siguiente grafico se muestra la ruta tomada para la prueba.

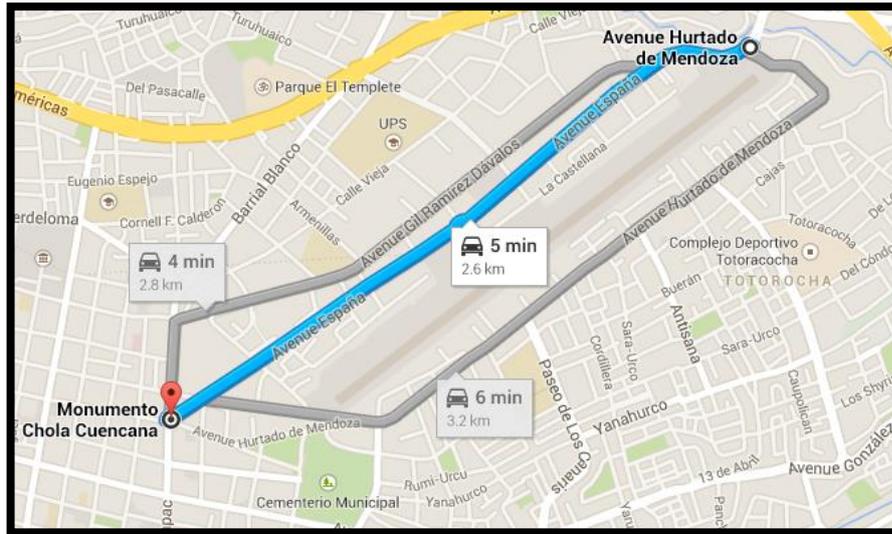


Grafico 63: Ruta para tomar las muestras en ciudad.

Fuente: Los Autores.

En el grafico siguiente se aprecia la muestra tomada por cada sensor en la ruta anterior.

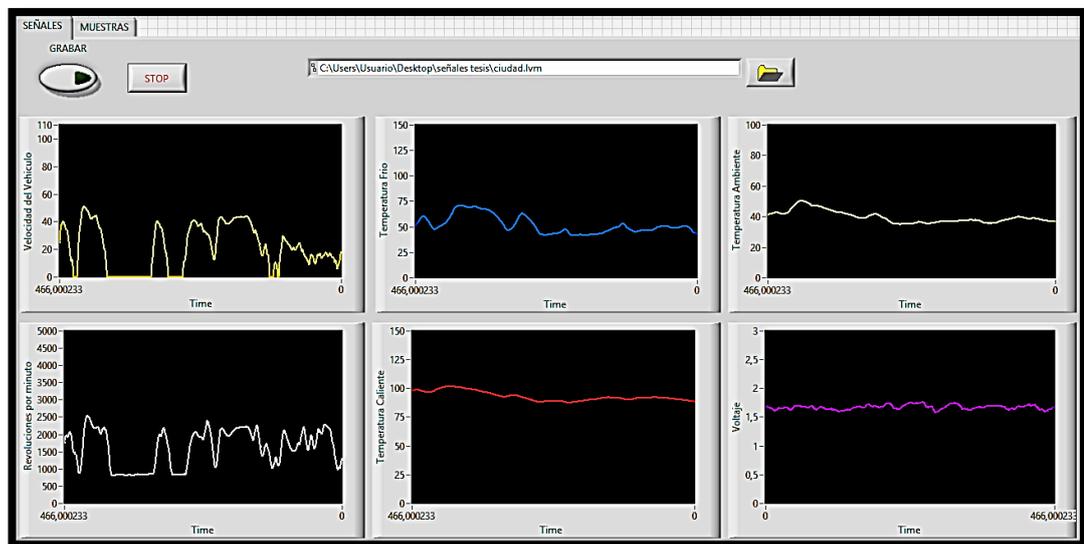


Grafico 64: Muestras de señales tránsito en Ciudad.

Fuente: Los Autores.

3.8.3 Pruebas en Carretera.

Las muestras se tomaron con una temperatura promedio de 21°C, y con la reglamentación de la ANT para tránsito en carretera de hasta una velocidad máxima 90 Km/h considerado como moderado.

3.8.3.1 Pruebas en carretera plena carga.

Esta se realizó con una pendiente aproximado de 20 a 30 grados de inclinación, con una temperatura promedio de 19°C, en la siguiente grafica se muestra la ruta tomada para la muestras.

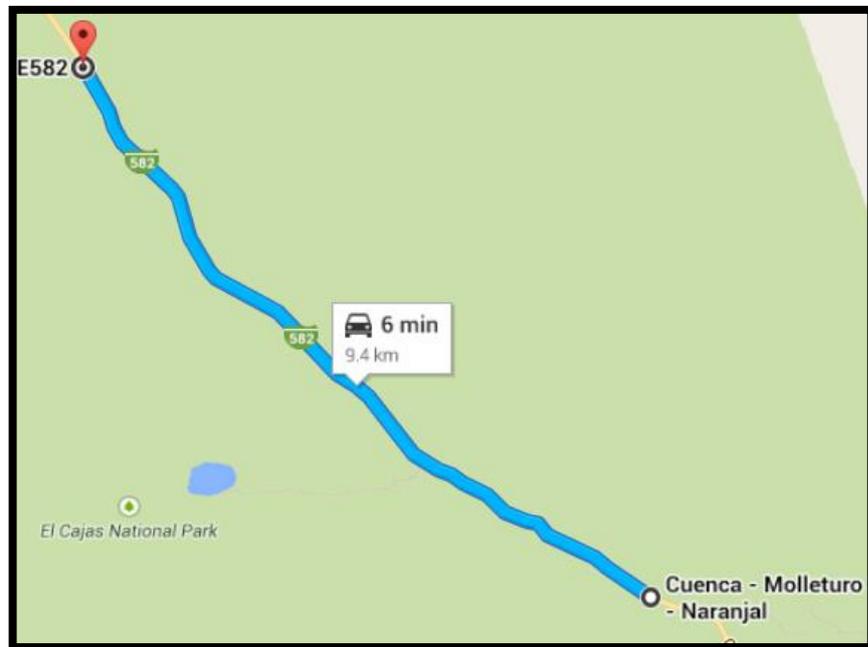


Grafico 65: Ruta para prueba carretera plena carga.

Fuente: Los Autores.

En el grafico siguiente la muestra medida de los sensores.

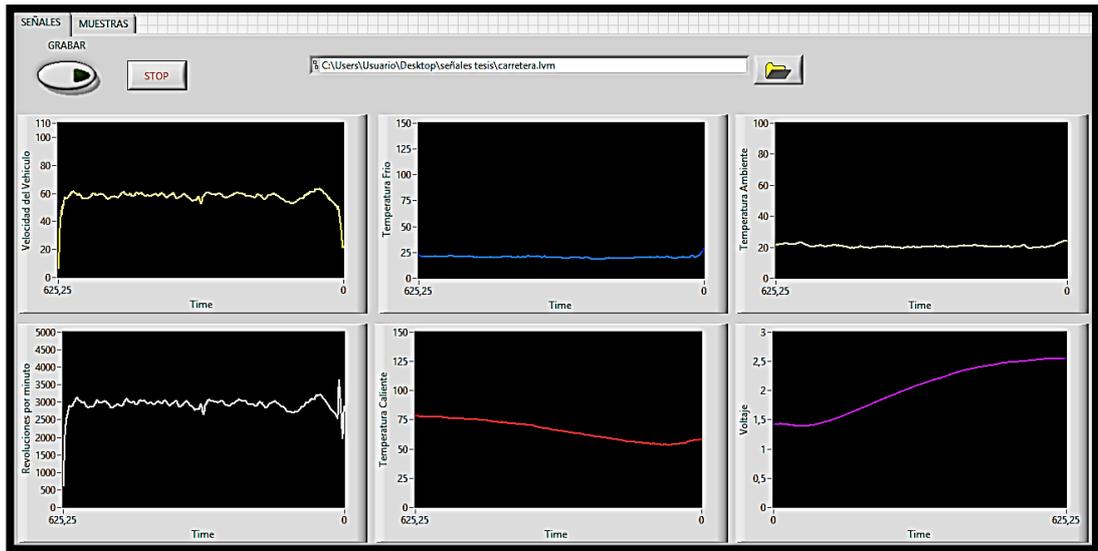


Gráfico 66: Muestra de señales en carretera plena carga.

Fuente: Los Autores.

3.8.3.2 Pruebas en autopista.

Las siguientes muestras se tomaron con la velocidad referenciada de la ANT de 90 Km/h, como máximo considerado como moderado, con una temperatura promedio de 20°C.

La siguiente grafica se muestra la ruta donde se tomaron las muestras.

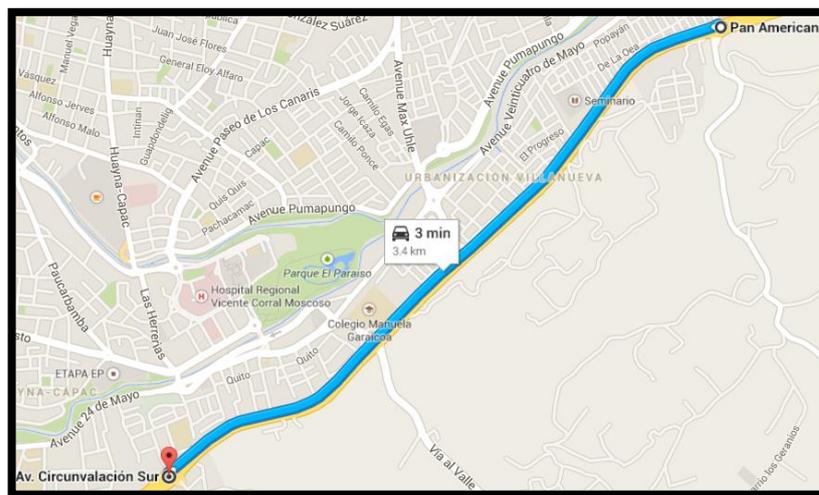


Gráfico 67: Ruta tomada para las muestras Autopista.

Fuente: Los Autores.

En el siguiente grafico las señales obtenidas de la pruebas en autopista.

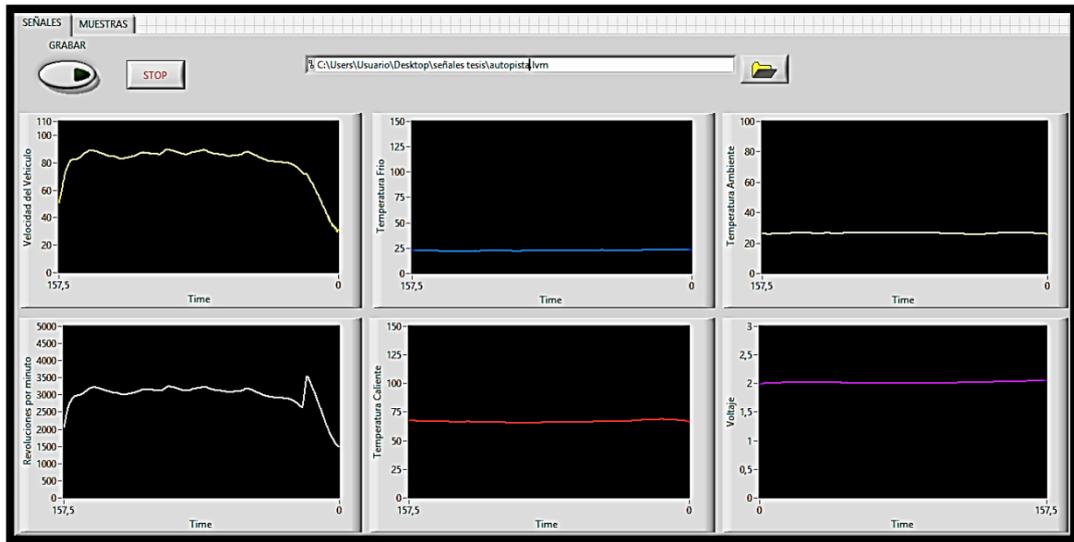


Grafico 68: Muestra de señales en Autopista.

Fuente: Los Autores.

4 Analizar los resultados obtenidos sobre el comportamiento de los módulos termoeléctricos en el motor G10.

4.1 Cálculo del número de muestras.

Para este cálculo se utiliza la ecuación 3.1.

$$n = \frac{Z^2 * S^2}{d^2} \quad (3.1)$$

Tabla 18: Simbología.

Fuente: Los Autores.

| Datos | |
|-------------------------|-----------|
| N | |
| $Z_{(0.05)}$ | 1.96 |
| $S_{640 \text{ Datos}}$ | 0.0813767 |
| D | 0.05 |

$$n = \frac{(1.96)^2 * (0.08137)^2}{(0.05)^2} = 10.17 \text{ muestras}$$

4.2 Cálculo del tamaño de la muestra para una población infinita.

Para este cálculo se utiliza la ecuación 3.2.

$$n = \frac{Z^2 * p * q}{i^2} \quad (3.2)$$

Tabla 19: Simbología.

Fuente: Los Autores.

| Simbología | |
|--------------|--|
| n | Tamaño muestral. |
| $Z_{(0.05)}$ | Valor correspondiente a la distribución de Gauss. |
| p | Prevalencia esperada del parámetro a evaluar. (p = 70%, q = 30%) |
| q | 1- p |
| i | Error que se prevé cometer. |

$$n = \frac{(1.96)^2 * 0.7 * 0.3}{(0.10)^2} = 80.6 \text{ Datos}$$

4.3 Calor utilizado para la generación eléctrica.

Delos análisis realizados con la cámara térmica en el capítulo II, de la temperatura superficial del colector de escape MCI G10 y de la base del modelo experimental para generación termoeléctrica, se aprecia en el Grafico 69 la cual se tomó en el momento de calentamiento del MCI G10 donde tenemos una temperatura superficial en el colector de escape de 315°C de promedio estabilizándose aproximadamente en 28 min esta temperatura es desechada al medio ambiente y una temperatura superficial de la base de 98°Cestabilizándose a los 24 min aproximadamente, siendo la temperatura que se recupera para la generación de energía eléctrica.

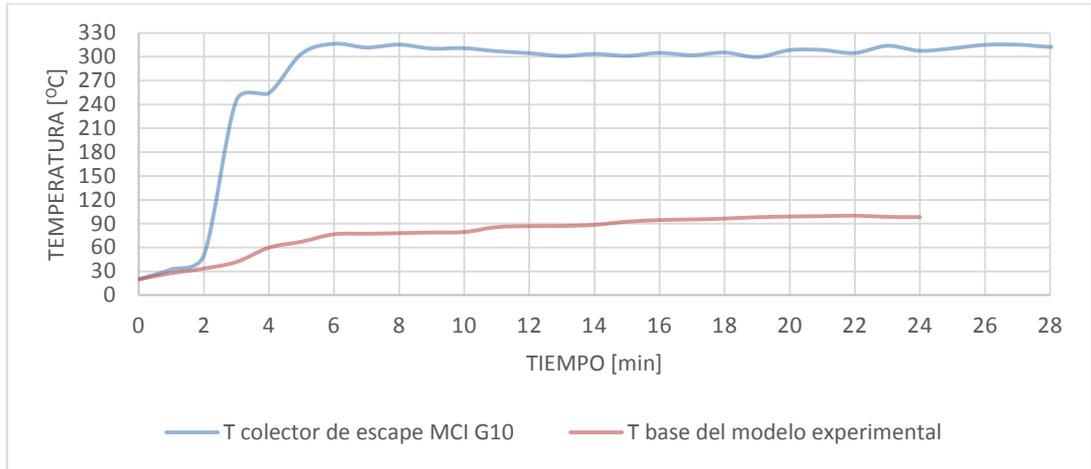


Grafico 69: Temperatura superficial desperdiciada y recuperada.

Fuente: Los Autores.

La temperatura superficial sobre la base del modelo experimental de generación termoeléctrica es aprovechada por radiación y por conducción de la temperatura superficial del colector de escape de la parte superior, aprovechando el 31,11 % aproximadamente la temperatura residual en estado estacionario se muestra en la siguiente gráfica.

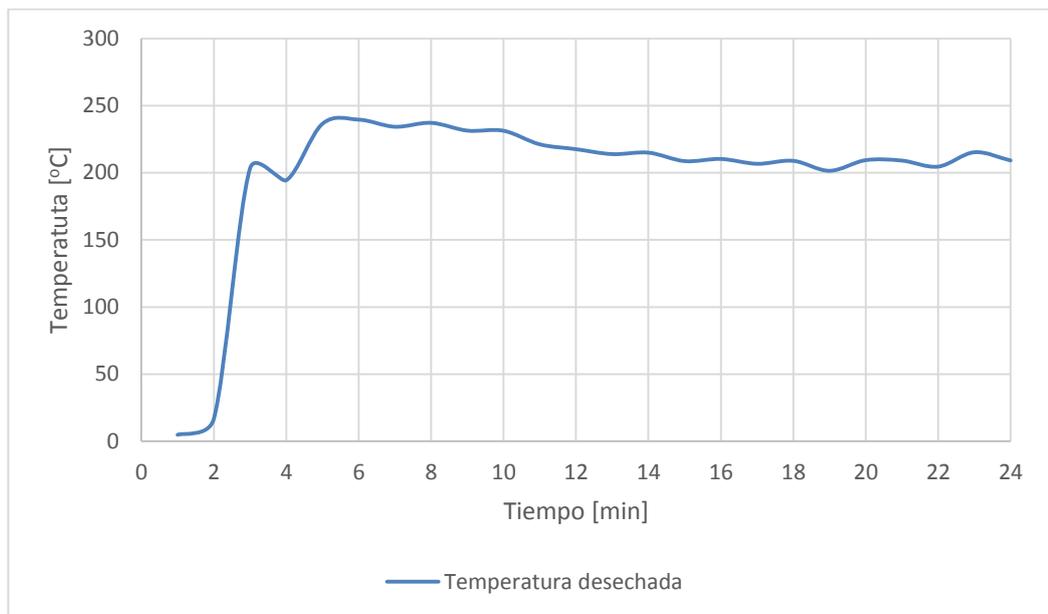


Grafico 70: Temperatura residual del proceso de generación.

Fuente: Los Autores.

4.4 Análisis en estado estático del modelo experimental de generación termoeléctrica.

Este análisis se realiza con convección natural con unas revoluciones aproximadas de 850 – 800 rpm.

4.4.1 Calentamiento del MCI G10.

En estado estacionario del motor MCI G10, en este caso desde que se enciende hasta que alcanza la temperatura de funcionamiento es crítico, debido a que la convección natural a la que está expuesto el disipador de calor, no es la suficiente para generar un voltaje utilizable.

En el gráfico de calentamiento se muestra un estado donde los sensores de temperatura marcan 20°C aproximadamente, enseguida en el arranque (segundo 50) la temperatura del lado caliente empieza a aumentar linealmente, mientras tanto que del lado frío se mantiene por acción del disipador, la temperatura ambiente o circundante al disipador se incrementa en aproximadamente 6°C manteniéndose esta temperatura, esto se debe a que la temperatura radiante de todo el motor no se disipa al exterior con facilidad.

El voltaje generado alcanza 0,9 V, manteniéndose estable durante unos minutos, luego este empieza a decaer debido a que la temperatura circundante al disipador aumenta drásticamente imposibilitando cumplir con su función y consigo aumenta la temperatura del lado frío. El voltaje generado no es significativo llegando a ser de 0,6 Voltios.

La eficiencia se tomó como si fuese una bomba de calor aproximándose a la eficiencia de Carnot (ecuación 2.5).

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h}$$

La eficiencia en esta es de $n = 0,6$ tomando las temperaturas máximas.

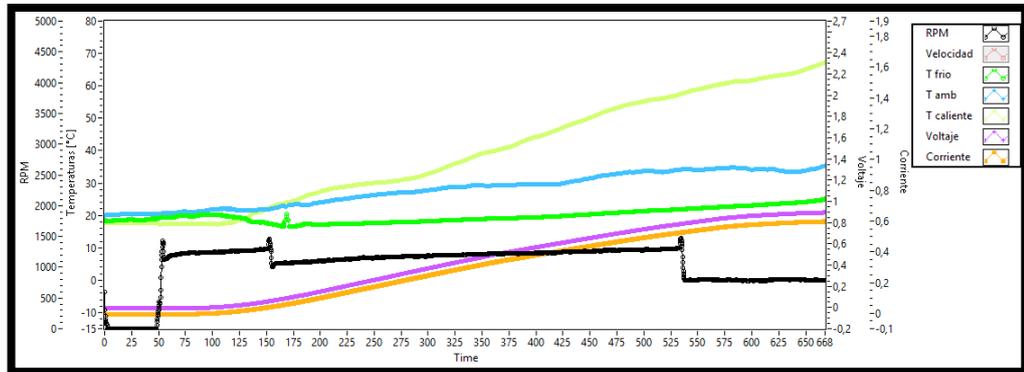


Grafico 71: Sensores de temperatura, voltaje, corriente y RPM del MCI G10, en calentamiento.

Fuente: Los Autores.

4.4.2 Enfriamiento del MCI G10.

Una vez apagado el MCI G10, los primeros 15 min se tiene un voltaje entre 0,5 y 0,65 Voltios aproximadamente, el enfriamiento total esta aproximadamente en 2h y 30 min, pasado la primera hora se tiene un voltaje de 0,1 V.

Esta energía recuperada es insuficiente para una aplicación donde se requiera gran cantidad de energía.

Este voltaje generado se debe a la deficiencia del enfriamiento que dando una eficiencia de $n = 0,2$.

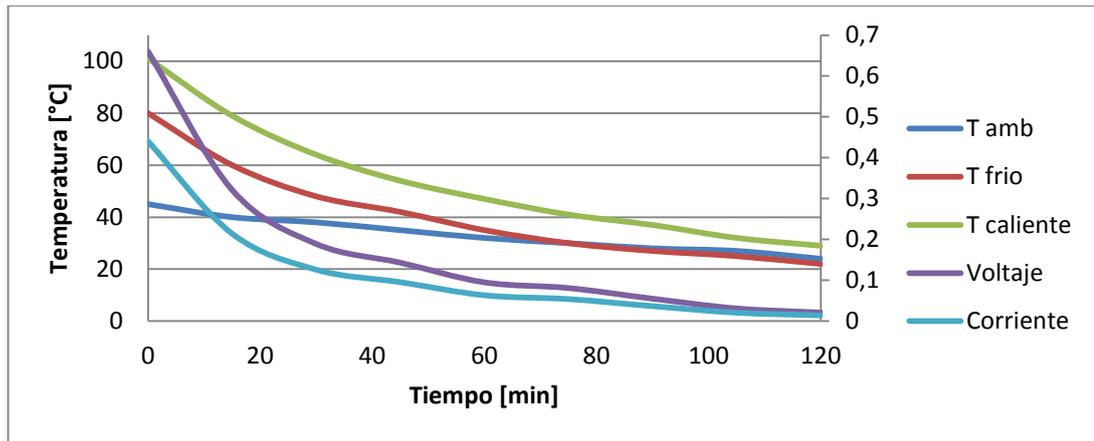


Grafico 72: Sensores de temperatura, voltaje del modelo experimental, en enfriamiento.

Fuente: Los Autores.

4.5 Análisis de la influencia de la velocidad en el lado frio y de las RPM en el lado caliente del modelo experimental de generación termoeléctrica.

Una vez el vehículo en movimiento el disipador de calor pasa de convección natural a convección forzada y esta es proporcional con respecto a la velocidad el análisis se la realiza en las diferentes pruebas que se realizaron.

4.5.1 Análisis en tránsito en ciudad o urbano.

En la gráfica las selecciones de color azul son cuando el vehículo se encuentra estacionado con una velocidad de 0km/h y 800 rpm aproximados del motor G10, en esos instantes la temperatura del lado frio aumenta, esta aumenta considerablemente cuanto más tiempo se está estacionado ya que la temperatura del colector de escape lado caliente trata de igualarse con el lado frio por el flujo de calor, también porque en este no existe convección forzada generada por la velocidad del vehículo.

Por otro lado las selecciones de color naranja se aprecia que el lado frio disminuye a partir de una velocidad de 25Km/h donde se tiene convección forzada en el disipador de calor mediante el tubo colocado al mismo.

El lado caliente se ve influenciado por las rpm al estar el vehículo en reposo y en movimiento a partir de las 2000 rpm como se aprecia en el gráfico 73.

También existe una diferencia entre la temperatura del lado frío con el medio circundante del dissipador de calor, esto se debe a que la velocidad con la que circula no es la suficiente para refrigerar el calor del dissipador descendiendo la temperatura hasta 42°C.

El voltaje desarrollado por el módulo Peltier CP58438 con la configuración del modelo experimental de generación termoeléctrica, en esta prueba es de 1,75 a 1,86 voltios con un gradiente de temperatura de 35 a 47°C respectivamente, este voltaje oscila entre esos valores debido a la fluctuación del gradiente de temperatura que es influenciada por el lado frío del módulo y este por la velocidad principalmente.

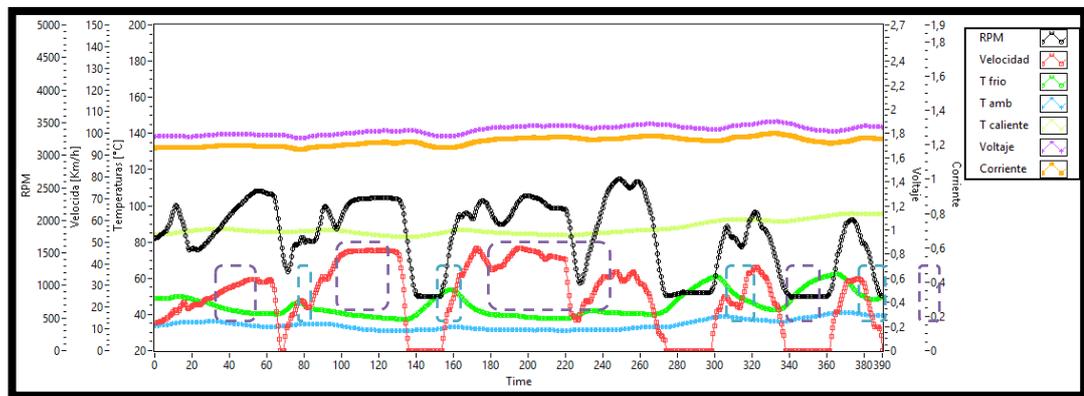


Gráfico 73: Señales de la prueba en ciudad o urbana.

Fuente: Los Autores.

La potencia generada con estas condiciones de conducción es aproximadamente de 2.2 W, el gradiente de temperatura ($T_h - T_c$) es fluctuante debido al tipo de manejo pero no afecta de manera significativa a la potencia generada como se observa en el gráfico siguiente.

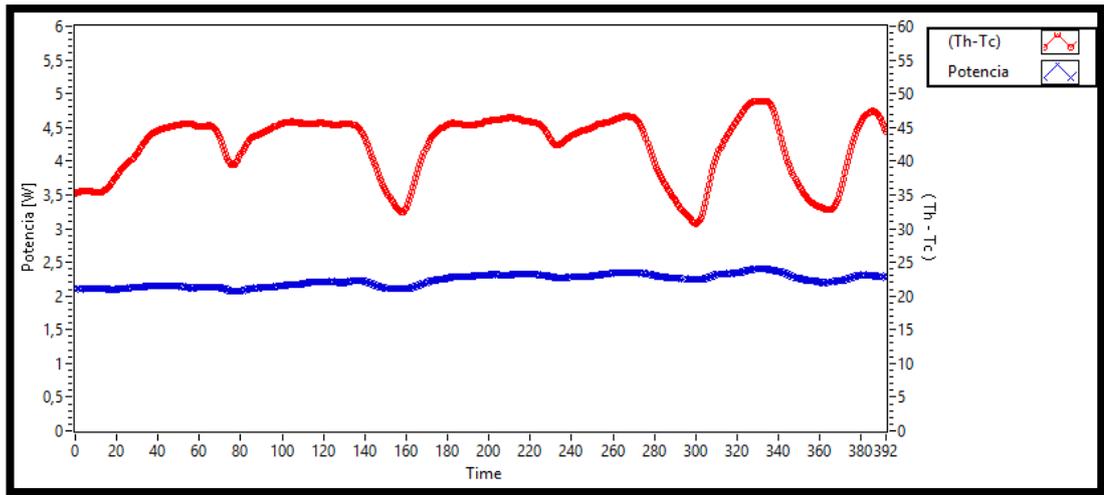


Gráfico 74: Potencia y ΔT en ciudad o urbana.

Fuente: Los Autores.

En la siguiente grafica se muestra la eficiencia generada en el trayecto de la prueba teniendo valores entre 35% y 55%.

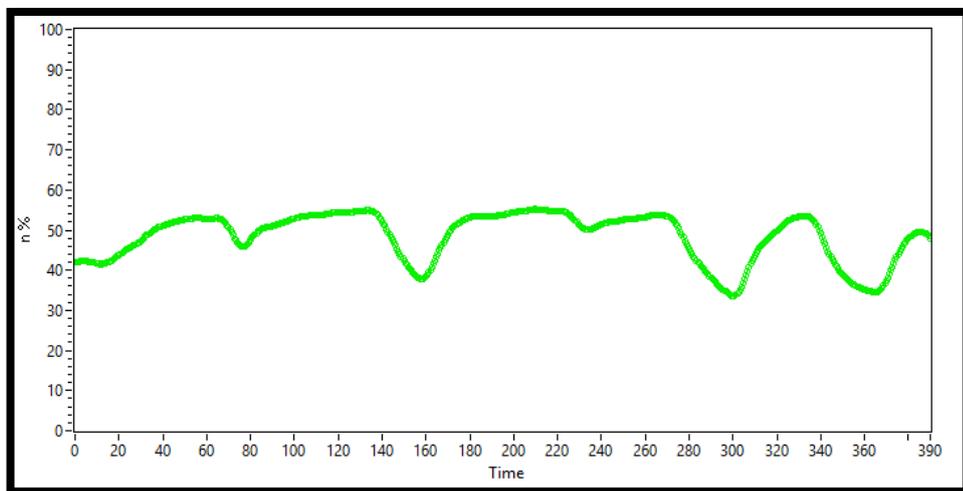


Gráfico 75: Eficiencia de tránsito en ciudad o urbana.

Fuente: Los Autores.

4.5.2 Análisis tránsito en carretera.

En el Grafico 76 se describe una conducción a plena carga, superando una pendiente de 30° aproximadamente con una velocidad promedio de 60Km/h y 3000rpm, con estos parámetros el voltaje se estabilizo en 2,55V de promedio en un tiempo de 10 a 11min de conducción, la temperatura del lado frio, fluctúa entre 19,5 y 20°C manteniéndose aproximadamente constante debido a la velocidad.

El lado caliente se incrementa de forma lineal, estabilizándose en 78°C debido a que se mantiene las revoluciones por minuto del motor G10 fluctuando entre 2800 y 3100 rpm, el voltaje generado no presenta rizados excesivos debido a que el gradiente de temperatura en toda la prueba tanto del lado caliente como del lado frio del módulo no fluctúa entre valores extremos.

Se puede observar que superado los 35Km/h la convección en el disipador es óptima igualándose la temperatura del lado frio con circundante del mismo durante toda la trayectoria de prueba.

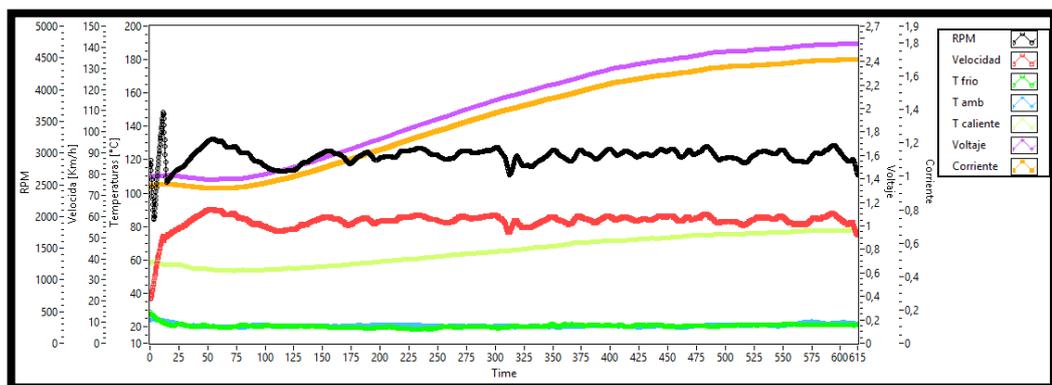


Grafico 76: Señales de la prueba en carretera plena carga.

Fuente: Los Autores.

La máxima potencia generada por un módulo es de 4,3 W aproximadamente, en este tipo de prueba también se tiene que para generar la misma, se necesita un gradiente de temperatura de 57°C.

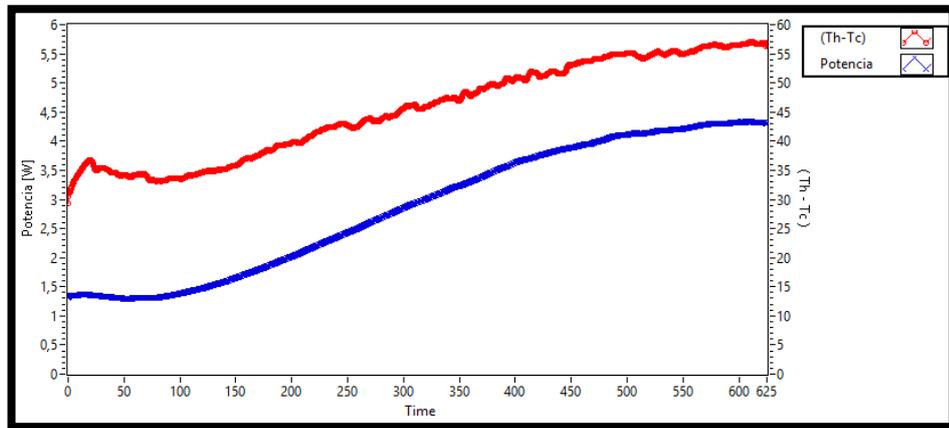


Gráfico 77: Potencia y ΔT en carretera plena carga.

Fuente: Los Autores.

La eficiencia para esta prueba se tiene como máximo 71% se puede apreciar en el Gráfico 78.

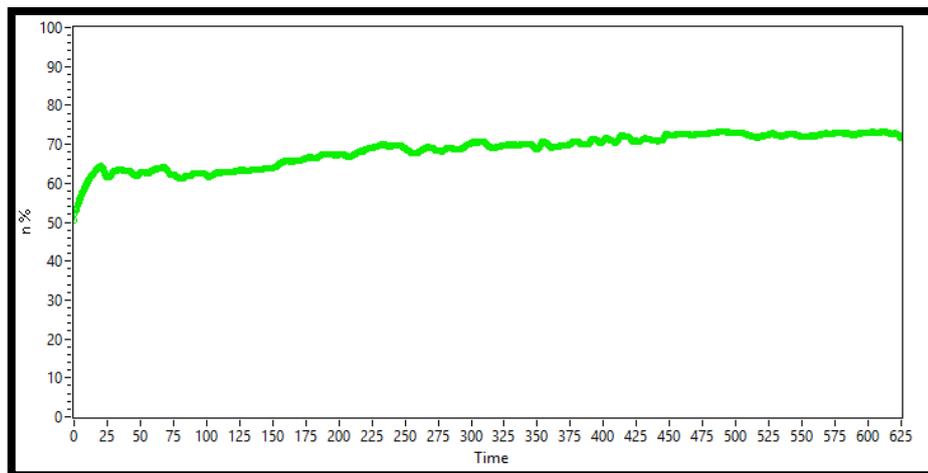


Gráfico 78: Eficiencia de tránsito en carretera plena carga.

Fuente: Los Autores.

4.5.3 Análisis en tránsito en autopista.

En esta prueba se alcanzaron valores de velocidad entre 85 a 90Km/h y con un promedio de 3200 rpm del motor G10, tomando en cuenta este tipo de conducción y los parámetros antes descritos en el capítulo anterior al medir las señales, se obtuvo un voltaje de aproximadamente de 2,05 voltios como máximo.

En este caso el voltaje se mantiene aproximadamente constante durante toda la prueba debido a la de temperatura del lado caliente que se encuentra en 67°C y del lado frío en 22°C, dando un gradiente de temperatura aproximado de 45°C.

De la gráfica, la temperatura del lado frío ha disminuido por debajo de la temperatura circundante al disipador de calor, esto se debe a la gran velocidad con que se circula, pero también esta afecta a todo el modelo experimental de generación eléctrica, al tener un bajo gradiente de temperatura.

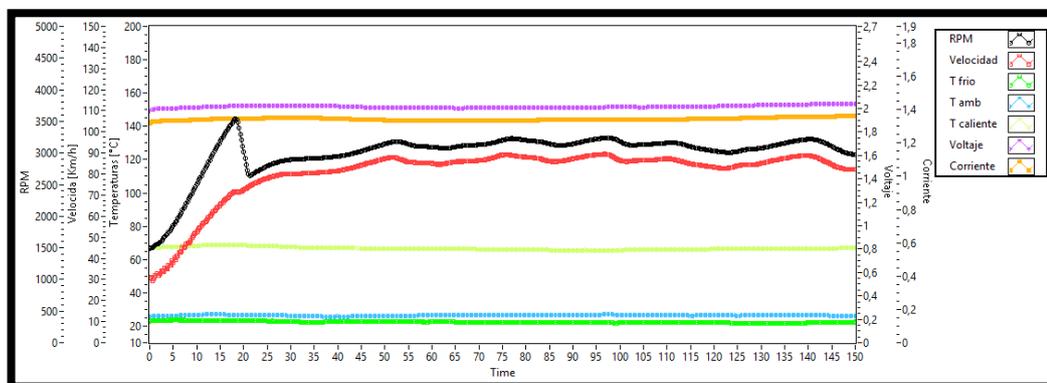


Gráfico 79: Señales de la prueba en autopista.

Fuente: Los Autores.

La potencia generada de un módulo es de 2,55 W con un gradiente de temperatura de 45°C para estas condiciones de conducción.

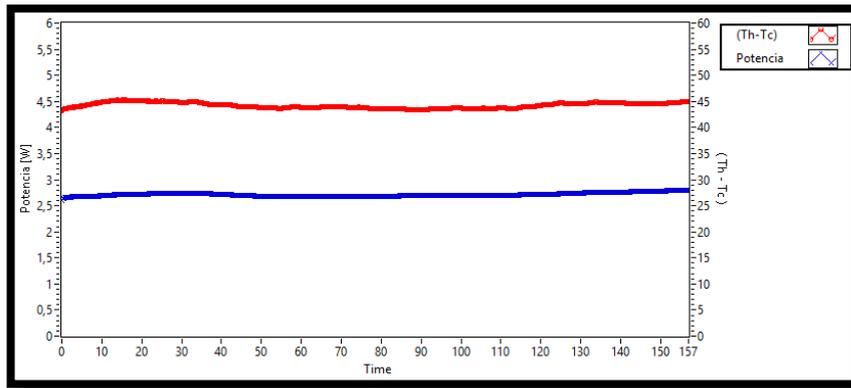


Gráfico 80: Potencia y ΔT en autopista.

Fuente: Los Autores.

La eficiencia conseguida en las pruebas en autopista es de aproximadamente de 65% como promedio, todo esto se muestra en el Gráfico 81.

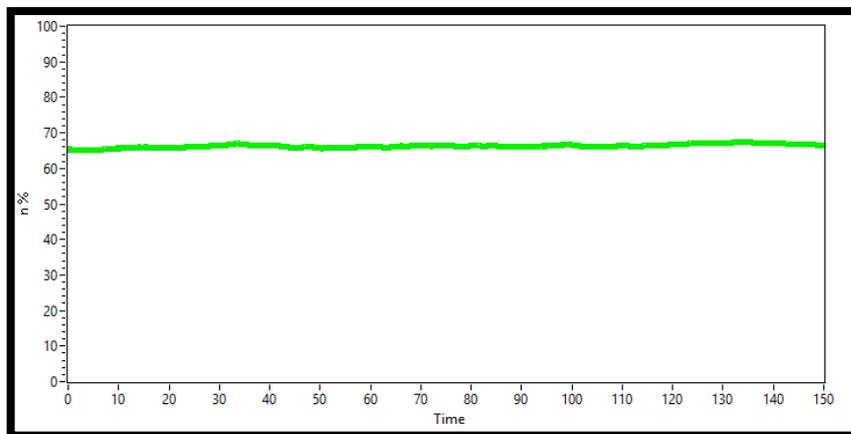


Gráfico 81: Eficiencia de la prueba en autopista.

Fuente: Los Autores.

4.6 Revisión de resultados de la experimentación.

Con el análisis de ANOVA de un factor utilizando el software SPSS (statistical Package for the Social Sciences), se comparara varias muestras en una variable cuantitativa, para la comparación se han tomado siete muestras en dos casos (Autopista, Carretera) y ocho muestras para el caso de circulación en ciudad, de esta

forma se podrá determinar la homogeneidad de las muestras y aceptaríamos la normalidad de las mismas.

Si las medias de las diferentes medidas son diferentes el valor F será mayor, mientras que si las medias son iguales en las diferentes medidas el valor F será menor lo cual representara la aceptación de la hipótesis nula, es decir las poblaciones muestreadas son normales, el estadístico F se distribuye según el modelo de Fisher (los grados de libertad del numerador son el número de muestras menos uno en nuestro caso 7-1 (8-1); los del denominador, el número total de observaciones menos uno multiplicado para el numero de muestras).

4.7 Validación de datos.

Para la validación de los datos se escoge un nivel de precisión del 0.05 de esta forma se calcula el número de muestras que se necesitaran, para la validación se escogió 7 muestras de las 11 muestras obtenidas en la experimentación, se lo redujo a 7 muestras por el método de medidas de dispersión (medidas de variabilidad de una distribución) lo cual nos brinda un valor de variabilidad menor, esto nos dice que es homogénea nuestra media. Así se sabe que todos los casos son parecidos y no varían mucho entre ellos, con este método se verifico que se puede utilizar 7 muestras.

Para el tamaño de las muestras se escoge un error que se prevé cometer del 10%, para nuestro tamaño de la muestra se receptara 40 datos que sería el 50% del calculado, de esta forma reducimos el tiempo y los costos de la investigación, agiliza el proceso de esta y se obtiene resultados significativos para nuestro estudio.

4.7.1 Validación de datos en ciudad.

Tabla 20: Descriptivos de las muestras para ciudad.

Fuente: Los Autores.

Descriptivos

Voltaje

| | N | Media | Desviación típica | Error típico | Intervalo de confianza para la media al 95% | | Mínimo | Máximo |
|----------|-----|----------|-------------------|--------------|---|-----------------|--------|--------|
| | | | | | Límite inferior | Límite superior | | |
| Prueba 1 | 40 | 1,806381 | ,0045656 | ,0007219 | 1,804921 | 1,807841 | 1,7997 | 1,8112 |
| Prueba 2 | 40 | 1,806265 | ,0055408 | ,0008761 | 1,804493 | 1,808037 | 1,7880 | 1,8119 |
| Prueba 3 | 40 | 1,806468 | ,0056293 | ,0008901 | 1,804667 | 1,808268 | 1,7900 | 1,8118 |
| Prueba 4 | 40 | 1,806274 | ,0054184 | ,0008567 | 1,804541 | 1,808007 | 1,7920 | 1,8119 |
| Prueba 5 | 40 | 1,806615 | ,0047525 | ,0007514 | 1,805095 | 1,808135 | 1,7967 | 1,8115 |
| Prueba 6 | 40 | 1,807829 | ,0045085 | ,0007129 | 1,806387 | 1,809271 | 1,7991 | 1,8155 |
| Prueba 7 | 40 | 1,807167 | ,0048677 | ,0007696 | 1,805611 | 1,808724 | 1,7978 | 1,8132 |
| Total | 280 | 1,806714 | ,0050339 | ,0003008 | 1,806122 | 1,807306 | 1,7880 | 1,8155 |

Tabla 21: Prueba de homogeneidad de varianzas para ciudad.

Fuente: Los Autores.

Prueba de homogeneidad de varianzas

Voltaje

| Estadístico de Levene | gl1 | gl2 | Sig. |
|-----------------------|-----|-----|------|
| ,844 | 6 | 273 | ,537 |

Aceptamos la igualdad de varianzas ya que el (sig.) es mayor a 0.05.

Tabla 22: ANOVA de un factor para ciudad.

Fuente: Los Autores.

Voltaje

| | Suma de cuadrados | Gl | Media cuadrática | F | Sig. |
|--------------|-------------------|-----|------------------|------|------|
| Inter-grupos | ,000 | 6 | ,000 | ,527 | ,787 |
| Intra-grupos | ,007 | 273 | ,000 | | |
| Total | ,007 | 279 | | | |

Se aprecia que la significancia es mayor a 0.05 entonces se acepta la igualdad de medias, no existen diferencias significativas entre los grupos.

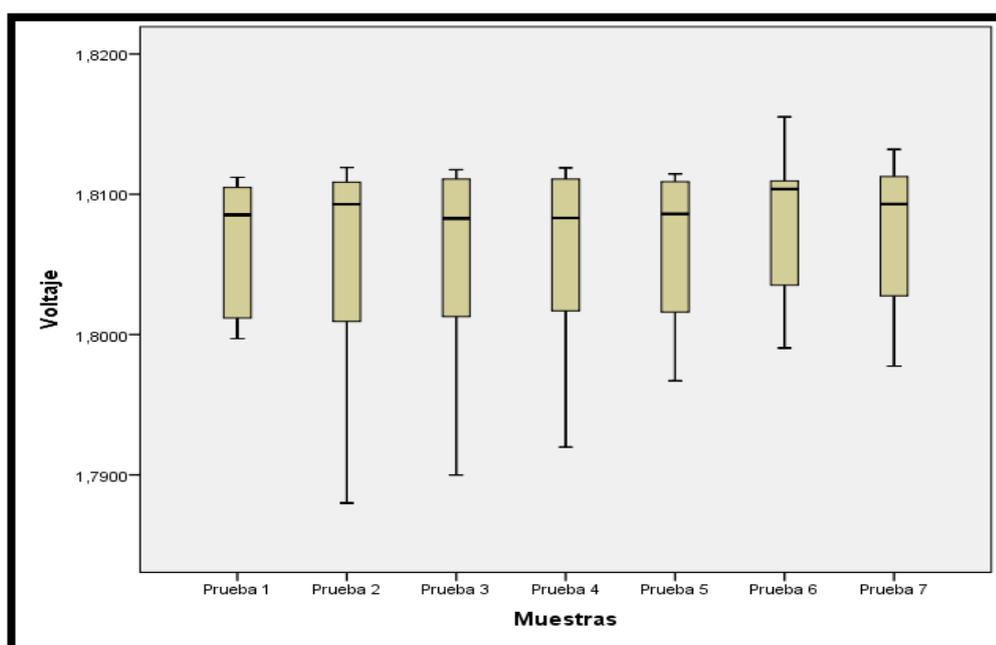


Grafico 82: Diagrama de cajas para las muestras estudiadas en autopista.

Fuente: Los Autores.

En el diagrama de cajas se puede apreciar la distribución de las medias de cada muestra, para la prueba de hipótesis de Fisher se aprecia que el Fisher de prueba es menor al Fisher de tabla (2.131) por ende se acepta la hipótesis nula lo cual nos

indica que todas nuestras muestras son reales los cuales no presentan mucha diferencia entre ellas.

4.7.2 Validación de datos en carretera.

Tabla 23: Descriptivos de las muestras para carretera

Fuente: Los Autores.

Descriptivos

Voltaje

| | N | Media | Desviación típica | Error típico | Intervalo de confianza para la media al 95% | | Mínimo | Máximo |
|----------|-----|-----------|-------------------|--------------|---|-----------------|---------|---------|
| | | | | | Límite inferior | Límite superior | | |
| Prueba 1 | 40 | 2,5060818 | ,00334758 | ,00052930 | 2,5050111 | 2,5071524 | 2,50010 | 2,51107 |
| Prueba 2 | 40 | 2,5060195 | ,00339985 | ,00053756 | 2,5049322 | 2,5071068 | 2,50015 | 2,51137 |
| Prueba 3 | 40 | 2,5060837 | ,00335521 | ,00053050 | 2,5050107 | 2,5071568 | 2,50040 | 2,51108 |
| Prueba 4 | 40 | 2,5053135 | ,00362305 | ,00057285 | 2,5041548 | 2,5064722 | 2,50005 | 2,51168 |
| Prueba 5 | 40 | 2,5069985 | ,00418108 | ,00066109 | 2,5056613 | 2,5083357 | 2,50014 | 2,51374 |
| Prueba 6 | 40 | 2,5060665 | ,00340183 | ,00053788 | 2,5049785 | 2,5071545 | 2,50002 | 2,51149 |
| Prueba 7 | 40 | 2,5060868 | ,00337687 | ,00053393 | 2,5050068 | 2,5071667 | 2,50000 | 2,51103 |
| Total | 280 | 2,5060929 | ,00352869 | ,00021088 | 2,5056778 | 2,5065080 | 2,50000 | 2,51374 |

Tabla 24: Prueba de homogeneidad de varianzas para carretera.

Fuente: Los Autores.

Prueba de homogeneidad de varianzas

Voltaje

| Estadístico de | gl1 | gl2 | Sig. |
|----------------|-----|-----|------|
| Levene | | | |
| ,960 | 6 | 273 | ,453 |

Aceptamos la igualdad de varianzas ya que el (sig.) es mayor a 0.05.

Tabla 25: ANOVA de un factor para carretera.

Fuente: Los Autores.

ANOVA de un factor

Voltaje

| | Suma de cuadrados | Gl | Media cuadrática | F | Sig. |
|--------------|-------------------|-----|------------------|------|------|
| Inter-grupos | ,000 | 6 | ,000 | ,764 | ,599 |
| Intra-grupos | ,003 | 273 | ,000 | | |
| Total | ,003 | 279 | | | |

Se aprecia que la significancia es mayor a 0.05 entonces se acepta la igualdad de medias, no existen diferencias significativas entre los grupos.

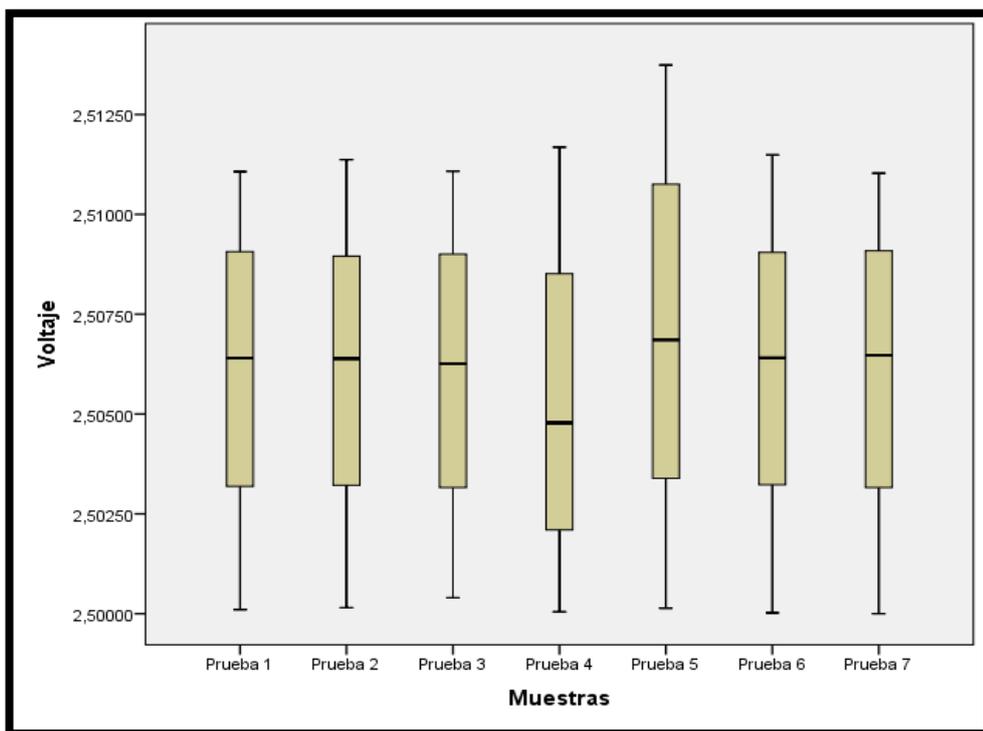


Grafico 83: Diagrama de cajas para las muestras estudiadas en autopista.

Fuente: Los Autores.

En el diagrama de cajas se puede apreciar la distribución de las medias de cada muestra, para la prueba de hipótesis de Fisher se aprecia que el Fisher de prueba es menor al Fisher de tabla (2.131) por ende se acepta la hipótesis nula lo cual nos

indica que todas nuestras muestras son reales los cuales no presentan mucha diferencia entre ellas.

4.7.3 Validación de datos en Autopista.

Tabla 26: Descriptivos de las muestras para Autopista

Fuente: Los Autores.

Descriptivos

Voltaje

| | N | Media | Desviación típica | Error típico | Intervalo de confianza para la media al 95% | | Mínimo | Máximo |
|----------|-----|----------|-------------------|--------------|---|-----------------|--------|--------|
| | | | | | Límite inferior | Límite superior | | |
| Prueba 1 | 40 | 2,109698 | ,0031680 | ,0005009 | 2,108685 | 2,110711 | 2,1030 | 2,1124 |
| Prueba 2 | 40 | 2,109749 | ,0030425 | ,0004811 | 2,108776 | 2,110722 | 2,1029 | 2,1124 |
| Prueba 3 | 40 | 2,109445 | ,0032753 | ,0005179 | 2,108398 | 2,110492 | 2,1015 | 2,1124 |
| Prueba 4 | 40 | 2,109381 | ,0033801 | ,0005344 | 2,108299 | 2,110462 | 2,1011 | 2,1124 |
| Prueba 5 | 40 | 2,109648 | ,0031532 | ,0004986 | 2,108639 | 2,110656 | 2,1025 | 2,1124 |
| Prueba 6 | 40 | 2,109602 | ,0032194 | ,0005090 | 2,108572 | 2,110631 | 2,1025 | 2,1124 |
| Prueba 7 | 40 | 2,109636 | ,0031708 | ,0005014 | 2,108622 | 2,110650 | 2,1022 | 2,1124 |
| Total | 280 | 2,109594 | ,0031706 | ,0001895 | 2,109221 | 2,109967 | 2,1011 | 2,1124 |

Tabla 27: Prueba de homogeneidad de varianzas para Autopista.

Fuente: Los Autores.

Prueba de homogeneidad de varianzas

Voltaje

| Estadístico de | gl1 | gl2 | Sig. |
|----------------|-----|-----|------|
| Levene | | | |
| ,114 | 6 | 273 | ,995 |

La tabla que contiene el estadístico de Levene nos permite contrastar la hipótesis de igualdad de varianzas poblacionales. Si el nivel crítico (sig.) es menor o igual que 0.05, debemos rechazar la hipótesis de igualdad de varianzas. Si es mayor, aceptamos la hipótesis de igualdad de varianzas, en nuestro caso es mayor a 0.05 entonces aceptamos la igualdad de varianzas.

Tabla 28: ANOVA de un factor para Autopista.

Fuente: Los Autores.

ANOVA de un factor

Voltaje

| | Suma de cuadrados | Gl | Media cuadrática | F | Sig. |
|--------------|-------------------|-----|------------------|------|------|
| Inter-grupos | ,000 | 6 | ,000 | ,070 | ,999 |
| Intra-grupos | ,003 | 273 | ,000 | | |
| Total | ,003 | 279 | | | |

El siguiente paso nos lleva a la tabla de ANOVA, que nos ofrece el estadístico F con su nivel de significación. Si el nivel de significación (sig.) intra clases menor o igual que 0,05, rechazamos la hipótesis de igualdad de medias, si es mayor – aceptamos la igualdad de medias, es decir, no existen diferencias significativas entre los grupos.

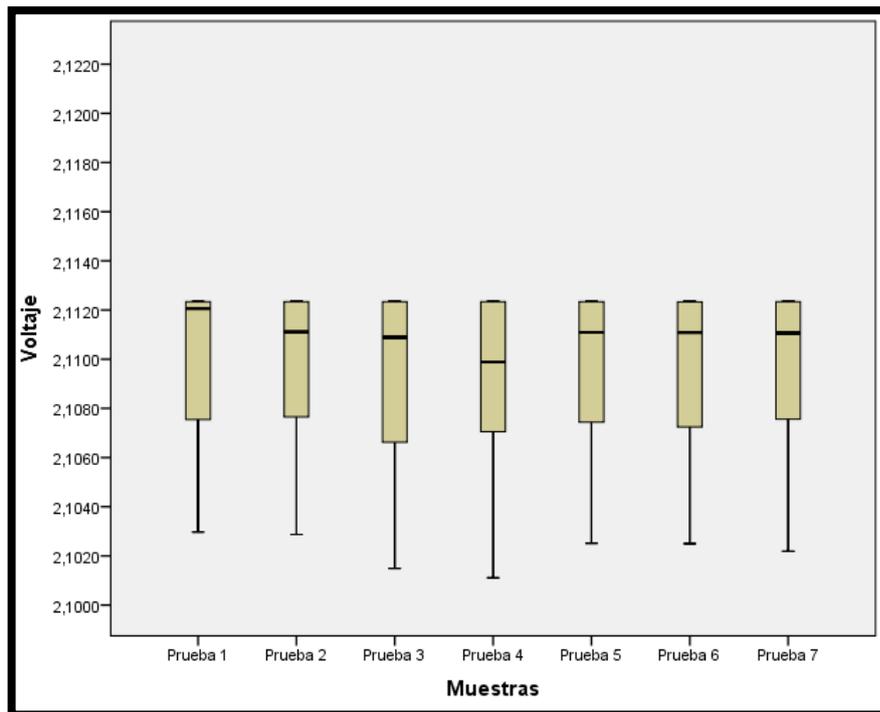


Grafico 84: Diagrama de cajas para las muestras estudiadas en autopista.

Fuente: Los Autores.

En el diagrama de cajas se puede apreciar la distribución de las medias de cada muestra, para la prueba de hipótesis de Fisher se aprecia que el Fisher de prueba es menor al Fisher de tabla (2.131) por ende se acepta la hipótesis nula lo cual nos indica que todas nuestras muestras son reales los cuales no presentan mucha diferencia entre ellas.

4.8 Posible montaje para aprovechar la temperatura superficial de la base.

Para aprovechar toda la temperatura superficial de la base del modelo experimental de generación termoeléctrica es necesario colocar 5 módulos tipo Peltier CP85438 y estos conectarlos en serie para tener un voltaje utilizable, en la siguiente grafica se muestra la disposición de los módulos y su conexión.

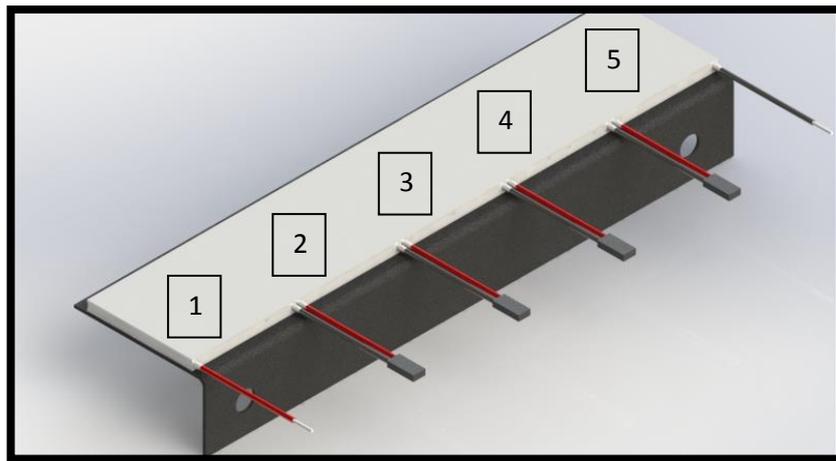


Grafico 85: Montaje de 5 módulos conectados en serie, en la base del modelo experimental.

Fuente: Los Autores.

La disipación será la misma utilizada en la experimentación, cambiara el disipador en su longitud a 20 cm su posible montaje se muestra a continuación en la siguiente gráfica.

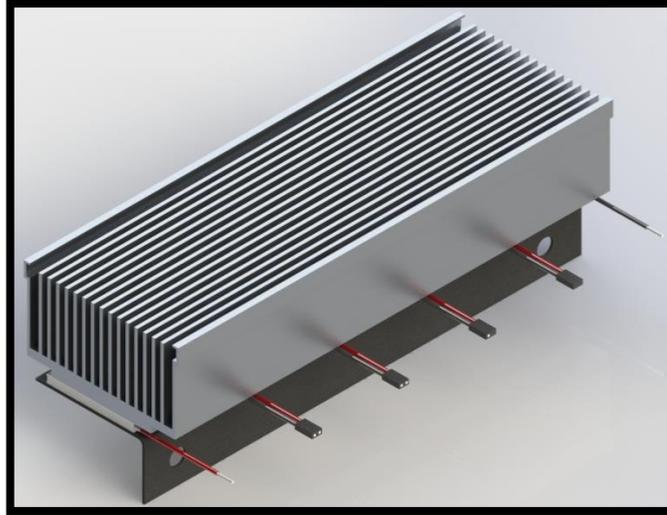


Grafico 86: Montaje de los módulos conectados en serie, con el disipador de calor.

Fuente: Los Autores.

4.8.1 Optimización de la refrigeración mediante toma de aire al disipador.

Para un posible montaje del modelo de generación de energía termoeléctrica con cinco módulos conectados en serie en el vehículo y para optimizar la convección forzada sobre el disipador de calor se puede colocar una toma de aire en el frente del vehículo y para la extracción del aire del mismo, una salida a un costado, que con la velocidad creara el efecto Venturi extrayendo el aire que entra en el disipador con una velocidad proporcional al del vehículo, un posible montaje y su flujo de aire se muestra en el siguiente gráfico.

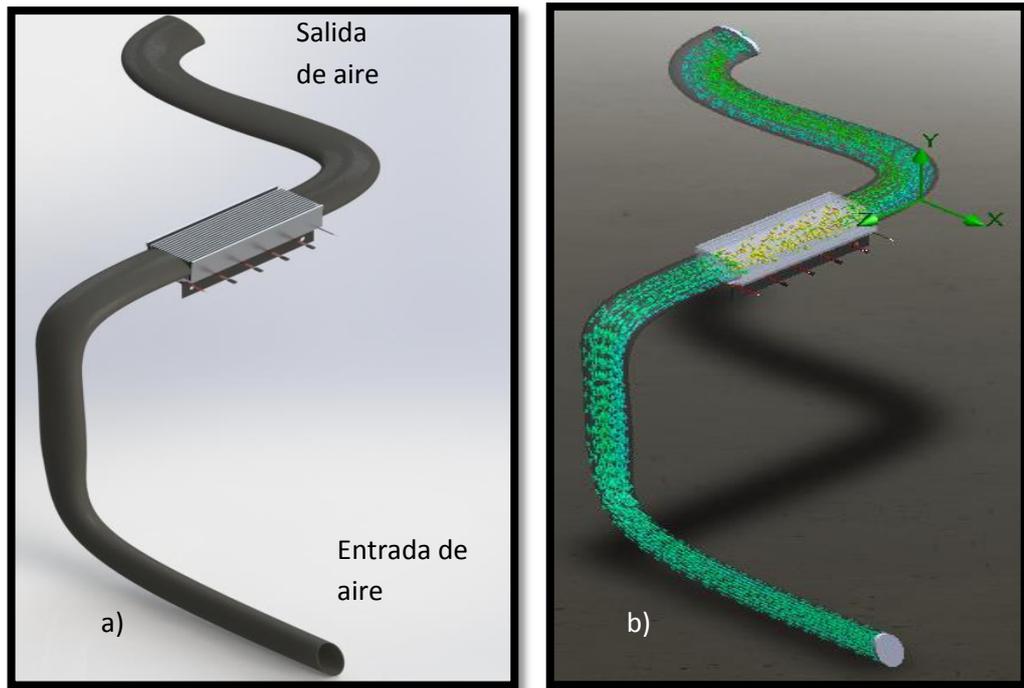


Gráfico 87: a) Montaje del modelo experimental, con entrada y salida de aire, b) Flujo de aire por el sistema de generación termoeléctrica.

Fuente: Los Autores.

4.8.2 Generación con el montaje final, en las diferentes situaciones.

Con el montaje propuesto con cinco módulos termoeléctricos Peltier se lograra un voltaje de generación donde se tiene lo siguiente:

- El voltaje máximo en el calentamiento es 4,5V, con un amperaje de 3A en vacío.
- El voltaje máximo en enfriamiento es 3V, con un amperaje de 2A en vacío.
- El voltaje máximo en ciudad es 9V, con un amperaje de 6A en vacío.
- El voltaje máximo en carretera plena carga es 12,8V, con un amperaje de 8,53A en vacío.
- El voltaje máximo en autopista es 10V, con un amperaje de 6,67A en vacío.

La eficiencia será la misma para todas las situaciones teniendo en cuenta que el lado caliente T_h es el de la base y T_c es el generado por el disipador siendo el mismo para los cinco módulos.

En el Grafico 88 se tiene el voltaje generado en ciudad, carretera plena carga y autopista respectivamente.

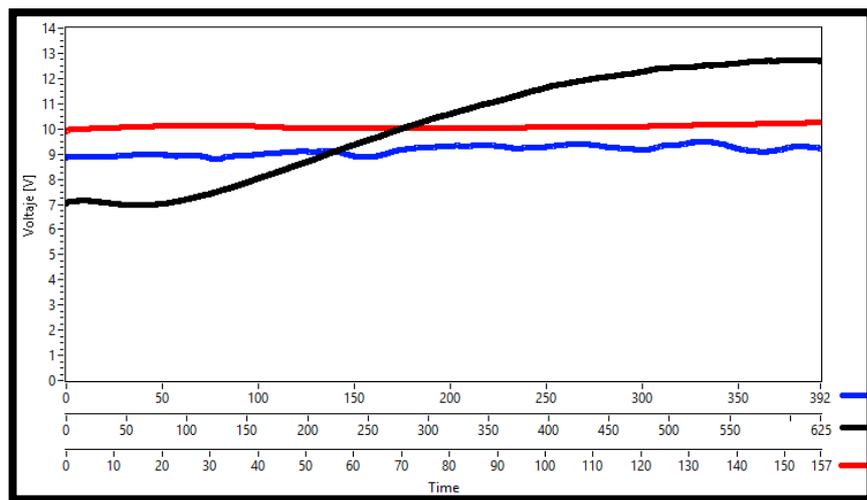


Grafico 88: Voltaje generado por cinco módulos.

Fuente: Los Autores.

Las respectivas potencias generadas se muestran en el Grafico 89cabe recalcar que tanto como los voltajes y potencias son tomadas con la resistencia interna del módulo es el generado en vacío.

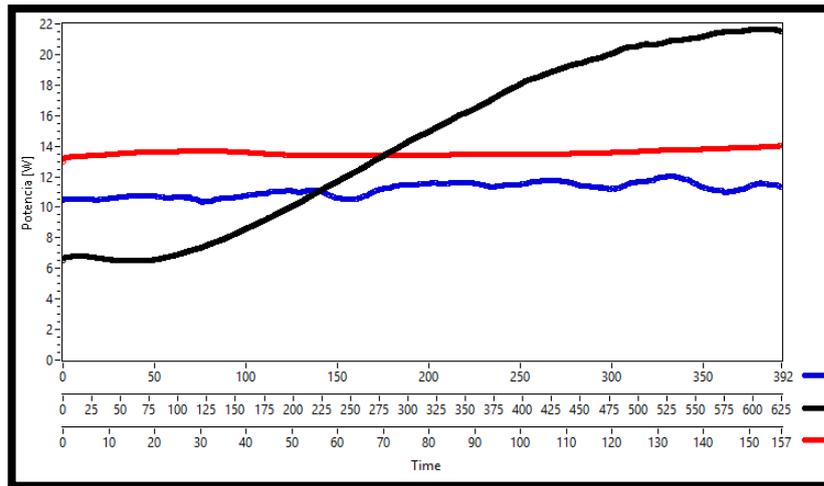


Grafico 89: Potencia generada por los cinco módulos.

Fuente: Los Autores.

CONCLUSIONES

Se utilizó un módulo termoelectrico tipo Peltier ya que estos módulos termoelectricos soportan temperaturas hasta 135°C , ya que previo a esto se realizó un estudio de las temperaturas que existen en el protector superior del colector de escape (base del modelo experimental), donde se obtuvo temperaturas críticas de hasta 115°C y temperaturas promedios hasta los 98°C con el vehículo en estado estacionario.

El punto más crítico para la obtención de una diferencia de temperatura óptimo entre la cara superior e inferior del módulo termoelectrico tipo Peltier, se presenta cuando el vehículo se encuentra en estado estacionario ya que solo existe convección natural.

La temperatura (T_h) es directamente proporcional a las revoluciones del motor ya que a mayores rpm la temperatura en el colector de escape sube, la temperatura fría (T_c) es inversamente proporcional a la velocidad del vehículo haciendo q la temperatura baje a mayor velocidad.

Se obtiene diferencias de temperaturas 44°C - 58°C con el vehículo en circulación lo cual hace que se genere un voltaje máximo de 2.56 V con un amperaje de 1.6 A , el calor existente en el colector de escape del motor G10 es transformado en energía eléctrica por medio de los módulos termoelectricos tipo Peltier, lo cual nos representa un beneficio ya que no consume energía del combustible, se aprovechar lo que me desperdicia en forma de calor al ambiente.

Al no poseer piezas móviles en este sistema de generación se garantiza una vida útil prolongada.

Para un posible diseño e implementación, donde se quiera alcanzar el mejor rendimiento que en nuestro caso es en circulación en carretera a plena carga se debe tomar el gradiente de temperatura alcanzada en este y mejorarla en las demás condiciones de conducción.

RECOMENDACIONES

Para seleccionar un módulo termoeléctrico se debe tomar en cuenta la construcción del módulo, ya que los módulos tipo Peltier solo soportan temperaturas hasta 135°C y no se puede aplicar temperaturas mayores ya que sus juntas pueden desoldarse y por ende se dañan, si se necesita módulos para aplicaciones donde se tienen mayores temperaturas se debe utilizar módulos termoeléctricos de generación ya que soportan temperaturas hasta 250°C - 300°C.

Para estabilizar la diferencia de temperatura, cuando el vehículo se encuentra en estado estacionario se utiliza un disipador de calor, se debe realizar un análisis del disipador de calor para garantizar el buen funcionamiento del módulo termoeléctrico.

Para garantizar una mayor diferencia de temperatura cuando el MCI G10 se encuentra funcionando en estado estacionario, se puede instalar un sistema de refrigeración al módulo termoeléctrico, de esta forma garantizar la estabilidad del gradiente de temperatura, cuando el vehículo se encuentra en circulación se recomienda tratar de disminuir la convección forzada que existe en el colector de escape del motor G10, de esta forma obtendremos mayor calor en el mismo y por ende subiría nuestra diferencia de temperatura en el módulo termoeléctrico, teniendo una óptima generación de energía eléctrica.

Tener cuidado al momento de montar el módulo termoeléctrico ya que se debe aplicar una fuerza especificada proporcionada por el fabricante, estos módulos son muy frágiles ya que son recubiertos por cerámica.

Para una implementación inmediata, puede ser colocado en vehículos pesados, y de transporte de pasajeros ya que estos se encuentran transitando en largos trayectos y en las condiciones de plena carga y velocidad en las que se desarrolló esta tesis,

también como motores diésel de 6 cilindros se tiene mayor área en el colector de escape para colocarlos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] GONZALES, Sergio., «Estudio y caracterización de aleaciones Zn-Sb para aplicaciones termoeléctricas,» Barcelona, 2010.
- [2] ZEMANSKY, Mark W., Calor y Temperatura, Sexta Edición ed., Mexico: McGraw-hill, 1985, pp. 464-474.
- [3] HERNANDEZ, Miguel., «Análisis de dispositivos termoeléctricos en el marco termodinámico de procesos irreversibles,» Mexico, 2010.
- [4] ROMERO, Carlos Alberto, «Contribución al conocimiento del comportamiento térmico y la gestión térmica de los motores de combustión interna alternativos,» Valencia, 2009.
- [5] CENGEL, Yunes. BOLES, Michael, Transferencia de calor y masa, Tercera edición ed., Mexico: McGraw-hill, 2007, pp. 18 - 29.
- [6] CHEN, M. ROSENDAHL, L. CONDRA, T. PEDERSEN, J., «Numerical Modeling of Thermoelectric Generators With Varing Material Propertiesina Circuit Simulator,» The American Journal of Physics, vol. 75, nº 9, pp. 815-820, 2007.
- [7] CHENG, Chin-Hsiang.HUANG, Shu-Yu. CHENG, Tsung-Chieh., «A three-dimensional theoretical model for predicting transient thermal behavior,» International Journal of Heat and Mass Transfer, nº 53, p. 11, 2010.
- [8] Testo, «Cámara termográfica,» Barcelona.
- [9] CAILLAT, T., FLEURIAL, J. P., BORSCHEVSKY, A., «Preparation and thermoelectric properties of semiconducting Zn₄Sb₃,» Journal of Phys, vol. 58, nº 7, pp. 1119-1125, 1997.
- [10] WOOD, C., «Materials for thermoelectric energy conversion,» Reports on Progress in Physics, vol. 51, nº 4, pp. 459-539., 1988.

- [11] BABA, T. [et al.], «Thermoelectric properties of polycrystalline Si_{1-x}Gex grown by die-casting vertical Bridgman growth technique. Materials Research Society Symposium Proceedings,» Materials and Technologies for Direct Thermal-to-Electric Energy Conversion, vol. 886, pp. 449-454., 2006.
- [12] OTAKE, M., «Pulse-current sintering and thermoelectric properties of gas-atomized silicon-germanium powders,» Original Research Article Solid State Ionics, vol. 172, pp. 523-526, 2004.
- [13] ABRIKOSOV, N. KH., BANKINA, V. F., «The phase diagram for the system Te-Bi,» Zhurnal Neorganicheskoi Khimii, vol. 3, pp. 659-67, 1958.
- [14] J. LORENZ, «Wikimedia,» 2008. [En línea]. Available: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:ThomasSeebeck.jpg>. [Último acceso: Enero 2014].
- [15] GENTAS, «<http://blogs.cas.suffolk.edu/>,» 2011. [En línea]. Available: <http://blogs.cas.suffolk.edu/gentas/author/gentas/>. [Último acceso: Enero 2014].
- [16] QUIBIK, «Wikipedia,» 2010. [En línea]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lord_Kelvin_photograph.jpg. [Último acceso: Enero 2014].
- [17] NECTALI, Alejandro., «Climatización mediante ventanas termoactivasbasadas en células Peltier,» Madrid, 2010.
- [18] J. BIEL, «unavarra.es,» 2009. [En línea]. Available: [http://www.unavarra.es/ets02/Introduccion%20a%20TE\(c\).htm](http://www.unavarra.es/ets02/Introduccion%20a%20TE(c).htm). [Último acceso: Febrero 2014].
- [19] INNOVECO, «innoveco,» [En línea]. Available: <http://www.innoveco.com.au/pdf/TEMcatalogue.pdf>. [Último acceso: Noviembre 2013].
- [20] EVERREDTRONICS, «everredtronics,» [En línea]. Available: <http://www.everredtronics.com/EN/TEM/thermoelectric.TEC1.html>. [Último

acceso: Diciembre 2013].

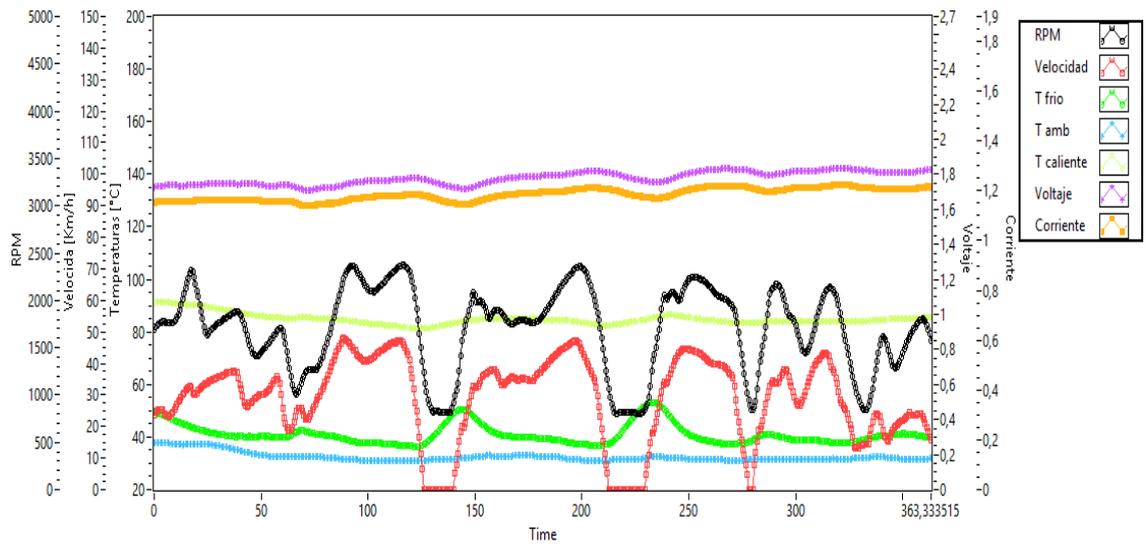
- [21] TELLUREX, «<http://tellurex.com/>,» [En línea]. Available: <http://tellurex.com/shop-products/>. [Último acceso: Marzo 2014].
- [22] ELECTRONIC, Components, «<http://www.alldatasheet.com/>,» [En línea]. Available: http://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Datasheet%20lm35dz&gclid=CjkKEQjw5qmdBRCn--70gPSo074BEiQAJCe7zZ-UO0sQHY5fmR1wegJVXaH-jW-QftyCpBytPqqv-hbw_wcB. [Último acceso: Enero 2014].
- [23] TELEFUNKEN, Vishay, «<http://www.alldatasheet.com/>,» [En línea]. Available: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/26332/VISHAY/CNY70.html>. [Último acceso: Marzo 2014].
- [24] LLORENTE, Domingo, «<http://www.iesluisdelucena.es/>,» [En línea]. Available: http://www.iesluisdelucena.es/dpp/docs/presentaciones/El_sensor_cny70_rev021210.pdf. [Último acceso: Enero 2014].
- [25] INSTRUMENT, National, «<http://sine.ni.com/>,» [En línea]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/207096>. [Último acceso: Abril 2014].
- [26] AGUILARr, Saraí, «<http://www.redalyc.org/>,» [En línea]. Available: <http://www.redalyc.org/pdf/487/48711206.pdf>. [Último acceso: Febrero 2014].
- [27] V-Infinity, «<http://www.cui.com/v-infinity>,» [En línea]. Available: <file:///C:/Users/SATELLITE/Downloads/CUI%20CP85438.pdf>. [Último acceso: Marzo 2014].
- [28] FISCHER, Elektronik, «<http://www.fischerelektronik.de/>,» [En línea]. Available: [http://www.fischerelektronik.de/web_fischer/en_GB/heatsinks/A09/Fin%20coolers/PR/KTE2_/\\$productCard/dimensionParameters/index.xhtml](http://www.fischerelektronik.de/web_fischer/en_GB/heatsinks/A09/Fin%20coolers/PR/KTE2_/$productCard/dimensionParameters/index.xhtml). [Último

acceso: Mayo 2014].

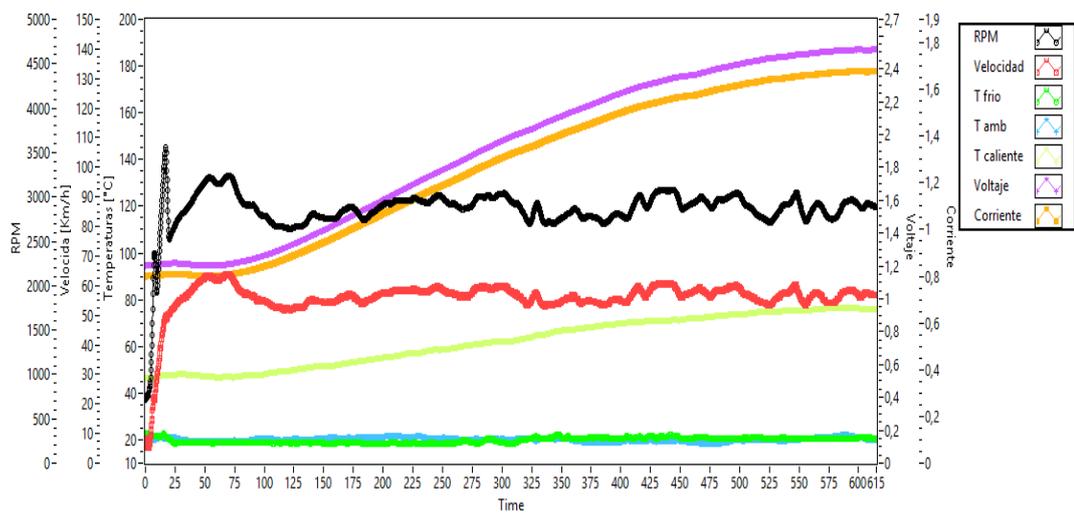
- [29] PAZ, Maria, «Confor Térmico en el área social de una vivienda unifamiliar en CUENCA-ECUADOR,» Cuenca, 2012.

ANEXOS

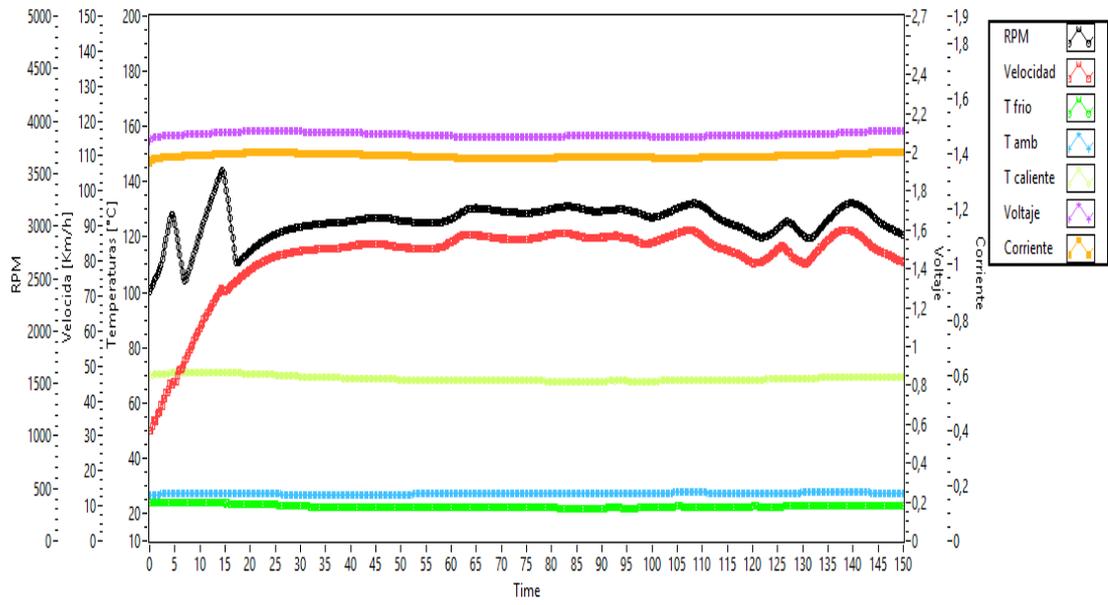
ANEXO 1 Muestra tomada en ciudad.



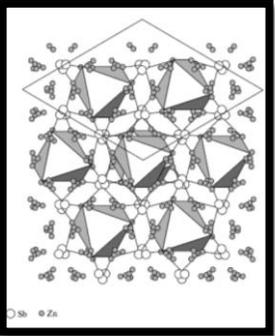
ANEXO 2 Muestra tomada en carretera.

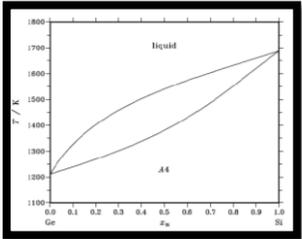


ANEXO 3 Muestra tomada en autopista.



MATERIALES DE LOS MÓDULOS TERMOELÉCTRICOS (ANEXO 4).

| Tipos de materiales. | Dopaje de los materiales. | Características de los materiales semiconductores. |
|--|--|---|
| <p style="text-align: center;">Antimonio – Zinc</p>  <p style="text-align: center;">Grafico 90: Estructura cristalina del compuesto β-Zn₄Sb₃ Fuente: [1]</p> | <p>Otro inconveniente es el hecho de no poder ser dopada como tipo n. Este último motivo es de especial importancia ya que obliga al empleo de otros tipos de compuestos para actuar como elementos de tipo n en el mismo dispositivo, obligando a emplear dos barreras diferentes de difusión del material de los contactos, etc [1].</p> | <p>Como se ha dicho anteriormente, la fase β del antimonuro de zinc (β-Zn₄Sb₃) es un semiconductor desordenado con propiedades termoeléctricas. Dicha fase es estable entre 260 y 765 K. A temperaturas inferiores a 260 K transforma a las fases α y α', ambas de mayor ordenación. Por encima de 765 K transforma a fase γ, y descompone en ZnSb y Zn a temperaturas ligeramente superiores [1].</p> <p>La fase β-Zn₄Sb₃ cristaliza en el grupo espacial romboédrico R3c (Grafico 29). El zinc ocupa los vértices de un octaedro, en cuyo interior se encuentran pares de átomos de antimonio enlazados entre sí. En el espacio entre octaedros se posicionan átomos de antimonio unidos a los átomos de zinc. Las posiciones del antimonio están totalmente ocupadas, mientras que sólo el 90 % de las posiciones correspondientes al zinc lo están [1].</p> <p>El factor de potencia del compuesto β-Zn₄Sb₃ es relativamente elevado, alcanzando valores de $1.35 \cdot 10^{-3} \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$. Los átomos de zinc desordenados de la fase β actúan como donantes. La ocupación parcial de las posiciones del zinc hace que el compuesto tenga deficiencia de electrones, con lo que su conductividad es de tipo p. Además, estos átomos crean una superficie de Fermi compleja, siendo esta la causa de su elevado coeficiente Seebeck [1].</p> <p>Los valores de ZT alcanzados para la fase β-Zn₄Sb₃ están alrededor de 1.4 a 675 K. Existen algunos inconvenientes a la hora de emplear la aleación β-Zn₄Sb₃ en la construcción de dispositivos. Uno de ellos es la controversia existente acerca de la estabilidad química de la fase.</p> |

| | | |
|---|--|--|
| | | <p>Estudios iniciales reportan estabilidad hasta elevadas temperaturas [9], mientras que artículos más recientes indican la descomposición de la fase β-Zn₄Sb₃ en Zn y ZnSb.</p> <p>Por el contrario, la relativa baja toxicidad y elevada disponibilidad de los materiales empleados, así como su contenido precio y facilidad de fabricación, junto al excelente comportamiento termoeléctrico, hacen del compuesto Zn₄Sb₃ un buen material para su estudio como material termoeléctrico para temperaturas intermedias [1].</p> |
| <p style="text-align: center;">Silicio – Germanio</p>  <p>Grafico 91: Diagrama de equilibrio Ge-Si Fuente: [1]</p> | <p>El dopaje de las aleaciones Si-Ge debe tener en cuenta las elevadas temperaturas de trabajo a las que se verán sometidas, así como evitar distorsionar la estructura cristalina de tipo diamante. Por este motivo, el dopaje de estas aleaciones tiene como única función la creación de materiales tipo p y tipo n y la optimización del factor de potencia [1].</p> | <p>Las aleaciones de silicio y germanio, formuladas como Si_xGe_{1-x}, representan una familia especial de materiales termoeléctricos por la importancia de su aplicación, se emplean en el campo espacial, concretamente en satélites con misiones de exploración en órbitas alejadas del sol. Su utilización a temperaturas moderadas resulta inviable por su bajo rendimiento, al tener su temperatura de máxima eficiencia alrededor de 1200 K, y su elevadísimo precio [1].</p> <p>Tanto el silicio como el germanio cristalizan con una estructura de tipo diamante. Sus enlaces son rígidos y su ordenamiento cristalino altamente simétrico, lo que unido a un peso atómico bajo o moderado da como resultado una conductividad térmica elevada, especialmente en el silicio (150 Wm⁻¹K⁻¹). El diagrama de equilibrio Si-Ge presenta un campo de solubilidad total de los dos elementos (Grafico 30), y se comprueba que ni la estructura cristalina ni la movilidad de los portadores de carga se ve afectada para ningún porcentaje de aleación, pero sí que disminuye de manera notable la conductividad térmica del material, cayendo a niveles de 5-10 Wm⁻¹K⁻¹ [10,11]. Como resultado de lo anterior podemos obtener aleaciones Si_xGe_{1-x} con valores de ZT cercanos a 0.9, como en el caso de la aleación Si_{0.3}Ge_{0.7} [12].</p> |

Telurio – Bismuto

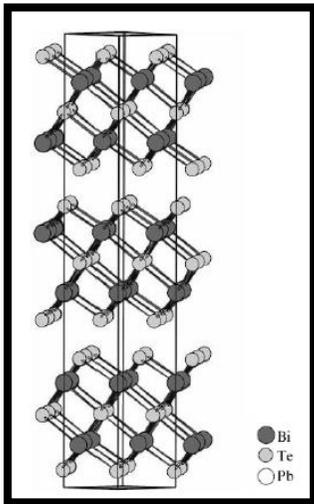


Grafico 92: Estructura cristalina del compuesto Bi_2Te_3 .

Fuente: [1]

El Bi_2Te_3 tiene un amplio rango composicional de estabilidad, lo cual permite obtener materiales de tipo p y tipo n en función del exceso de Bi o Te respectivamente, no altera de manera apreciable la conductividad térmica lo cual se mantiene en valores cercanos a $1.9 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ [13].

Unos de los primeros materiales desarrollados para su empleo en aplicaciones termoeléctricas fueron los telururos de bismuto y los telururos de plomo. Los telururos encajan a la perfección en las recomendaciones de Ioffe, ya que consisten en aleaciones de telurio (grupo VI A) con plomo (grupo IV A) o bismuto (grupo V A), todos ellos elementos de post-transición que forman compuestos semiconductores, con coeficientes de Seebeck elevados y, debido al elevado peso atómico de los tres elementos, con conductividades térmicas relativamente bajas [13].

El telururo de bismuto, de fórmula química Bi_2Te_3 , tiene estructura cristalina de tipo tetradimita ($\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$). En su forma natural se encuentra en el mineral telurobismutita, habitualmente asociado a trazas de selenio. Está formado por conjuntos de capas alternadas de bismuto y telurio siguiendo el eje c de la estructura romboédrica, formando bloques de cinco capas que a su vez se unen entre sí mediante enlaces de tipo Van der Waals (Grafico 31) [13].

El éxito del compuesto Bi_2Te_3 como material termoeléctrico se debe en gran medida a su baja conductividad térmica. Anteriormente se ha comentado que el elevado peso atómico de sus componentes, especialmente del bismuto, hacen que la conductividad térmica del Bi_3Te_2 sea baja. Cabe destacar que la conductividad térmica del Bi es la más baja de entre todos los metales ($7.87 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) con excepción del mercurio. Para acabar de justificar la baja conductividad térmica del Bi_2Te_3 debemos prestar atención a la estructura cristalina. La alternancia de enlaces covalentes y enlaces de Van der Waals supone un importante impedimento a la propagación de fonones, por lo que finalmente tendremos un material en el que la conducción térmica debida a la red se ve altamente impedida [13].