

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**“METODOLOGÍA DE APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA
RESIDUAL PARA GENERACIÓN DE CORRIENTE
ELÉCTRICA EN UN TRACTOCAMIÓN CLASE VIII”**

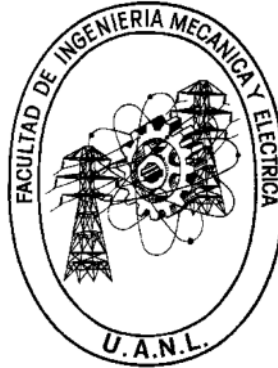
Por: ING. GUILLERMO CASTILLO CÓRDOVA

**EN OPCIÓN AL GRADO DE: MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
AUTOMOTRIZ**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

SEPTIEMBRE 2023

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**“METODOLOGÍA DE APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA
RESIDUAL PARA GENERACIÓN DE CORRIENTE
ELÉCTRICA EN UN TRACTOCAMIÓN CLASE VIII”**

Por: ING. GUILLERMO CASTILLO CÓRDOVA

**EN OPCIÓN AL GRADO DE: MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
AUTOMOTRIZ**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

SEPTIEMBRE 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Metodología de Aprovechamiento de Energía Residual para Generación de Corriente Eléctrica en un Tractocamión Clase VIII”, realizada por el estudiante Guillermo Castillo Córdova, con número de matrícula 2125686, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Oscar Jesús Zapata Hernández
Director

Dra. Adriana Salas Zamarripa
Co-director

Dr. Diego Francisco Ledezma Ramírez
Revisor

Dra. Flor Esthela Palomar Pérez
Revisor

M.A. Leopoldo Z. Flores Aguirre
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



Institución 190001

Programa 554502

Acta Núm. 4267

Ciudad Universitaria, a 6 de noviembre 2023.

DEDICATORIA

Principalmente quiero dedicar este logro a mi familia:

A mis padres, Guillermo Castillo Dávila y María Elizabeth Córdova López, por ser los pilares de mi formación, por el apoyo incondicional sin importar las barreras u obstáculos que se hayan presentado, y por siempre respaldarme en todo con su consejo, guía y fortaleza para avanzar, ya que todos estos logros son gracias a ustedes y a que he estado de pie sobre sus hombros, siendo ustedes mi mayor inspiración de superación.

A mi hermana Valeria Lizeth Castillo Córdova quien ha sabido aprender y desarrollarse mucho, y esto me ha ayudado bastante en ser resiliente, enfocado y responsable para lograr ser un buen ejemplo para ella.

A mi novia Galilea Itzel de la Cruz Márquez, quien incondicionalmente me ha brindado todo su apoyo, amor, cariño y comprensión para lograr esta meta, haciéndome sentir el más afortunado por tener en mi vida a alguien tan especial e increíble, quien me ha motivado e inspirado siempre a seguir adelante.

Los amo.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por el apoyo económico para poder desarrollar mis estudios de posgrado en esta maestría.

A los doctores docentes del posgrado quienes me han brindado sus conocimientos y cátedras para lograr desarrollar cada una de las materias como herramientas para el desarrollo de tesis.

Especialmente al Dr. Oscar de Jesús Zapata Hernández y la Dra. Adriana Salas Zamarripa por siempre estar atentos en la asesoría para el desarrollo de tesis y superar cualquier obstáculo que se presentara.

Y también a los Doctores Mario Alberto López Vega y Guillermo Gonzales Ibarra por el asesoramiento y apoyo para comenzar y desarrollar mis estudios de posgrado.

INDICE GENERAL

	Página
CAPÍTULO 1.....	15
INTRODUCCIÓN	15
1.1 Tractocamiones.....	15
1.1 Planteamiento del Problema.....	17
1.2 Justificación.....	18
1.3 Hipótesis.....	19
1.4 Objetivos.....	19
1.4.1 Objetivo general.....	19
1.4.2 Objetivos específicos	19
CAPÍTULO 2.....	20
MARCO TEÓRICO	20
2.1. Definición y conceptos importantes sobre la energía.....	20
2.1.1. Unidades.....	21
2.1.2. Potencia.....	21
2.1.3. Trabajo	22
2.1.4. Calor.....	22
2.2. Energías residuales	26
2.2.2 Térmica.....	31
2.2.3 Eólica	35
2.2.4 Solar	36
2.3. Antecedentes.....	37
2.3.1. Sistema por desarrollar.....	42
2.3.2. Termoelectricidad.	43
2.3.3. Efecto Seebeck	44

2.3.4.	Efecto Peltier.....	45
2.3.5.	Efecto Thompson	46
2.3.6.	Efecto Joule.....	47
2.3.7.	Dispositivos termoeléctricos	47
2.3.8.	Generadores termoeléctricos TEG	48
2.3.9.	Aplicaciones de generadores termoeléctricos TEG	49
2.4	Análisis de elemento finito FEM para simulación térmica.	55
CAPÍTULO 3.....		59
EXPERIMENTACIÓN		59
3.1.	Datos técnicos e información sobre el módulo TEM seleccionado.	59
3.2.	Datos técnicos del motor	60
3.3.	Diseños preliminares del sistema TEG.....	60
3.3.1.	Modelado de módulos TEM.	61
3.3.2.	Diseño del colector de calor y tubería para línea de escape.	62
3.3.3.	Diseño colector del refrigerante y tuberías internas.	65
3.3.4.	Ensamble de los componentes.	69
3.3.5.	Ejemplo del dispositivo del motor con el que es compatible el sistema TEG.	73
Análisis de elemento finito ANSYS.....		74
3.5.	Rediseño y optimización de componentes.	74
PARTE I.....		75
3.5.1.	Línea de escape y ensamble de tuberías internas del colector del refrigerante	75
3.5.2.	Colector de refrigerante	76
3.5.3.	Simulación de transferencia de calor en estado estable para sistema rediseñado I.....	77

3.5.4. Materiales seleccionados y asignación a los componentes.....	79
PARTE II.....	83
3.5.4. Rediseño II Colector de calor.	83
PARTE III	84
3.5.6. Rediseño III Colector de refrigerante.	84
PARTE IV	85
3.5.7. Rediseño IV Colector de calor.....	85
PARTE V.....	88
3.5.9. Rediseño V Colector de refrigerante y tuberías internas	88
CAPÍTULO 4.....	89
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	89
PARTE I	90
Iteración final de diseño	90
4.1. Resultados simulación I.....	90
PARTE II.....	91
4.2. Resultados simulación II.....	91
PARTE III	92
4.3. Resultados simulación III	92
PARTE IV	93
4.4. Resultados Simulación IV	93
PARTE V.....	94
4.5. Resultado simulación V	94
CAPITULO 5.....	97
CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	97
5.1 Conclusiones.....	97

5.2 Trabajo futuro.....	99
REFERENCIAS.....	101

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Conductividad térmica [33].	23
Figura 2 Representación de la transferencia de calor por conducción, convección y radiación [33].	25
Figura 3 Generador eléctrico (alternador) [9].	29
Figura 4 Efecto piezoeléctrico [11].	30
Figura 5 Modulo piezoeléctrico sobre la cara interna de una llanta [11]. ...	30
Figura 6 Esquema del motor eléctrico como generador en un vehículo [13].	31
Figura 7 Motor Stirling tipo alfa [16].	32
Figura 8 Diagrama del sistema de generación eléctrico con motor Stirling alimentado por energía solar [17].	33
Figura 9 Módulo termoelectrico (TEM) [18].	34
Figura 10 Esquema simplificado de motor termoelectrico [18].	34
Figura 11 Esquema simplificado de colocación de generadores termoelectricos en un radiador [18].	35
Figura 12 Prototipo de implementación de paneles solares en Toyota Prius PHV [23].	37
Figura 13 Esquema simple de componentes del sistema TEG.	43
Figura 14 Esquema simplificado de un termopar [24].	44
Figura 15 Efecto Peltier y corriente en función de la dirección de la transferencia de calor [24].	46
Figura 16 Efecto Thomson, dirección de corriente y flujo de calor [24]. ...	46
Figura 17 Sentido del efecto térmico y eléctrico.	47

Figura 18 Generador termoelectrico, esquema simple de componentes [24].	48
Figura 19 Diagrama de los componentes y acomodo de un generador termoelectrico simple [25]......	49
Figura 20 Diagrama que muestra una patente aplicada a un automovil para convertir calor residual directamente en potencia electrica utilizando un generador termoelectrico [27]......	50
Figura 21 . Fotografia de un generador de energia termoelectrica que produjo energia para la proteccion catodica del pozo y la linea de gas, que utilizo la diferencia de temperatura entre las etapas fria y caliente del ciclo del deshidratador de gas natural con glicol [28].	51
Figura 22 Fotografia de un generador termoelectrico desarrollado por el centro de conservacion de energia japones [28]......	52
Figura 23 Prototipo de laboratorio de sistema TEG en motor Diesel y conexiones en grupos para los modulos TEM [32].	54
Figura 24 Aproximacion de una superficie curva con un elemento con 3 nodos [36].	55
Figura 25 Relacion entre la potencia y el diferencial de temperaturas en el modulo TEM [40]......	59
Figura 26 Dimensiones del modulo termoelectrico HZ-20HV [40].	61
Figura 27 Modelado de tuberia de escape para ensamble con colector de calor.	62
Figura 28 Dibujo brida de sujecion.....	63
Figura 29 Modelado de tuberia de escape para colector de calor.	63
Figura 30 Dibujo y extrusion del colector de calor.	64
Figura 31 Espacios para los modulos TEM en el colector de calor.	65

Figura 32 Recorte de geometría para reducción de peso del colector de calor.	65
Figura 33 Primera extrusión del colector del refrigerante y guías para colocación de ductos internos.	66
Figura 34 Rutas guía para los ductos internos del colector de calor.	67
Figura 35 Propuesta #1 del colector del refrigerante.	67
Figura 36 Guías rectas para el colector del refrigerante y vista de sección del colector del refrigerante.....	68
Figura 37 Tubería interna del refrigerante segmento A.....	68
Figura 38 Segmentos de tuberías internas B, C y D.	69
Figura 39 Disipador de calor del colector de refrigerante.	69
Figura 40 Subensamble colectores de calor y línea tubería de escape.	70
Figura 41 a) Subensamble placa inferior modulo TEM, b) Subensamble placa superior modulo TEM, c) Subensamble elemento semiconductor N y P, d) Patrón de ensamble de elementos semiconductores.	71
Figura 42 Ensamble de módulos TEM en los colectores de calor del sistema TEG.	72
Figura 43 Ensamble de colector de refrigerante en el sistema TEG.	72
Figura 44 Complemento para conexión entre las líneas de tubería de escape de un motor Diesel de tracto camión.	73
Figura 45 Modelo de ensamble CAD de un Motor de tractocamión y tubería de escape.	73
Figura 46 Ejemplo de demostración de ubicación de línea de salida de escape en un motor Diesel.	74
Figura 47 Optimización de tubería para conexión a línea de escape del motor.	75

Figura 48 Rediseño de la tubería de línea de escape y ensamble del sistema TEG.	76
Figura 49 Rediseño del colector del refrigerante y ensamble completo del sistema rediseñado.....	76
Figura 50 Colector de calor simplificado para simulación con FEA.	77
Figura 51 Colector de refrigerante simplificado para FEA.....	78
Figura 52 Ensamble de componentes simplificados para FEA.....	78
Figura 53 condición de materiales para cada componente del sistema.	81
Figura 54 Mallado para simulación de transferencia de calor.	82
Figura 55 Contactos entre componentes.	82
Figura 56 Temperatura de gases de escape y de refrigerante establecidas para el sistema.....	83
Figura 57 Colecto de calor rediseño II.	83
Figura 58 Número de nodos obtenidos en la malla del ensamble de componentes para simulación.	84
Figura 59 Cambio de dimensiones en colector del refrigerante.....	84
Figura 60 Ajuste de dimensiones y geometría del colector de calor.	85
Figura 61 Dibujo para modificación del colector de calor.....	86
Figura 62 Ensamble de componentes rediseñados.	87
Figura 63 Ensamble de sistema TEG sobre subensamble de línea de escape.	88
Figura 64 Rediseño del colector del refrigerante para simulación V.	88
Figura 65 Ensamble de componentes con colector de refrigerante rediseñado.	89
Figura 66 Primer muestra de temperaturas y transferencia de calor mediante simulación y análisis FEA.	90

Figura 67 Resultado de temperaturas con el primer rediseño del colector de calor.	91
Figura 68 Resultado de simulación posterior al rediseño del colector del refrigerante.	92
Figura 69 Resultado de temperaturas en simulación IV.	93
Figura 70 Temperaturas resultantes de la simulación V.	94
Figura 71 Diagrama de resultados obtenidos en base a rediseños y optimizaciones de los modelos CAD.	95
Figura 72 Diseño final del sistema TEG desarrollado.	96

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de vehículos de carga [1].	15
Tabla 2 Formas típicas de energía [2].	20
Tabla 3 Matriz de decisiones para la selección del sistema generador de energía eléctrica.	41
Tabla 4 Datos técnicos del motor de un tractocamión clase VIII.	60
Tabla 5 Propiedades del Silicio, material para la carcasa de cada módulo TEM.	79
Tabla 6 Propiedades del Aluminio.	79
Tabla 7 Propiedades del Cobre.	80

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla la investigación acerca del aprovechamiento de energías residuales de un tractocamión clase VIII para la aportación de información útil sobre la implementación de módulos termoeléctricos aplicados a un motor de combustión interna para la generación de energía eléctrica. Se combinaron estrategias teóricas y prácticas para desarrollar un prototipo virtual compatible con el motor del tracto camión, utilizando la cantidad de energía calorífica que no es utilizada para realizar trabajo debido a la combustión, así como el líquido refrigerante del mismo sistema. Se realizó un análisis de elemento finito en el paquete ANSYS, para el rediseño y optimización de cada componente del sistema termoeléctrico generador, buscando lograr un diferencial de temperaturas estable en el sistema que coincidiera con las temperaturas necesarias de funcionamiento del módulo termoeléctrico para la correcta generación de energía eléctrica. Con la posibilidad de aprovechar la energía residual convertida en energía que se pueda almacenar en baterías.

ABSTRACT

In the present work, the use of residual energy from class VIII tractor was researched to provide useful information on the implementation of thermoelectric modules applied on an internal combustion engine to generate electrical energy. Theoretical and practical strategies were combined to develop a computer-aided design prototype that could be compatible with the truck engine, which will use the amount of heat energy that is not consumed during the process due to combustion, as well as the refrigerant liquid of the same system. A finite element simulation was carried out in ANSYS software with the purpose of redesign and optimize each component to obtain a stable temperature differential in the system capable to run the thermoelectric module and generate electrical energy; assuring the possibility to convert this energy in a source of energy storage for batteries.



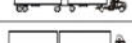
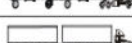
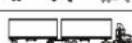


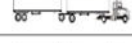



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Tractocamiones

Los tractocamiones son vehículos denominados según una clase, desde la Clase V hasta la Clase VIII, que tiene que ver con la clasificación de estos según el número de ejes que tengan, es decir, un tractocamión clase VII tiene ocho ejes de ruedas, esto se muestra a detalle en la Tabla 1. Además de clasificarse según la capacidad de carga que puedan mover, siendo los vehículos de carga con menor capacidad de carga los que comienzan en la clase 1, y los de mayor carga los que se encuentran en las clases VII y VIII. En la nomenclatura de la Tabla 1 la letra “T” significa “Tractocamión” y el número consecuente se refiere a el número de ejes en el tractocamión. La letra “S” significa “Unidad de arrastre”, es decir, el primer semirremolque enganchado al tractocamión y de la misma forma el número consecuente es el número de ejes del semirremolque, al final de la nomenclatura, La letra “R” al final de la nomenclatura se refiere al remolque secundario, que, a su vez, el número consecuente a esa letra, indica el número de ejes, pero ahora del remolque secundario. Los tractocamiones cuentan con un elemento de enganche, carga, arrastre y articulación, conocido como quinta rueda. Se pueden encontrar en diversos tipos de carrocerías y diversos tipos de cabinas para el descanso del operador.

Tabla 1 Clasificación de vehículos de carga [1].

NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHICULO
T2-S1-R2	5	18	
T2-S2-R2	6	22	
T2-S1-R3	6	22	
T3-S1-R2	6	22	
T3-S1-R3	7	26	
T3-S2-R2	7	26	
T3-S2-R3	8	30	
T3-S2-R4	9	34	
T2-S2-S2	6	22	
T3-S2-S2	7	26	
T3-S3-S2	8	30	

Los vehículos para cargas pesadas son utilizados para la movilidad de mercancía o materiales a lo largo de trayectos muy largos, debidos principalmente a la alta potencia y torque generados por sus motores Diesel. Estos vehículos suelen permanecer funcionando por muchas horas durante los trayectos de movilidad, por lo que dependen de una alta cantidad de combustible.

El tema del presente estudio se basa en el análisis de la recuperación de energía eléctrica para el incremento de la autonomía de los vehículos tractocamiones clase 8. Es conocido que las carreteras por donde circulan usualmente no tienen suficientes estaciones de abastecimiento de combustible, lo que obliga a implementar sistemas híbridos en los motores que complementen con un beneficio en el consumo de combustible del motor.

Es posible utilizar estaciones de carga para baterías adicionales al sistema híbrido del camión, sin embargo, la necesidad de energía de estos vehículos es mucho mayor que la capacidad de carga de las pocas estaciones existentes, para la descarga y carga de las baterías respectivamente, es decir, la carga de las baterías puede tomar más del doble de tiempo que la carga de ésta, siendo así que el trabajo de encontrar la mejor opción para una posible aplicación de auto recarga de baterías es una prioridad para el desarrollo de las nuevas tecnologías.

Se planean estudiar las energías residuales del camión durante el trayecto a velocidad crucero, siendo ésta la velocidad promedio de movimiento que perdura por un muy alto periodo de tiempo y que prácticamente no varía. Posteriormente en base a dicho estudio, se buscarán métodos de implementación de cada una de las energías residuales existentes para una conversión de éstas en energía eléctrica. Se podrán observar los métodos más efectivos de aprovechamiento de la energía, se seleccionará la más apropiada.

En base al método seleccionado, se propondrá un prototipo teórico que permita determinar si es factible la propuesta para una continuación de desarrollo experimental, o en su defecto, obtener una base de información estructurada con la que se contribuya al desarrollo científico de los sistemas híbrido/eléctricos del sector automotriz.

1.1 Planteamiento del Problema

Como resultado de la relativamente baja eficiencia interna que se genera al interior de los motores de combustión interna, se pueden encontrar una variedad de situaciones donde dicha energía se pierde, siendo esto a lo que se le llama energía residual. Por lo que es necesario buscar la manera de que esta energía sea utilizada mediante un sistema que funcione como un generador externo eléctrico, permitiendo convertir esta energía perdida en energía eléctrica.

Cada vez es más necesario que los vehículos de producción en serie tengan las mínimas emisiones contaminantes al medio ambiente, siendo este el principal detonante de la descarbonización a mediano plazo planteada por algunas industrias automotrices, ya que se tiene planeado que el transporte automovilístico migre completamente hacia los vehículos totalmente eléctricos.

Sin embargo, estos vehículos aún tienen bastantes complicaciones para su implementación total, por lo que se han desarrollado complementos eléctricos para los vehículos de combustión interna, como sistemas adicionales. Estos pueden ayudar parcialmente con la disminución de uso de combustible reduciendo la carga inicial del motor, al momento del arranque y con los sistemas eléctricos del vehículo, como lo puede ser todo el sistema de iluminación, el sistema de aire acondicionado, entre otros. O bien, algunos vehículos utilizan sistemas eléctricos más grandes que permiten utilizar el automóvil totalmente eléctrico, o una combinación de ambos, eléctrico y con el motor de combustión interna (MCI), esto para reducir la necesidad de quema de combustible o incluso para mejorar la potencia desarrollada.

Existe la principal necesidad de la industria de generar alternativas que permitan aprovechar toda la energía residual que se pueda, para implementar el sistema eléctrico que pueda contribuir con la carga o requerimiento eléctrico del vehículo.

1.2 Justificación

Esta investigación desarrolló un análisis acerca de la factibilidad, beneficios, y mejoras que podrían lograrse al implementar un sistema de generación de energía eléctrica en el tractocamión, aprovechando la energía térmica, disminuyendo la contaminación ambiental en el sentido de que se requerirá menos dependencia del combustible al tener una fuente adicional de energía eléctrica, reduciendo significativamente las emisiones.

Además, se estudió el conocimiento teórico de conceptos fundamentales de generación de energía, aplicándolos en una metodología de experimentación. Obteniendo bases de información que permitan entender la viabilidad de dichos conceptos para una posible implementación industrial.

El sentido de esta investigación fue encontrar una posible aplicación de un sistema que aproveche la generación de energía en función de la misma energía residual que genera el tractocamión, para contribuir con la ingeniería de desarrollo de nuevas tecnologías para la optimización de los tractocamiones híbridos, donde una de las principales problemáticas o cuestiones a mejorar es la autonomía de estos. La cual debe ser muy extensa ya que son vehículos de transporte de cargas pesadas que movilizan mercancía, materia prima, materiales, componentes, entre otros, a través de muy largos trayectos de distancia. Entonces al estar en funcionamiento continuo por muchas horas, la fuente principal de energía (residual) siempre estará presente, y un sistema de generación haciendo de fuente dicha energía, beneficiará a la autonomía de tractocamión, así como también apoyar a la funcionabilidad para el operador.

Los resultados de esta investigación podrían ser aplicados en la producción de tractocamiones, añadiendo un sistema que permita el aprovechamiento de la energía una vez que se compruebe que es totalmente factible, o en su defecto, permitirá en el aporte del desarrollo científico de estos sistemas agregando información valiosa para entender que esos elementos teóricos aplicados no son lo suficientemente funcionales en el entorno de la aplicación establecida.

1.3 Hipótesis

Generar una metodología que permita el análisis de implementación de un sistema de recuperación de energía, basándose en diferentes tipos de teorías de transformación, para la solución a la carga de las baterías del tractocamión, validando si la propuesta es factible a través del desarrollo de modelos por elemento finito.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Proponer el desarrollo de un sistema alternativo de generación de energía eléctrica mediante la investigación de todas las posibles conversiones de energía residuales existentes en un tractocamión clase VIII, para la carga de las baterías del mismo vehículo.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar las posibles fuentes de generación de energía en el tractocamión y las formas de conversión de energía teóricas para obtención de energía eléctrica.
- Proponer un concepto de sistema para la implementación de la alternativa seleccionada.
- Realizar una simulación térmica en estado estable del sistema, en software de diseño asistido por computadora mediante análisis de elemento finito que permita corroborar la transferencia de energía hacia el sistema propuesto.
- Fundamentar la correcta selección de la opción más viable de generación de energía eléctrica en base a los resultados obtenidos en la simulación para una posible aplicación.









CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Definición y conceptos importantes sobre la energía.

La energía es la propiedad que tiene la materia para ser convertida en trabajo, calor o radiación, sin embargo, se puede presentar de muchas formas, por ejemplo, debido al movimiento, a la altura de un objeto respecto a la gravedad, a las moléculas que pueden reaccionar, a la transferencia de calor entre objetos, gases o líquidos, a las corrientes de viento, corrientes eléctricas, radiación solar etc. La Tabla 2 muestra una lista de cuáles son las más importantes.

Tabla 2 Formas típicas de energía [2].

Tipo de energía	Manifestación física	Ejemplo
Cinética	Movimiento	
Gravitacional	Altura sobre un punto de referencia	
Elástica	Tensión o compresión	
Química	Moléculas que pueden reaccionar y generar calor	
Nuclear	Núcleos que pueden reaccionar y generar calor	
Térmica	Alta temperatura	
Eléctrica	Voltaje y corriente	
Radiación	Luz y algunas otras ondas electromagnéticas	

Respecto a lo mencionado anteriormente, si se tuviera una medición realizada detalladamente sobre la cantidad de energía que hay antes y después de cualquier tipo de proceso, se encontraría que el total de dicha energía nunca va a cambiar. Es decir, la energía puede ser convertida desde una forma a otra, pero no se puede crear ni tampoco se puede

destruir, siendo esto uno de los principios básicos de la Ley de conservación de la energía, y también llamada primera ley de la termodinámica [2]

Tal explicación acerca de la conversión de energía es parte fundamental para el desarrollo de la investigación y proyecto de la presente tesis, donde también será necesario abordar algunos temas y conceptos breves respecto a los fenómenos matemáticos, unidades, y ecuaciones que gobiernan el cálculo necesario para el desarrollo de la metodología.

2.1.1. Unidades

Las unidades de medición de la energía pueden variar dependiendo del marco de referencia que se tenga, algunas de las principales son las siguientes: Joules (J) [N*m], Calorías (cal) que es el calor por unidad que un gramo necesita para elevar la temperatura del agua un grado centígrado, British thermal units (BTU), kilowatt-hora (kWh), electron-volts (Ev). En seguida se muestran algunas de las conversiones para estas unidades mencionadas.

$$\begin{aligned}1 \text{ kcal} &= 418 \text{ J} = 3.97 \text{ Btu} = 0.00116 \text{ kWh} \\1 \text{ Btu} &= 1054 \text{ J} = 0.252 \text{ kcal} = 0.000293 \text{ kWh} \\1 \text{ kWh} &= 3\,600\,000 \text{ J} = 860 \text{ kcal} = 3413 \text{ Btu}\end{aligned}$$

2.1.2. Potencia

Otro tema importante para el desarrollo de esta investigación es la forma en que puede manipularse la energía mediante alguna conversión, por lo que también se debe tener en cuenta que existe una razón de cambio durante dicha conversión. Se define el concepto de potencia (P) como la cantidad de energía por unidad de tiempo.

$$P = \frac{\varepsilon}{t} = \frac{J}{s} \quad (\text{ec } 1)$$

Esta relación anterior, se considera como la definición científica para las unidades de la energía llamadas también como Watt [W], concepto fundamental necesario durante el proceso de trabajo referente a la conversión de energías [3].

$$1 W = 1 \frac{J}{s}$$

2.1.3. Trabajo

Cuando cualquier objeto se mueve debido a una fuerza ejercida sobre él, es cuando se dice que se está ejerciendo un trabajo, donde necesariamente debe existir un desplazamiento cuando la fuerza actúa y la representación matemática es igual a:

$$w = \vec{F} \cdot \vec{d} = Fd \cos \varphi \quad (\text{ec } 2)$$

Donde φ es el ángulo existente entre \vec{F} y \vec{d} .

W es un escalar, y las unidades son J [4].

2.1.4. Calor

Sel calor se define como una transferencia de energía térmica entre dos sistemas siendo el calentamiento cuando hay adición de energía y el enfriamiento cuando hay una disminución de energía. Con base en esto se deriva que para esta pérdida o adición de energía existen tres mecanismos de transferencia de calor mencionados a continuación [5].

i. Conducción

La conducción es la transferencia de calor a través de un cuerpo sólido a otro cuando se encuentran estos en contacto físico en estado estacionario. Siempre que existe un gradiente de temperaturas en un medio sólido, el calor fluirá desde la región con mayor temperatura a la región con menor temperatura. La Ley de Fourier indica que potencia calorífica que se transfiere por conducción q_k es proporcional al gradiente de temperatura y a área a través de la cual se transfiere el calor:

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{ec } 3)$$

donde k es la constante de proporcionalidad llamada conductividad térmica y refleja las propiedades conductoras del material, el signo negativo indica que cuando la temperatura aumenta con la posición, el calor fluye hacia regiones de menor temperatura [6].

La Figura 1 muestra esta situación en un sistema donde las paredes paralelas al plano (y,z) , separadas una distancia L , se encuentran a temperaturas $T_1, T_2, T_2 > T_1$ conocidas. El calor fluirá en la dirección x (porque no existe gradiente de temperaturas en las otras direcciones) y puede expresarse como:

$$q_k = -kA \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (\text{ec } 4)$$

Esto siempre que la conductividad térmica k sea constante en todo el material [6].

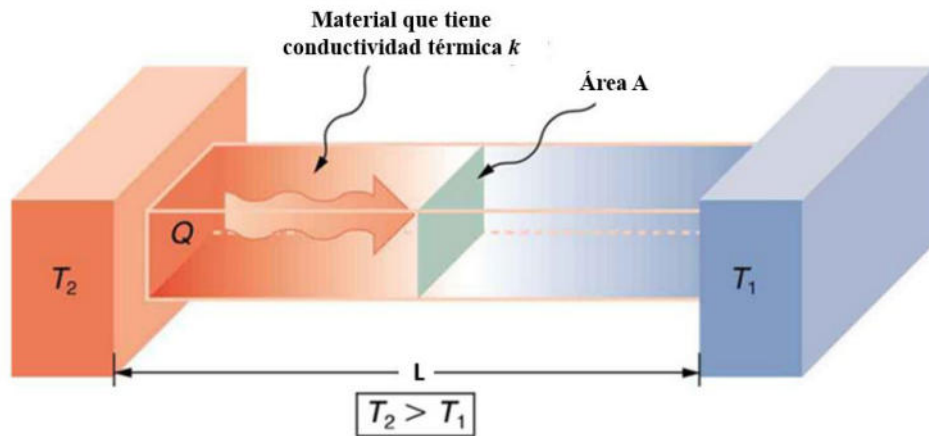


Figura 1 Conductividad térmica [6]

ii. Convección

La convección es el proceso de transferencia de calor que interviene cuando entran en contacto un fluido y un sólido. El fluido puede moverse sobre la superficie impulsado por una fuerza externa (por ejemplo, un ventilador) en cuyo caso se trata de una convección forzada, o puede simplemente alejarse de la superficie impulsado por una diferencia de presiones, en cuyo caso se trata de la convección natural. Tanto en la convección forzada como en la natural, actúan dos mecanismos. Suponiendo que el sólido está a mayor temperatura que el fluido el mecanismo que se observa en la interfase entre ambos es el

de conducción: las moléculas de la superficie sólida transmiten energía cinética a las moléculas del fluido que se encuentran cerca de la interfase y la transferencia de calor verifica la ecuación (ec 5) evaluada de la siguiente forma:

$$q_c = -k_{fluido} A \frac{dT}{dx} \quad (\text{ec } 5)$$

Esto con $x=0$

El segundo mecanismo de transferencia de calor involucra el movimiento macroscópico de fracciones de fluido cuyas moléculas “arrastran” el calor a regiones alejadas de la superficie y que se encuentran a temperaturas más bajas. Tomando en cuenta ambos mecanismos, la potencia calorífica que se transfiere por convección es proporcional al área de contacto entre el sólido y el fluido y a la diferencia de temperaturas de la superficie T_s y la del fluido en un punto alejado de esa superficie T_∞

$$q_c = h A (T_s - T_\infty) \quad (\text{ec } 6)$$

Siendo h la constante de proporcionalidad llamada coeficiente de transferencia de calor.

Además, esta última expresión para q_c es una expresión fenomenológica que fue planteada por Newton en 1701, y se sigue usando hasta nuestros días. El valor de h depende de la velocidad del fluido, de la forma de la superficie, de las propiedades físicas del fluido. Por el momento, se advierte que, dado el coeficiente h , se puede definir una resistencia térmica de convección:

$$q_c = \frac{(T_s - T_\infty)}{R_c} ; R_c = \frac{1}{hA} \quad (\text{ec } 7)$$

Esa resistencia térmica completa un circuito térmico equivalente para el problema de la disipación de potencia desde un chip, dado que un disipador siempre presenta una superficie expuesta al aire del ambiente [6].

iii. Radiación

El fenómeno de la radiación consiste en la transmisión de energía de un cuerpo hacia otro por una propagación a través del medio entre ambos cuerpos, la transferencia de calor se da por emisiones de ondas electromagnéticas, que transportan la energía hacia afuera del objeto emisor.

El cálculo de dicha radiación establece que la energía radiada por un radiador de cuerpo negro por segundo, por unidad de superficie, es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta y está dada por la ley de Stefan-Boltzmann:

$$\frac{P}{A} = \sigma T^4 ; \frac{j}{m^2 s} \quad (\text{ec } 8)$$

Donde $\sigma = 5.6703 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$.

Mientras que para objetos calientes distintos de los radiadores ideales, la ley se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{Q}{t} = \sigma \varepsilon A T^4 \quad (\text{ec } 9)$$

Donde ε es la emisividad del objeto ($\varepsilon=1$ para el radiador ideal). Y si el objeto caliente está radiando energía hacia su entorno más frío a una temperatura T_c , la tasa de pérdida de radiación neta toma la forma:

$$P = \varepsilon \sigma A (T^4 - T_c^4) \quad (\text{ec } 10)$$

Siendo P la potencia radiada neta, A el área radiante, T la temperatura del radiador y T_c la temperatura del fluido [6].

En la Figura 2, se muestra un diagrama con los ejemplos de la dirección del flujo de calor con respecto a cada uno de los tipos de transferencia de calor dentro de una habitación.

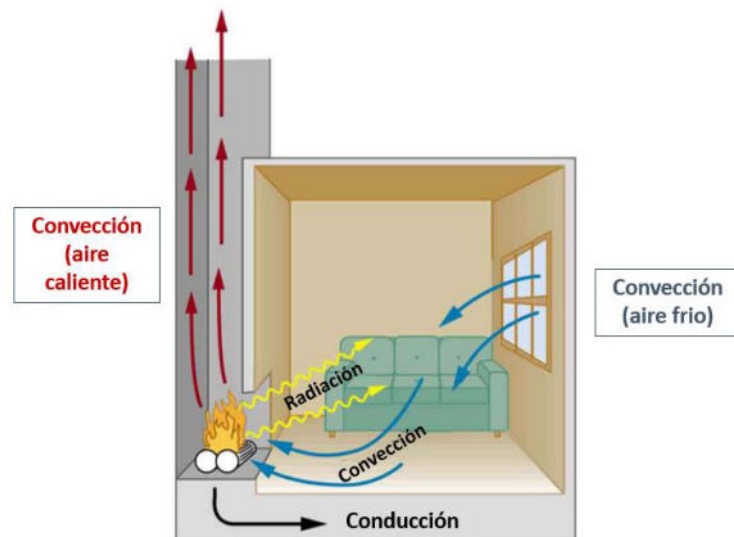


Figura 2 Representación de la transferencia de calor por conducción, convección y radiación [6].

Con estos conceptos, es posible entender y establecer cuáles son las principales fuentes de energía que se desarrollan o pueden ser aprovechadas durante el funcionamiento de un vehículo, en este caso específicamente con datos relacionados a los vehículos tractocamiones clase VIII, de modo que continuación se muestran a detalle las energías residuales existentes, así como las teorías y métodos posibles en base a la investigación realizada que permiten convertir dichas energías en energía eléctrica.

2.2. Energías residuales

Durante el movimiento, función u operación de los vehículos se genera una enorme cantidad y variedad de conversiones de energía, desde que es existente energía potencial sobre el vehículo por su posición, una energía química convertida en trabajo mecánico para el funcionamiento de los mecanismos en los motores que conllevan a una transmisión de potencia hacia los ejes motrices desarrollando así energía cinética, además de una amplia cantidad de energía calorífica debidas a la combustión interna de los motores, e incluso una resistencia dinámica debida a la interacción con el aire del medio ambiente que es atravesado por el mismo vehículo. Se desarrollan a continuación las explicaciones teóricas de cada una de las principales fuentes de generación de energía debidas al resultado de la interacción entre los sistemas y alrededores con el movimiento.

2.2.1 Mecánica (Cinética y potencial)

La energía mecánica es la suma de las energías cinética E_c , y la energía potencial E_p :

$$E_m = E_c + E_p \quad (\text{ec 11})$$

Energía cinética.

Este tipo de energía es debida al impulso de un cuerpo en movimiento, también conocido como la inercia. Es también el trabajo con el cual un cuerpo es capaz de desarrollar una resistencia antes de que regrese a un estado de reposo, y también, es igual a el trabajo que lo ha llevado desde el reposo hasta la velocidad actual que tenga [4, 7].

Para un cuerpo con masa m , que se mueve a una velocidad v , la ecuación de la energía cinética es la siguiente:

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (\text{ec } 12)$$

Energía potencial

Esta energía se define como el trabajo que un objeto puede realizar debido a su posición (altura), mientras que su ecuación está dada por:

$$E_p = mgy \quad (\text{ec } 13)$$

Donde m es la masa del objeto, g es el valor de la gravedad $9.81 \frac{m}{s^2}$, y y es la altura a la que se encuentra el cuerpo.

De tal manera que en el entendido del uso de esta teoría se encuentran un gran número de sistemas y mecanismos que se fundamentan con las variables anteriormente mencionadas, es decir, con la masa del camión, su velocidad, su posicionamiento y la gravedad que actúa sobre él. Durante el funcionamiento del tractocamión, pueden mencionarse lo siguiente, el caso con el movimiento rotatorio de las llantas, donde es posible el aprovechamiento de la energía cinética desarrollada por las ruedas del tractocamión, con el uso de generadores aplicados a estas controlando así los valores de voltaje y amperaje respecto a las baterías que se coloquen.

Además, puede implementarse un sistema dentro de las llantas con materiales piezoeléctricos que permita mediante un voltaje aplicado al material, generar energía eléctrica, lo cual tiene que ver con la energía potencial que se desarrolle con el peso del camión cuando este se mueve sobre los neumáticos.

Otra manera de utilizar la energía cinética es con la energía generada por la resistencia durante el frenado. El mecanismo de frenado en cualquier vehículo consta de dos superficies en contacto bajo presión que por medio de la fricción entre ellas reduce la velocidad de movimiento convirtiendo la energía cinética de dicho movimiento principalmente en energía calorífica. Pero es una potencial área de oportunidad para convertir esa energía cinética en eléctrica o mecánica. En muchos de los casos del movimiento del tractocamión se utiliza muy poco el freno tradicional dando paso al freno de motor, sin embargo, al ser vehículos tan pesados, en los momentos que se aplica el

freno de disco, puede estudiarse un sistema que genere suficiente energía en función del frenado del camión.

Es posible investigar sobre alguna posible aplicación en algún sistema rotatorio para colocar un generador como lo es el alternador en el sistema de poleas del motor. Estos sistemas abordados en los párrafos anteriores se comentarán más detalladamente a continuación.

Generador eléctrico (alternador)

Los generadores de corriente también conocidos como alternadores operan con el mismo principio de inducción electromagnética de los generadores de corriente directa. El cual consiste en una armadura de una bobina de cable de cobre, y un campo magnético.

En los generadores de corriente directa, la bobina gira y el campo magnético permanece estático, mientras que en los alternadores es lo opuesto. La bobina permanece estática y es llamada estator, y el campo magnético es el que rota siendo llamado rotor.

El estator consiste en un cuerpo de hierro fundido, que sostiene el núcleo de la bobina. El rotor es un volante que tiene polo N y polo S fijos en el aro exterior. Cuando el rotor gira, los conductores del estator estacionarios son cortados por el flujo magnético, generando así el fenómeno de inducción debido a que alterna continuamente ambos polos N y S del rotor, generando así la corriente eléctrica [8]. La Figura 3 muestra los principales componentes de un generador eléctrico, el estator que cubre y sujeta al rotor interno, el cual mediante una resistencia y un embobinado de cable de cobre, al girar repetidamente crea un campo magnético logrando así una corriente eléctrica, la cual se almacena en una batería.

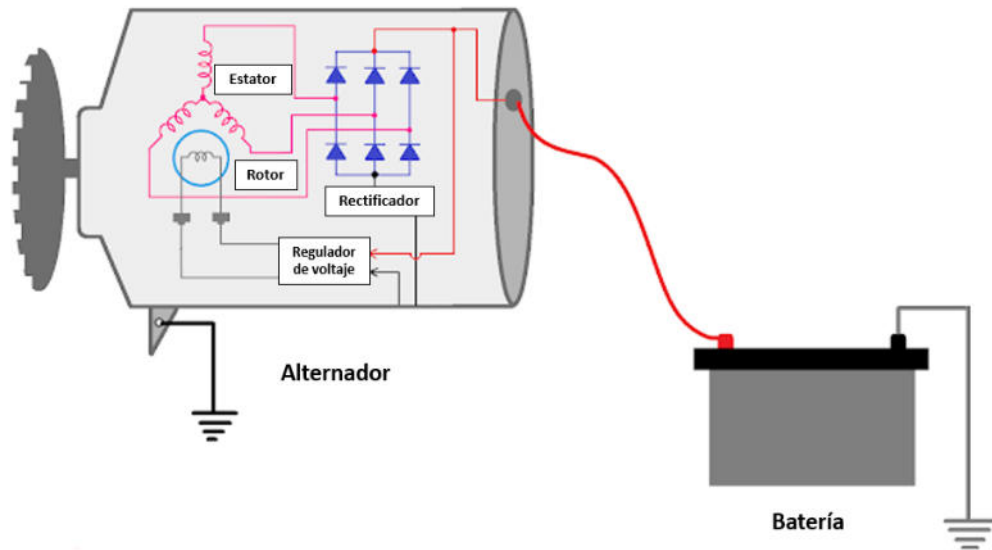


Figura 3 Generador eléctrico (alternador) [9].

Efecto piezoeléctrico

Los materiales piezoeléctricos convierten tensión mecánica o deformación en energía potencial, y lo mismo pasa en el sentido opuesto, cuando al aplicar un potencial eléctrico al material resulta en un desplazamiento mecánico.

El efecto piezoeléctrico explicado con un modelo molecular como el que se muestra en la Figura 4 donde se observa la carga eléctrica con una fuerza ejercida sobre un material. Antes de que se someta el material a un esfuerzo los centros de las cargas positivas y negativas de cada molécula coinciden o se encuentran dentro de una molécula eléctricamente neutra Figura 4(a). Sin embargo, cuando se presenta un esfuerzo por una fuerza externa, la estructura interna de la molécula se deforma causando una separación de los centros positivos y negativos generando estos dipolos mencionados anteriormente, Figura 4(b). Como resultado de esto, a lo largo de todas las moléculas del material, el acercamiento de los polos opuestos hace que se generen cargas en la superficie. Es decir, el material se polariza, y esto genera un campo eléctrico que puede ser utilizado para transformar la energía mecánica en energía eléctrica [10].

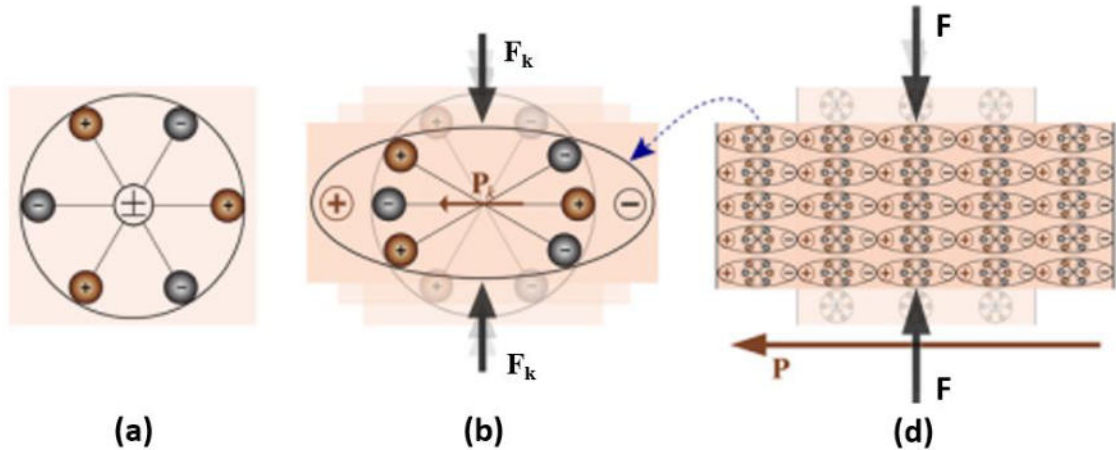


Figura 4 Efecto piezoeléctrico [11].

Una posible aplicación de estos sistemas se emplea dentro de las llantas de los vehículos, en donde pueden colocarse los módulos piezoeléctricos a lo largo de la cara interna de la llanta, ya que esta durante el rodamiento tendrá deformaciones que pueden aprovecharse para que los módulos generen corriente eléctrica. Un esquema simplificado de esto se muestra en la Figura 5.

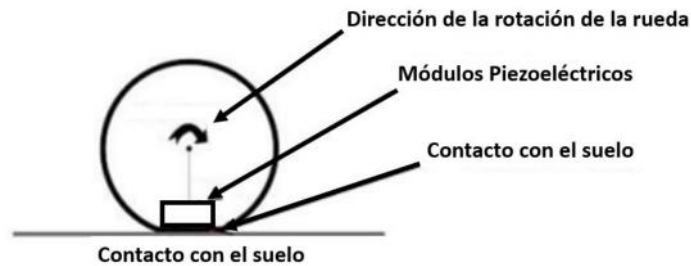


Figura 5 Modulo piezoeléctrico sobre la cara interna de una llanta [11].

Frenos regenerativos

El freno es un sistema mecánico que detiene el movimiento absorbiendo la energía cinética, es usado para reducir la velocidad de los vehículos, principalmente con el uso de la fricción entre componentes. En un tractocamión, al tener mucho más peso que un vehículo normal, y más ejes, una aplicación de frenado regenerativo sería una buena oportunidad para cargar baterías, analizando el hecho de que no siempre es el freno de pedal el que se utiliza para detener el tractocamión.

La forma más común para implementar un freno regenerativo es usando un motor eléctrico como un generador. el trabajo de este sistema depende del principio de funcionamiento de

éste. El motor eléctrico se activa cuando una fuerza externa actúa sobre el (durante el frenado), para generar la energía. Entonces el motor funciona en dos sentidos, cuando el motor gira en una dirección la energía eléctrica se convierte en energía mecánica que se usa para acelerar el vehículo, cuando el motor gira en la dirección opuesta, funciona como un generador, convirtiendo ahora la energía mecánica en energía eléctrica para la carga de las baterías del vehículo. Esto es posible utilizando la fuerza rotacional del eje motriz. En la Figura 6 se muestra como es el acomodo del motor eléctrico, la batería y la conexión con el eje de rotación de las ruedas, respecto al MCI en un vehículo. Además, se puede observar el posicionamiento y dirección de la energía generada por el motor eléctrico, dirigida ya sea hacia el MCI o hacia las baterías [12].

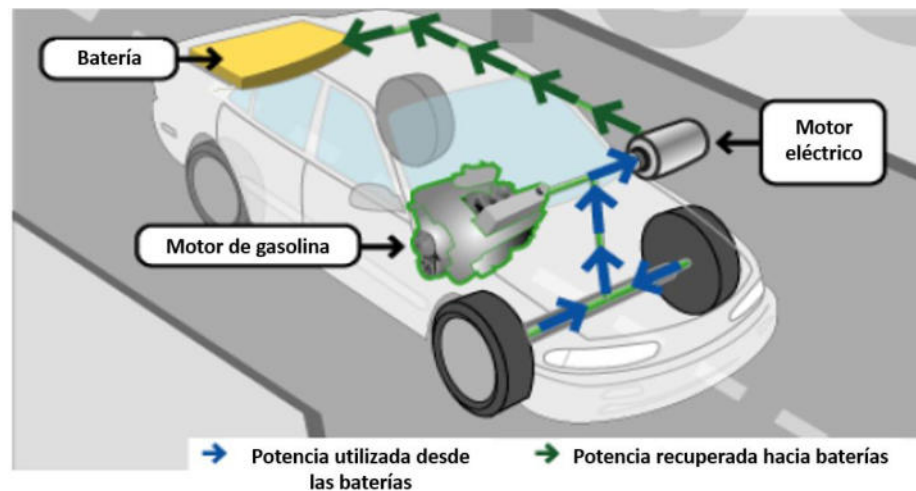


Figura 6 Esquema del motor eléctrico como generador en un vehículo [13].

2.2.2 Térmica

La principal fuga de energía durante el proceso de la combustión de un motor Diesel se da por medio del calor, ya que la eficiencia desarrollada por el motor ronda entre 35% y un 45%, es decir, toda la eficiencia restante que debería de brindar en forma de trabajo se pierde entre los diversos componentes como ejemplo la fricción entre los componentes del motor, el mínimo juego que pueda existir entre los mismos y principalmente en forma de calor perdiendo alrededor de un 30% en esto y alrededor de otro 30% en el sistema de escape, siendo un área de oportunidad para un sistema que convierta esa energía calorífica en energía eléctrica.

Es importante mencionar también, que el estudio para la manipulación de esta energía residual se efectúa mediante el uso de las leyes y ecuaciones de la termodinámica para la transferencia de calor, mencionadas en el presente documento.

Algunos sistemas teóricos que se han estudiado referentes al uso de energía térmica para generación de energía eléctrica se mencionan a continuación:

Motor Stirling

El motor Stirling funciona mediante el proceso natural en el cual la presión de un gas dentro de un contenedor sellado incrementará si el gas se calienta y disminuirá si el gas se enfría. El gas se encuentra comprimido y al momento de incrementar la temperatura, también aumenta la presión en él, y produciendo trabajo en el cilindro, para después volver a enfriarse y comprimirse, para posteriormente repetir el ciclo. De tal manera que, al colocar un sistema rotatorio relativo al movimiento lineal del desplazamiento de los cilindros, y con el trabajo generado por el ciclo cerrado del motor, se obtiene energía mecánica de rotación [15]. Existen varios tipos de motores Stirling, en función de los científicos que los desarrollaron, en la Figura 7 se muestra un diagrama del mecanismo de un motor Stirling tipo Alfa.

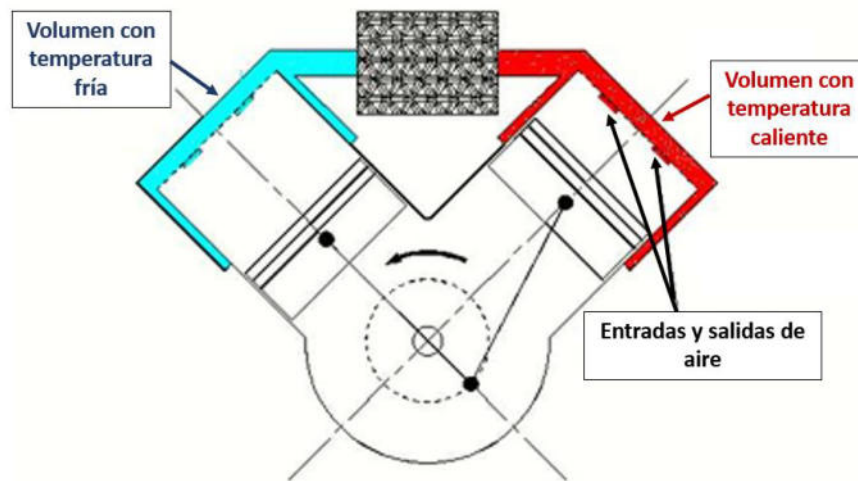


Figura 7 Motor Stirling tipo alfa [16].

Este tipo de motores, se pueden aplicar a cualquier situación siempre y cuando exista la fuente de alimentación de energía con calor y un método refrigerante, como en la Figura 8 donde se establece un mecanismo receptor de energía solar, para alimentar un motor Stirling tipo Alfa, que es enfriado mediante conducción por aire del medio ambiente.

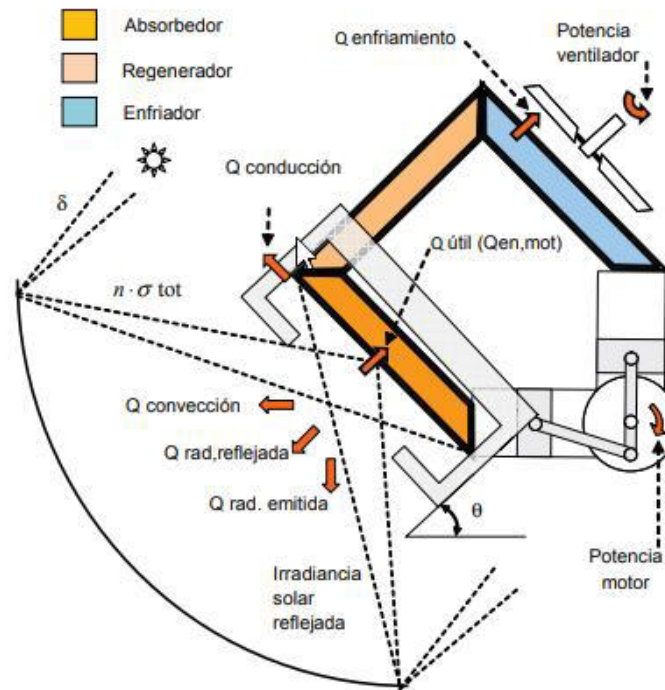


Figura 8 Diagrama del sistema de generación eléctrica con motor Stirling alimentado por energía solar [17].

Efecto termoeléctrico.

Los generadores termoeléctricos consisten en tres elementos clave:

- 1) Intercambiador de calor: El cual absorbe el calor y lo transfiere a los módulos termoeléctricos.
- 2) Los módulos termoeléctricos: Los cuales generan electricidad cuando una diferencia de temperaturas existe en dos de sus extremos, Figura 9.
- 3) Un disipador de calor: que refrigere el calor excedente de los módulos termoeléctricos.

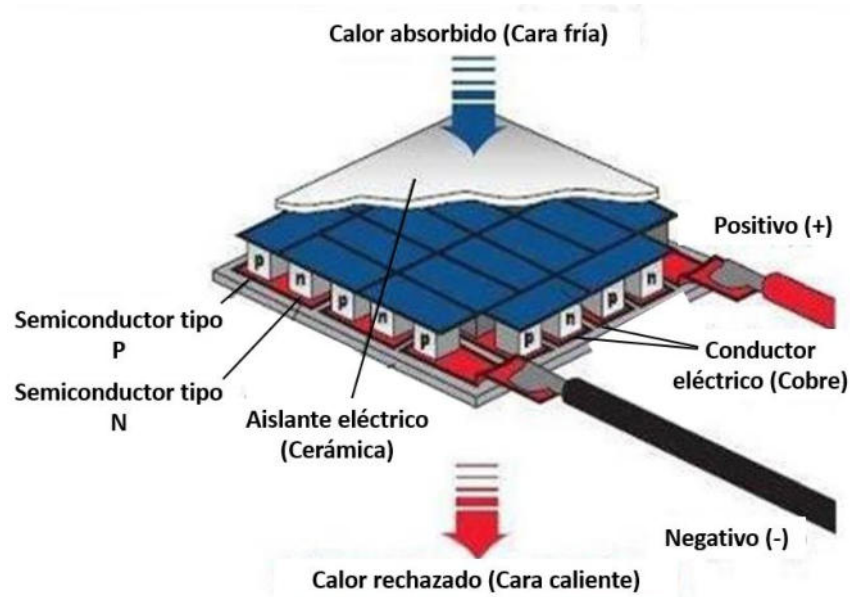


Figura 9 Módulo termoelectrico (TEM) [18].

La parte fundamental de este tipo de generador es la diferencia de temperaturas entre ambos lados del módulo termoelectrico, si un lado del metal puede ser calentado al mismo tiempo de que por el otro lado es enfriado los electrones alrededor de los átomos de dicho metal tendrán más energía en el lado de alta temperatura, que en el lado de temperatura baja. Por esto los electrones desde la parte caliente viajarán más rápido hacia el extremo frío, que lo que lo hacen los electrones del extremo frío hacia el extremo caliente. Esto resultará en que el lado frío obtendrá carga negativa y el lado caliente una carga positiva. En la Figura 10 se muestran las bases técnicas sobre el comportamiento de dos materiales termoelectricos diferentes expuestos a una fuente de calor.

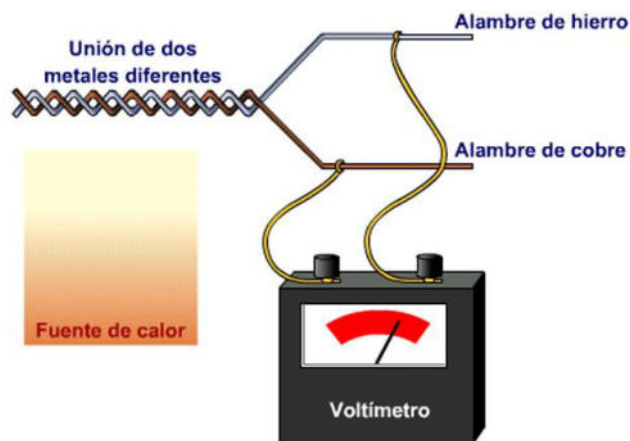


Figura 10 Esquema simplificado de motor termoelectrico [18].

Posibles aplicaciones de este sistema son viables en cualquier punto de alta generación de calor dentro del motor del tractocamión, como ejemplo de esto se tiene el múltiple de escape, el radiador de líquido refrigerante. En la Figura 11 se aprecia un esquema simple de esta aplicación.

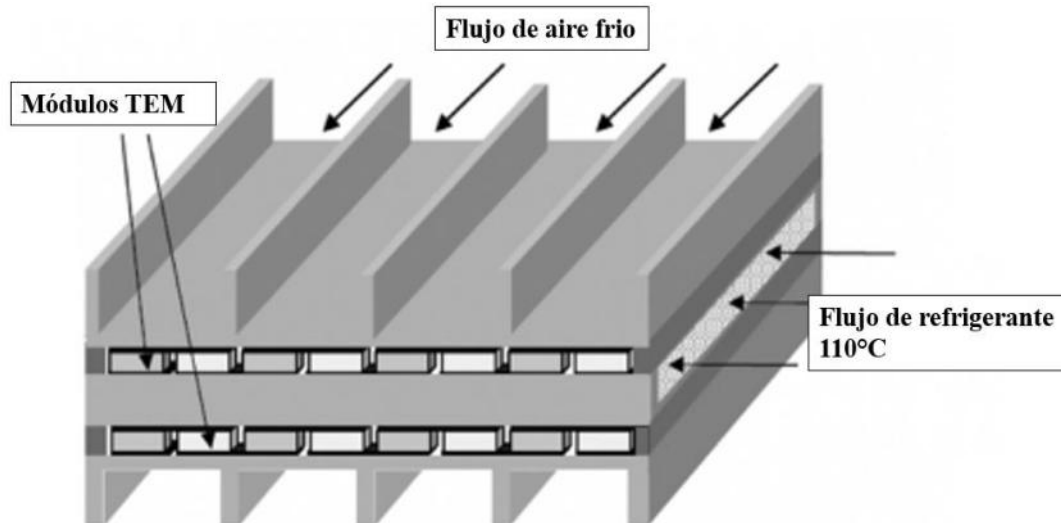


Figura 11 Esquema simplificado de colocación de generadores termoeléctricos en un radiador [18].

2.2.3 Eólica

La energía cinética debida al viento, conocida como energía eólica es una de las más prometedoras fuentes naturales y renovables de energía. La energía que puede ser captada por turbinas de viento depende de la ubicación de estas, y el factor de la velocidad del viento que sea efectiva en las alabes. Muchas de las ocasiones se aprovechan lugares geográficos como lugares cerca de costas, lugares con terrenos abiertos, incluso en algunas montañas. Siendo así el objeto de importancia la velocidad del viento es una vía alterna en la implementación de esta tecnología en los vehículos. Cuando se piensa en un sistema que aproveche el viento alrededor de un tracto camión se vuelve algo significativo el hecho de que, al ser un vehículo con dimensiones de su carrocería muy grandes, al trasladarse a una determinada velocidad, este romperá mucho aire que puede ser aprovechado ya que prácticamente la velocidad de los vehículos será casi la misma velocidad que tendrá el viento que rompen estos cuando se trasladan [19].

Esta idea puede caracterizarse con la ecuación 14 para determinar la potencia que podría generar un rotor colocado estratégicamente sobre un tractocamión:

$$P = 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot E \quad (\text{ec } 14)$$

Donde P es la potencia desarrollada en Watts, ρ es la densidad del aire alrededor de 1.225 kg/m^3 a nivel del mar, A es el área del barrido del rotor en m^2 , calculándose como πr^2 , siendo r el radio o longitud del alabe, V es la velocidad del viento en m/s y E la eficiencia en porcentaje [20].

2.2.4 Solar

No se podría considerar propiamente un tipo de energía residual a la energía solar, ya que no es resultante de algún proceso de operación de un tractocamión, sin embargo, se considera en la investigación ya que esta radiación se presenta siempre sobre el vehículo durante sus recorridos, logrando así que sea una importante opción para utilizar si se quiere aprovechar lo mayor posible las fuentes de generación alrededor del movimiento y funcionamiento.

Considerando que esta energía viene de la reacción por fusión de Nitrógeno a Helio en el núcleo del sol, transmitiéndola por medio de radiación hacia el espacio, con una intensidad de $3.86 \times 10^{26} \text{ W}$, donde considerando que el sol es aproximadamente $1.5 \times 10^{11} \text{ m}$ de distancia de la tierra, y que la tierra tiene un radio de aproximadamente $6.3 \times 10^6 \text{ m}$, esta recibe solamente un 0.000000045% de esa energía. Sin embargo, esto sigue significando una increíble cantidad de $1.75 \times 10^{17} \text{ W}$, lo que la convierte en la mayor fuente de energía natural y limpia de la cual se beneficia la tierra [21].

Por lo que de la misma forma que se aprovecha esta radiación en la infraestructura de establecimientos, edificios, casas, etc., se puede pensar en una alternativa donde colectores solares permitan la captación de energía del sol para la carga de baterías o redistribución de sistemas eléctricos, como se ha explicado.

Los paneles solares colocados dentro de la estructura del cortaviento o el cofre de un tractocamión podría ser una buena implementación de esta conversión de energía, como se da en el reciente desarrollo del vehículo *Lightyear 0 solar vehicle car* o en el Toyota Prius PHV, Figura 12, el cual tiene en el cofre y en el panel superior del toldo paneles solares que alimentan sus baterías. O incluso la implementación de paneles solares al scooter [22, 23].



Figura 12 Prototipo de implementación de paneles solares en Toyota Prius PHV [23].

2.3. Antecedentes

Una vez se han explicado algunas de las posibles energías residuales que se generan en un vehículo, las cuales se pueden reutilizar transformándolas en energía eléctrica, es necesario establecer algunas necesidades o requerimientos técnicos para que pueda ser aplicable a un tractocamión clase VIII y con esto seleccionar la más óptima para el desarrollo de un sistema prototipo que mediante su fundamentación teórica y su modelado en software CAD por sus siglas en inglés (Computer Aided Design), se verifique si es factible a desarrollar, los conceptos importantes a tener en cuenta son los siguientes:

- Debe pesar poco
- Debe ser compatible con el resto de los sistemas del vehículo
- Debe necesitar poco mantenimiento
- Ha de encarecer muy poco el producto.

Por lo que en la tabla 3, se muestra que para cada uno de los sistemas existen ciertos requisitos técnicos y con esto, cuál de ellos lo cumple y cual no. Ejemplo de esto es el

Motor Stirling, el cual, si es compatible con el resto del sistema del tractocamión, ya que dependería del calor generado por la combustión para su funcionamiento, además de un sistema de movimiento rotatorio transferido desde el propio MCI y podría utilizarse el aire como fuente de enfriamiento para el ciclo Stirling, sin embargo, no sería muy ligero en peso, ya que sería necesario desarrollar y montar el motor rotativo, que por sí mismo sería pesado, pero además de este sería necesario colocar un generador eléctrico que aprovechara el giro del motor Stirling, lo que se traduce en dos sistemas que ocuparían espacio y estos a su vez encarecerán más el producto, tendría una manufactura o acoplamiento más complejo, ya que el espacio que requeriría sería mayor en conjunto.

Después en la misma tabla 3 se menciona el **Generador eólico**, siendo este sistema una muy probable fuente de energía ya que siempre habrá viento alrededor del tractocamión durante el movimiento, sin embargo, este requerirá muchos componentes, como lo son los sistemas que capten el viento para convertirlo en movimiento mecánico, es decir, necesitaría turbinas, después los generadores que mediante poleas pudieran activarse con el movimiento rotatorio de las turbinas, y quizá un inversor, sin mencionar que todos estos componentes deberán acoplarse mediante elementos de sujeción y soportes, que en conjunto serían complejos de acoplar al reducido espacio disponible dentro de algún espacio en el tracto camión. Encarecería el producto final, pero requiere de mantenimientos periódicos, como sucede en los generadores eólicos terrestres.

Otra opción es el **Frenado regenerativo**, el cual ya es empleado en muchos vehículos de alta gama eléctricos, debido a su alta eficacia, resaltando que al depender de la resistencia generada por el frenado de todo el peso de un vehículo, en este caso, beneficiaría mucho que los tractocamiones son bastante pesados, lo cual permitiría que un sistema de regeneración en los frenos captara mucha energía eléctrica, aunque la complicación aquí viene cuando se aplican los sistemas, ya que en un vehículo son de dimensiones grandes y deben instalarse a la par del sistema de transmisión de potencia. En donde, al ser un tractocamión clase VIII un vehículo que necesita un torque bastante elevado para moverse, también lo necesita de la misma forma para frenar, y un sistema de frenado regenerativo para un vehículo de estas características, sería costoso de aplicar. Estos vehículos que ya

cuentan con este tipo de sistemas son muy costosos, considerando la escala que significaría aplicar lo mismo en un vehículo de carga pesada, se convertiría en un aumento de precios elevado.

Una más de estas opciones viables de aplicación es la implementación de los **Paneles solares**, aquí, si se suplen paneles del vehículo como lo pueden ser segmentos de la carrocería, o incluso en los elementos de carga que se conectan a los tractocamiones, por estos paneles solares el peso se compensaría, ya que cambiar un panel del rompevientos de un tractocamión, por uno que contenga internamente segmentos de paneles solares, haría que no se agregara peso extra, requeriría poco mantenimiento y sería muy compatible, considerando que los trayectos largos de estos vehículos hacen que se encuentren bajo la irradiación de los rayos solares durante muchas horas día con día, sin embargo, sería un sistema muy costoso de implementar en relación con los costos de producción, en el sentido de la cantidad y calidad de los paneles que deberían utilizarse. Porque como ejemplo de esto, cambiar un panel de plástico de la carrocería, por un panel que contenga los paneles, sería mucho más costoso para una producción en serie de vehículos.

Algo usado comúnmente es agregar **alternadores** de alta capacidad de generación de energía, donde un ejemplo de aplicación de esto es en sistemas de audio de vehículos a nivel competitivo, en donde se requiere demasiada carga eléctrica y a los motores les adaptan más y más alternadores. Pero en tractocamiones hay un problema, y es que el espacio dentro del cofre, a los alrededores del motor está muy optimizado para que sea ya el mínimo, entonces agregar otro alternador sería complejo por esa parte, además, una situación importante que ocurre al agregar nuevos componentes a las poleas, ya que necesitaría agregar una polea más impulsada por una banda con el giro del motor. Entonces, esta nueva banda generaría más fuerzas o cargas sobre los ejes ya calculados para la transmisión de potencia entre las poleas del motor, por lo que no es factible esta opción.

También se mencionan **Materiales piezoeléctricos**, que funcionan generando la carga eléctrica con las deformaciones que ocurren en el propio material, sin embargo, los lugares donde se generan constantes deformaciones elásticas en el tractocamión son principalmente en las llantas que se deforman al pasar sobre las irregularidades de los caminos, el movimiento de los neumáticos en este caso podría contribuir a que un material piezoeléctrico pudiera generar carga eléctrica, y colocando bastantes, considerar una buena relación de costo de implementación y carga eléctrica desarrollada, pero, esta deformación es relativa y no estable, porque muchas de las veces es muy impredecible el movimiento de los neumáticos por los caminos en el trayecto, para la generación de carga aquí sería necesario que existieran condiciones óptimas de deformación de los neumáticos, que permitan deformaciones estables a través del tiempo de movimiento para los materiales piezoeléctricos, siendo esto la principal problemática al pensar en implementar un sistema con estos materiales.

Finalmente, la opción más recomendable de las mencionadas en la tabla 3 es la implementación de motores con **Módulos termoelectricos**, utilizando el calor generado por el motor para la parte caliente, y la temperatura del refrigerante del motor para la temperatura baja necesarias para la generación de corriente con los módulos.

Este sistema requiere poco mantenimiento, o uno muy sencillo ya que solo se debe tener en óptimas condiciones una pasta de conducción de calor entre componentes, también sería ligero en peso ya que un sistema colocado en el sistema de escape de gases del motor sustituiría a un fragmento de la línea de tubería del escape, semejante a el espacio utilizado por un catalizador o un silenciador, pero colocado lo más cerca posible del múltiple de escape, en donde se concentra la temperatura más alta proveniente de la combustión interna, además, el sistema tendría una manufactura sencilla de ensamble y no encarecería demasiado el producto, siendo los componentes más costosos únicamente los módulos.

Tabla 3 Matriz de decisiones para la selección del sistema generador de energía eléctrica.

Requisitos técnicos para la aplicación de sistemas en un tractocamión clase VIII						SUMATORIA	
Generadores de energía eléctrica	Es ligero en peso	Es compatible con algún sistema del vehículo	Necesita poco mantenimiento	Encarece poco el producto	Es sencilla su manufactura	SI	NO
Motor Stirling	X	✓	X	X	X	1	4
Módulos termoelectrónicos	✓	✓	✓	✓	✓	5	0
Frenado regenerativo	X	✓	✓	X	X	2	3
Alternador extra	✓	✓	✓	✓	X	4	1
Materiales piezoeléctricos	✓	✓	✓	✓	X	4	1
Paneles solares	✓	✓	✓	X	✓	4	1
Generador eólico	X	✓	X	X	X	1	4

Por lo que, debido a esto, se mencionará a continuación la explicación de los principales conceptos de la teoría termoeléctrica, el funcionamiento del sistema a utilizar, y las ecuaciones para el desarrollo del tema.

2.3.1. Sistema por desarrollar

Posterior a la toma de decisiones respecto a el mejor sistema generador de corriente, el cual es el que genera carga mediante módulos termoeléctricos calentados por la temperatura elevada de los gases de escape provenientes de la combustión del motor Diesel. El sistema será colocado a la salida de los gases de combustión en la tubería de escape que comienza desde la salida del turbocompresor, es decir, sustituyendo un segmento de la línea de tubería de manera similar a como se colocan los catalizadores o los silenciadores en los escapes de los vehículos, además de tener un disipador de calor por el lado frío de módulo TEG por sus siglas en inglés (Thermoelectric generator) el cual se mantendrá a temperatura baja utilizando el refrigerante del motor.

En la Figura 13, se muestra el acomodo de cada uno de los componentes, en la parte central en color gris, se sitúa la línea de escape, esta parte será la que permitirá la compatibilidad con el sistema de escape proveniente desde el turbocompresor en la salida del múltiple de escape desde la cámara de combustión, sobre esa línea se conecta la línea de escape del sistema TEG. Continuando en la Figura 13, de manera radial, se encuentra el colector de calor, el cual está en contacto con la línea de escape para poder percibir el calor generado por los gases de escape que pasan dentro de la línea de escape, y así calentar al colector, además de que este tiene espacios para colocar los módulos TEM (Thermoelectric modules) en color naranja.

Más externamente se encuentra en color azul el colector del refrigerante, llamado así porque internamente tendrá ductos por los cuales cruzará el líquido refrigerante del motor, el cual permitirá mantener refrigerado el sistema y principalmente conservar una temperatura baja del lado frío de los modulo TEM, además de contar con un disipador de calor, que permitirá auxiliar a la disipación de calor con el aire circundante en el sistema dentro del motor.

Finalmente, en los extremos del sistema se encuentran las bridas de sujeción, que son únicamente coples o aditamentos que permitan la conexión con los extremos de la línea de escape propia del motor.

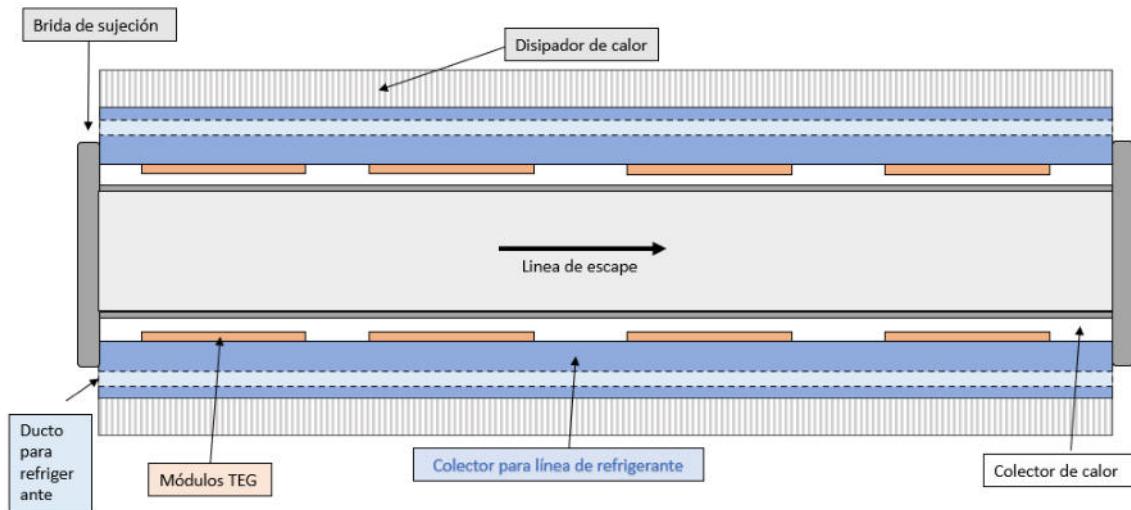


Figura 13 Esquema simple de componentes del sistema TEG.

Este esquema de la Figura 13 permite ejemplificar de manera simple cuales son los componentes y su acomodo en el sistema, para continuar con el desarrollo, diseño y optimización de cada uno de ellos a continuación.

Este fenómeno de generación de energía eléctrica mediante un diferencial de temperaturas se rige por la teoría de la termoelectricidad y los efectos desarrollados por científicos, mencionados a continuación.

2.3.2. Termoelectricidad.

La termoelectricidad se considera como la rama de la termodinámica superpuesta a la electricidad donde se estudian fenómenos en los que intervienen el calor y la electricidad, el fenómeno más conocido es el de electricidad generada por la aplicación de calor a la unión de dos materiales diferentes. Si se unen por ambos extremos dos alambres de distinto material (este circuito se denomina termopar), y una de las uniones se mantiene a una temperatura superior a la otra, surge una diferencia de voltaje que hace fluir una corriente eléctrica entre las uniones caliente y fría. Este fenómeno fue observado por

primera vez en 1821 por el físico alemán Thomas Seebeck, y se conoce como efecto Seebeck [24]-

2.3.3. Efecto Seebeck

Un físico alemán descubrió el primer efecto termoeléctrico en 1821. Observó que cuando dos conductores diferentes son conectados en sus extremos además de que cada uno se mantiene a temperatura diferente respecto a el otro, se desarrolla voltaje a través de las uniones de los materiales. El voltaje desarrollado está directamente relacionado con las propiedades de los materiales y el diferencial de temperatura entre ambos. Los dispositivos que funcionan de esta manera se conocen como termo par, y los conductores que se usan para esto se conocen como los termoelementos.

La Figura 14 muestra un diagrama de un circuito termoeléctrico formado por un termoelemento A y un termoelemento B conectados de forma que se conectan en los puntos 2 y 3.

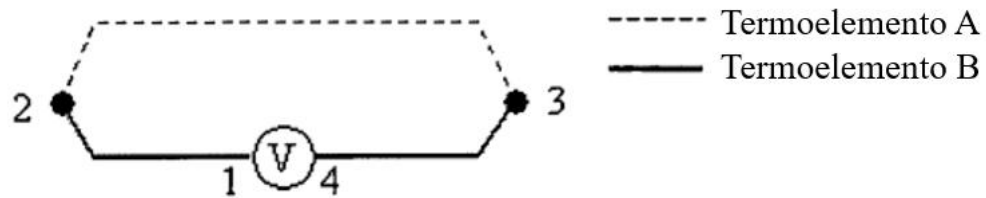


Figura 14 Esquema simplificado de un termopar [24].

Cuando esas uniones se mantienen a diferentes temperaturas, un diferencial de potencial será desarrollado a través de las uniones, dicho potencial puede ser medido colocando un voltímetro en el circuito. El diferencial de voltaje (ϕ_{14}) a través de las terminales del voltímetro se puede expresar mediante la siguiente ecuación.

$$\phi_{14} = S_{AB}(T_2 - T_3) \quad (\text{ec } 15)$$

donde, S_{AB} se conoce como el coeficiente de Seebeck relativo y T_2 y T_3 son las temperaturas de las uniones 2 y 3, respectivamente. El coeficiente de Seebeck es la propiedad termoeléctrica del circuito y se puede definir como el coeficiente general de Seebeck de termoelementos como se muestra a continuación.

$$S_{AB} = (S_A - S_B) \quad (\text{ec } 16)$$

donde, S_A y S_B son los coeficientes de Seebeck absolutos del termoelemento A y del termoelemento B respectivamente. S_A y S_B también se pueden definir como funciones de temperatura dependiendo de la composición química del material [24].

La ecuación 15 se puede derivar con expresiones para desarrollo de voltaje en cada segmento del circuito mostrado en la Figura 15. La expresión teórica para el desarrollo del voltaje a través de un segmento, del punto x al punto y de los termos elementos se define de la siguiente fórmula.

$$\int_{\varphi_x}^{\varphi_y} d\varphi = \int_{T_x}^{T_y} SdT \quad (\text{ec } 17)$$

donde, S es el coeficiente de Seebeck del segmento.

Sin embargo, para un caso unidimensional, la relación entre el gradiente de temperatura y el gradiente de voltaje se pueden derivar diferenciando la ecuación 17. con respecto a una variable espacial x .

$$\frac{d\varphi}{dx} = S \frac{dT}{dx} \quad (\text{ec } 18)$$

La expresión anterior también puede ser escrita de la siguiente manera.

$$V\varphi = S\nabla T \quad (\text{ec } 19)$$

Esta expresión muestra la relación que se utiliza para la generación de calor interna debido a los efectos termoeléctricos diferentes que ocurren por este voltaje interno, o viceversa.

2.3.4. Efecto Peltier

En 1834, un físico francés Peltier descubrió un efecto termoeléctrico que era opuesto a el efecto descubierto por Seebeck. Él observó que se liberaba calor en una de las uniones y absorbido en la otra de las uniones del termopar, cuando una corriente eléctrica cruzaba a través de estas. La dirección del flujo de calor entre dichas uniones podía invertirse dependiendo de la dirección que tuviera la corriente, es decir, cual fuera el lado positivo y cual el negativo. El efecto Peltier ocurre cuando una corriente se introduce o se induce en el termopar. Por lo que solamente cuando haya una diferencia de temperaturas en ambos lados del termopar, es cuando se presentara el efecto de la absorción y del

desprendimiento de calor, la dirección del flujo de corriente respecto a los dos materiales se muestra en la Figura 15.

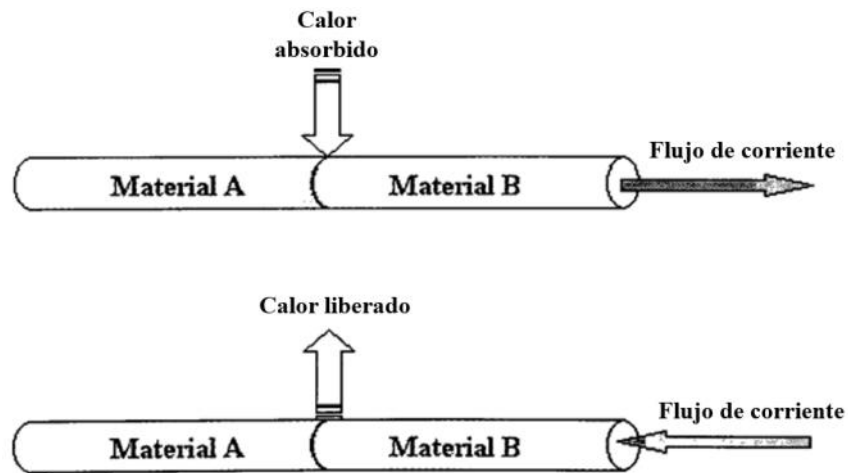


Figura 15 Efecto Peltier y corriente en función de la dirección de la transferencia de calor [24].

2.3.5. Efecto Thomson

En 1857, Thomson descubrió que el calor era absorbido o liberado en un conductor cuando una corriente eléctrica pasa del material con una temperatura hacia el mismo material a una temperatura diferente. La dirección del intercambio de energía entre el material conductor y sus alrededores depende de la dirección neta de la corriente y del flujo neto de calor en el conductor. Como se puede observar en la Figura 16, el calor es liberado cuando sobre el conductor se mueven en el mismo sentido tanto la corriente eléctrica como el flujo de calor. Pero cuando la corriente y el flujo de calor se dirigen en direcciones opuestas, es cuando se presenta la absorción de calor.

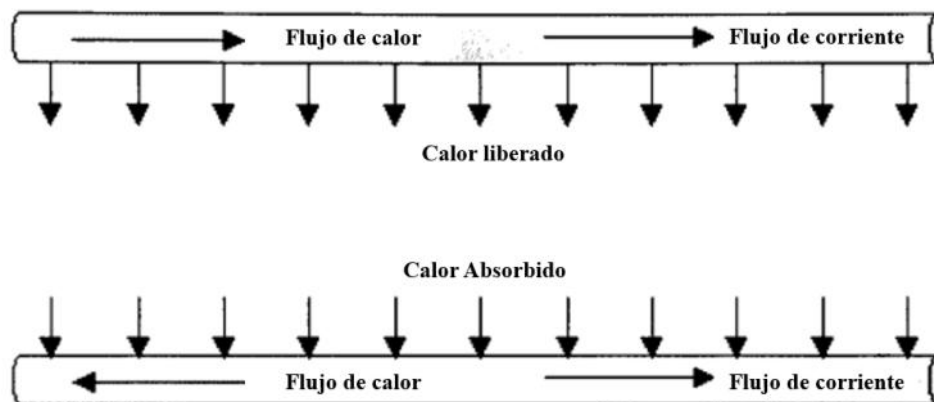


Figura 16 Efecto Thomson, dirección de corriente y flujo de calor [24].

2.3.6. Efecto Joule

El efecto de Joule es un efecto termoeléctrico irreversible que causa un calentamiento interno de un conductor con corriente interna. El calor debido al efecto de Joule es siempre absorbido en un conductor sin importar la dirección de la corriente o una diferencia de temperaturas entre ambos materiales. Solamente depende de la corriente y de la resistividad del conductor. En la Figura 17 se muestra el sentido de que es lo que sucede con cada uno de estos efectos mencionados, por una parte, como el efecto Seebeck genera electricidad a partir de la manipulación térmica de los módulos, y respectivamente como el modelo de Joule y Thomson generan efectos térmicos en función de la corriente eléctrica que se utilice.

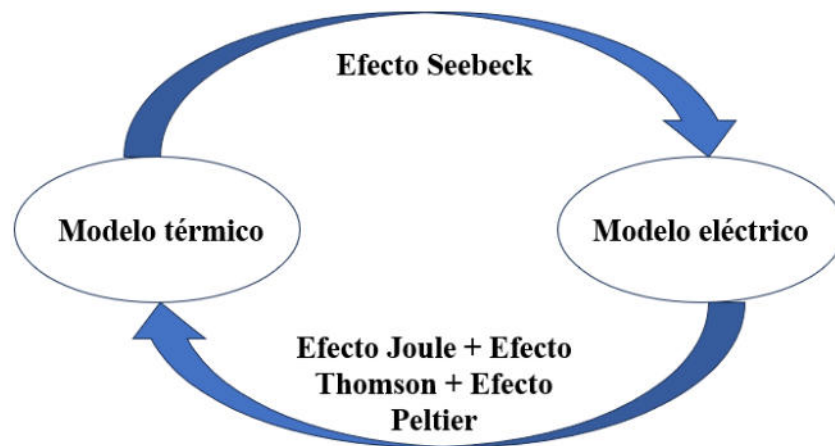


Figura 17 Sentido del efecto térmico y eléctrico.

Entonces en el entendido de las propiedades de funcionamiento de cada uno de estos efectos termoeléctricos, en el presente desarrollo de sistema, al elaborar un sistema generador de corriente eléctrica en base al efecto termoeléctrico, se fundamenta que el efecto a través de los módulos TEM este dado debido al efecto de Seebeck.

2.3.7. Dispositivos termoeléctricos

Los dispositivos termoeléctricos basados en el efecto de Seebeck convierten la energía térmica en energía eléctrica, mientras que los dispositivos basados en el efecto de Peltier hacen lo inverso.

2.3.8. Generadores termoeléctricos TEG

El propósito de un generador termoeléctrico es el de proveer de energía o de carga a un circuito conectado. Como se muestra en la Figura 18, consiste en dos conductores diferentes conectados en sus puntas hacia dos colectores de calor a diferentes temperaturas, regularmente uno a mayor T_H que el otro T_C .

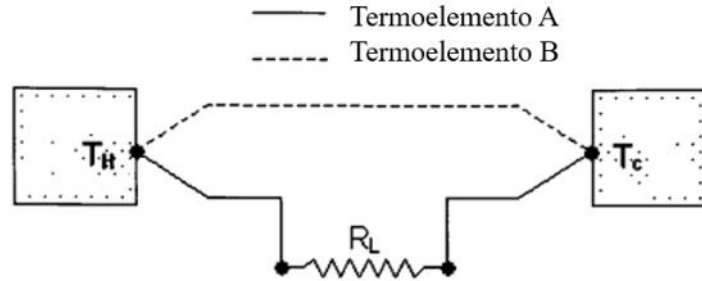


Figura 18 Generador termoeléctrico, esquema simple de componentes [24].

Cuando las uniones del termopar son colocadas en estos colectores de calor, se desarrolla un voltaje φ a través de la resistencia R_L . El voltaje φ es una función de la diferencia de temperatura entre estos colectores, mientras que la magnitud del voltaje y de la corriente en el circuito pueden mostrarse como la siguiente expresión.

$$\varphi = S_{AB}(T_H - T_C) \quad (\text{ec } 20)$$

$$I = \frac{\varphi}{R_L + R} \quad (\text{ec } 21)$$

donde R es la resistencia interna del circuito Seebeck.

El voltaje a través de la Resistencia de la carga se puede obtener mediante la multiplicación por la magnitud de la corriente como se muestra a continuación.

$$\varphi_L = IR_L = \frac{\varphi}{R_L + R} R_L \quad (\text{ec } 22)$$

Y la potencia de salida P del generador termoeléctrico es el producto de la corriente y el voltaje a través de la resistencia.

$$P = \left(\frac{\varphi}{R_L + R} \right)^2 R_L \quad (\text{ec } 23)$$

Si se considera la mayor eficiencia de operación, entonces la resistencia de la carga debe ser igual a la resistencia interna del circuito termoeléctrico $R_L = R$, entonces la potencia

máxima $P_{m\acute{a}x}$ que se puede obtener del generador termoelectrico está dada como se muestra a continuación.

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{\varphi^2}{4R} \quad (\text{ec } 24)$$

A continuación, en la Figura 19 se muestra un esquema de los componentes de un generador termoelectrico, el cual tiene sus dos colectores de calor, el lado caliente y el lado frio, una fuente de calor, un disipador de calor, y en medio de estos componentes un módulo termoelectrico con sus elementos respectivos semiconductores que generan la corriente eléctrica. Este diagrama se utilizará más adelante para comprender el desarrollo del prototipo a diseñar [24].

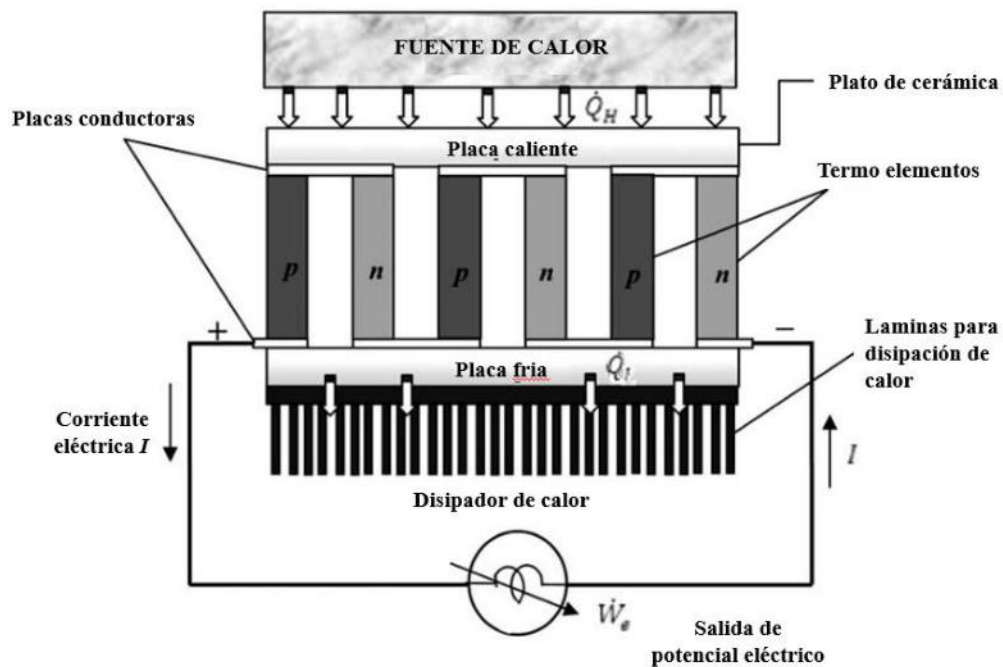


Figura 19 Diagrama de los componentes y acomodo de un generador termoelectrico simple [25].

2.3.9. Aplicaciones de generadores termoelectricos TEG

a) *Calor residual en aplicaciones domésticas.*

Se reportó que un generador termoelectrico es usado en una central de calor doméstica, como lo puede ser una estufa, con los módulos TEM ubicados entre la fuente de calor y un desagüe de agua. El calor que se obtienen de los quemadores de gas pasaba a través

del generador antes de llegar al intercambiador de calor que enfría el dispositivo. Ese calor convertía alrededor del 5% de calor en corriente eléctrica. Donde al usar dos módulos de PbTe operando entre los 550 y 50 grados Celsius, respectivamente, podía generar 50W de potencia para la recirculación de la bomba de enfriamiento [26].

b) Calor generado por los gases de escape de los vehículos.

Como se muestra en la Figura 20, se desarrolló un sistema de recuperación de energía calorífica para un vehículo. Donde una bomba provee de agua del refrigerante el sistema. [24], los gases de escape pasan por el lado caliente de los TEM mientras que el refrigerante proveniente de la bomba pasa por el lado frío, ambos en sentidos opuestos logrando la diferencia de temperatura necesaria para que el generador funcione.

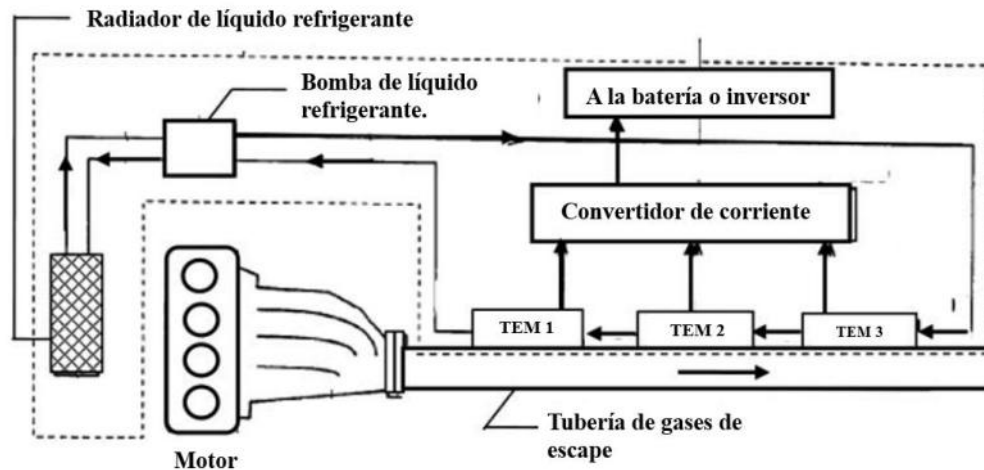


Figura 20 Diagrama que muestra una patente aplicada a un automóvil para convertir calor residual directamente en potencia eléctrica utilizando un generador termoeléctrico [27]

c) Aplicaciones de calor residual en industrias

La mayoría de las aplicaciones de este tipo de sistemas usualmente se dan en las industrias. Ya que mediante los procesos que desarrollan se genera muchísimo calor desperdiciado, plantas de manufactura y lugares por el estilo. Un ejemplo de esto es un boiler o una turbina de gas, que mediante la aplicación sobre estos sistemas de TEGS se podrían reducir costos, incrementar la estabilidad de funcionamiento y ahorrar mucha energía eléctrica cuando se implementan. Se muestra en la Figura 21 una fotografía de un generador de corriente termoeléctrico usado en un sistema de gas natural, usando la energía de la diferencia de temperaturas entre las líneas caliente y fría de gas natural de glicol para un ciclo deshidratador industrial [28].



Figura 21 . Fotografía de un generador de energía termoeléctrica que produjo energía para la protección catódica del pozo y la línea de gas, que utilizó la diferencia de temperatura entre las etapas fría y caliente del ciclo del deshidratador de gas natural con glicol [28].

d) Calor generado por la quema de residuos sólidos

Recientemente, se ha planteado la posibilidad de aprovechar el calor desarrollado por los municipios que queman residuos sólidos. Como ejemplo, al final del siglo XXI en Japón los residuos sólidos per cápita son de 1 kg por día y la cantidad de energía que se genera es equivalente a aproximadamente 18 millones de kJ. Se reportó que un módulo termoeléctrico de 60W fue instalado cerca de la planta incineradora generando una eficiencia del 4.4%. Con una temperatura máxima entre los 823 K y los 973 K para el lado caliente, y con aire forzado para la parte fría del módulo. Con esto con 100 toneladas de residuos sólidos quemados durante 16 horas al día, podrían generar alrededor de 426kW [6].

La Figura 22 muestra una fotografía del generador termoeléctrico mencionado de Japón, por el centro de conservación de energía Japones, que es usado como fuente de energía con el calor de la quema de residuos generando una densidad de corriente eléctrica de 100 kW/m³.

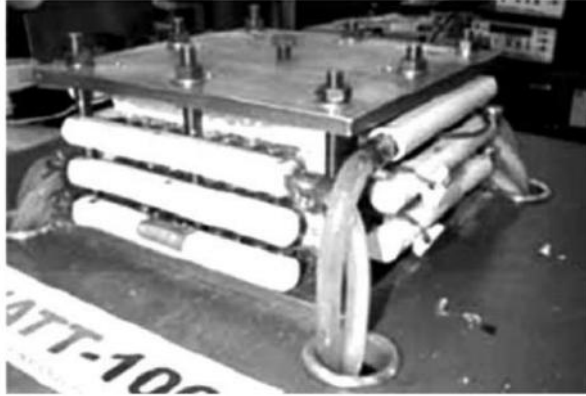


Figura 22 Fotografía de un generador termoeléctrico desarrollado por el centro de conservación de energía japones [28].

Actualmente existen muchos estudios e investigaciones en los que se analizan sistemas de alta potencia, en una amplia variedad de aplicaciones posibles, en el sentido de cuanta cantidad de energía se utiliza y cuanta energía eléctrica se genera, Mohammad Ruhuk [29], explica esto después de un censo de diversas fuentes y aplicaciones donde ejemplifica el área de aplicación, el número de módulos TEG utilizados, la potencia desarrollada para sectores automotrices, solares y de procesos con calor residual principalmente, incentivando esto al presente desarrollo del proyecto.

Un ejemplo, es la aplicación de sistema generador que propone Cekmas Cekdin [30], quien utilizó un módulo Peltier colocando aluminio para aumentar la temperatura del lado caliente y para el lado frío del módulo, lo sumergió en agua hasta la mitad. Dentro de los resultados más importantes, resaltó que un parámetro crucial para el buen funcionamiento de este tipo de dispositivos es estabilizar las temperaturas a ambos lados de los módulos.

Otro aspecto muy importante para tener en cuenta es que cuando se utilizan varios módulos TEG en conjunto, la forma de interconexión entre estos también cambiará el resultado final de entrega de potencial eléctrico total del sistema TEG, Nganyang Paul [31], desarrolló simulaciones de potencial eléctrico con 100 TEGs con diferentes configuraciones eléctricas respecto a la conexión y resistencia entre estos, para conocer la variación en la carga eléctrica generada. Concluyendo que desde el inicio debe tener en cuenta la resistencia que tendrán dichas conexiones, y que en base a la experimentación

que realiza, la conexión en serie y o en paralelo, serán las más beneficiosas al momento de intentar obtener la mayor carga en conjunto de los módulos TEM.

Específicamente en los motores Diesel, o en el sistema de escape de estos, se pretende establecer el sistema del presente proyecto, por esto, el análisis desarrollado con un generador TEG [32], muestra la experimentación física de un prototipo d aplicado a un motor que opera de forma externa a un vehículo, dentro de un laboratorio, mostrado en la Figura 23.

Un resultado importante encontrado en este artículo fue el impacto de la distribución y acomodo de temperaturas sobre cada uno de los módulos; ya que como se observa en la Figura 23, los gases de escape entran por uno de los extremos del sistema, y circulan hacia el otro extremo, por lo que la temperatura en los módulos se distribuye de diferente manera.

La cantidad de corriente generada en función de la conexión de los módulos es indicada en color rojo y remarcada con bordes color negro en cada una de las configuraciones de los módulos TEM conectados entre sí (Figura 23), y su respectivo desempeño. Estos aspectos fueron considerados al momento de diseñar la propuesta de diseño del sistema de esta investigación.

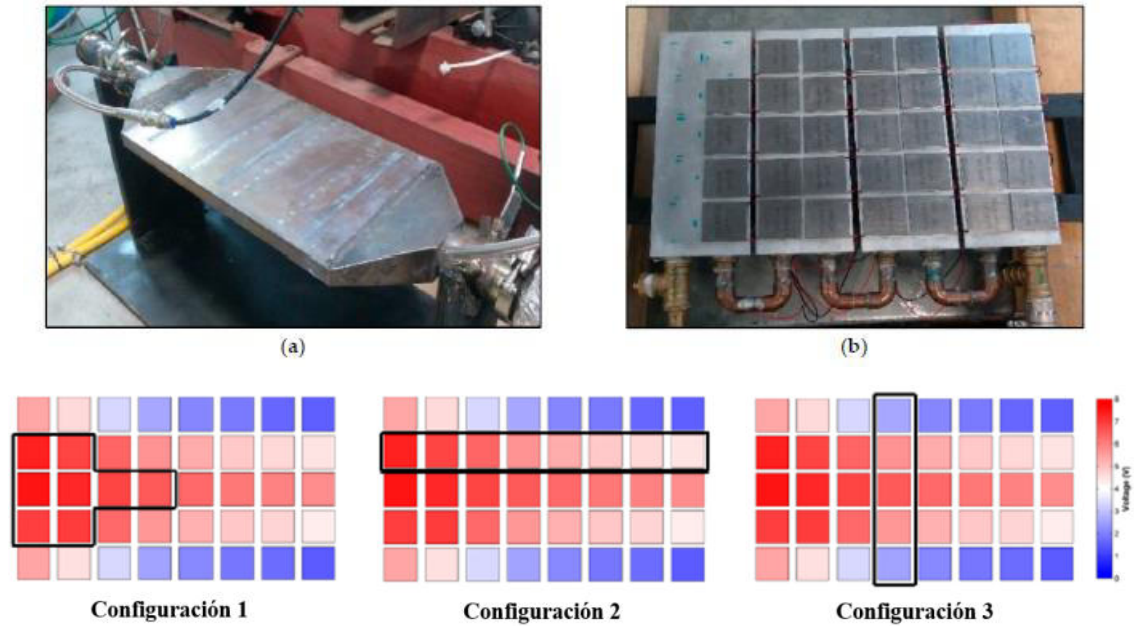


Figura 23 Prototipo de laboratorio de sistema TEG en motor Diesel y conexiones en grupos para los módulos TEM [32].

Es importante mencionar que dentro de los materiales semiconductores de cada módulo TEM, pueden haber variaciones de operación en función de variables como lo son los coeficientes de Seebeck ya mencionados, las temperaturas pico de operación tanto del lado caliente como del lado frío, la conductividad eléctrica, etc., donde los mejores materiales para esta función son los semiconductores de Telurio [33], Dong-Wei Ao [34] señalan que, tanto el Telurio como el Bismuto son los mejores candidatos para un buen desempeño de los semiconductores dentro de los módulos TEM, y con esta información se realizó una búsqueda o selección de módulos en función de los posibles proveedores existentes para el sistema a proponer durante este proyecto.

Finalmente, otro parámetro significativo son los métodos de enfriamiento del sistema, ya que pueden ser muy variados, como es el caso de la experimentación realizada con diferentes acomodos de la parte en sistemas que llevan el fluido o gas refrigerante, todo esto llevando a el mismo objetivo de desarrollo, el cual es el diseño, rediseño y optimización de los sistemas hasta lograr la uniforme distribución de temperaturas sobre los módulos TEM [35].

2.4 Análisis de elemento finito FEM para simulación térmica.

2.4.1 ¿Qué es el método del elemento finito?

El método del elemento finito FEM, es una técnica numérica para la resolución de problemas que se pueden describir con ecuaciones diferenciales parciales, donde un dominio de interés para un estudio se representa como un ensamble de elementos finitos, donde las funciones de aproximación para cada uno de estos se conectan entre sí, transformando un problema físico continuo en un problema físico discreto.

La aproximación por partes de modelos físicos con elementos finitos brinda una muy buena precisión de resultados incluso si las funciones son sencillas, mientras más número de elementos, mejor precisión, en la Figura 24 se ejemplifica el sentido de realizar una aproximación por discretización de una superficie. Esta técnica será útil al momento de realizar una simulación en software de ingeniería asistida por computadora, de modo que permita generar una representación computarizada del sistema funcionando, aplicando las temperaturas de operación, y mediante esta aproximación numérica observar los resultados de transferencia de calor y las temperaturas desarrolladas, generando un proceso de experimentos de diseño en cada uno de los componentes.

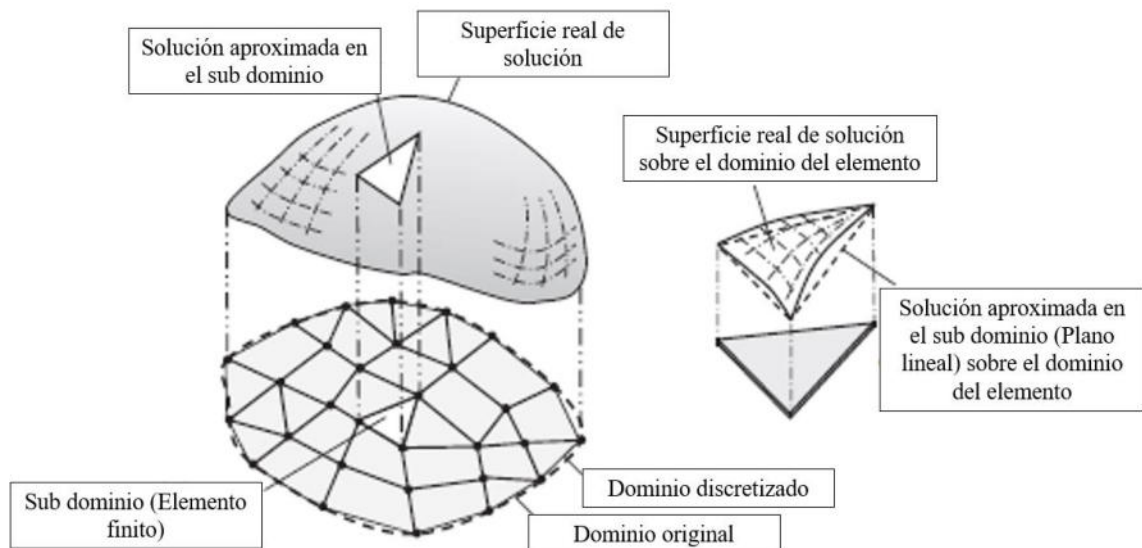


Figura 24 Aproximación de una superficie curva con un elemento con 3 nodos [36].

2.4.2 Etapas del elemento finito

1. Discretizar el sistema:

El primer paso es dividir una región para solución en un determinado número de elementos que sea finito generando una malla sobre el componente. Esta malla consiste en matrices cuyos nodos y elementos están interconectados, generalmente es generada por un programa CAD.

2. Funciones de interpolación: Estas funciones se usan para interpolar las variables sobre el elemento, con ecuaciones polinomiales de las cuales el grado depende del número de nodos asignado al elemento, es decir, como ejemplo si es un elemento tetraédrico, tendrá cuatro nodos, y será de grado cuatro.

Encontrar las propiedades del elemento: La matriz de solución para elemento finito debe establecer como se relacionan los valores de los nodos de la función con los otros parámetros. Como ejemplo de esto, un sistema donde se busquen resultados de esfuerzos desarrollados por una carga y una deformación en una viga cantiléver, donde algunas de las variables de la ecuación son la deformación, el desplazamiento, la carga aplicada, y el área transversal del elemento, el módulo de elasticidad y la longitud. Donde:

$$[F] = [K][u] \quad (\text{ec } 25)$$

U es el vector de desplazamientos, y F es el vector de fuerzas aplicadas, K es la matriz de rigidez del sistema, mencionado el ejemplo anterior sobre una viga cantiléver, tendrá que ver con las propiedades geométricas y del material de la barra como lo es

$$K = \frac{AE}{L} \quad (\text{ec } 26)$$

Siendo aquí A el área transversal, E el módulo de elasticidad del material y L la longitud de la viga. De tal manera que, teniendo esta serie de ecuaciones para este ejemplo, es posible desarrollar el cálculo de esfuerzos siguiendo la Ley de Hooke.

$$\sigma = E\epsilon = \frac{F}{A} ; \epsilon = \frac{u}{L} \quad (\text{ec } 27)$$

$$F = \frac{AE}{L}u \quad (\text{ec } 28)$$

ϵ es la deformación mientras que σ es el esfuerzo generado.

Ecuaciones de los elementos: Para encontrar la ecuación global del sistema para la solución general buscada, de deben ensamblar todas las ecuaciones de cada uno de los elementos. Combinando las ecuaciones locales de estos con todos los demás colocados en la discretización. Además, es necesario agregar condiciones fronteras para asegurar una restricción del cálculo numérico en el software.

3. Resolver la ecuación global del sistema: El sistema de ecuaciones global de elemento finito está definido en cuanto a simetría y espacios. Resolver la matriz completa del sistema producirá el resultado general del sistema, así como los resultados puntuales para cada uno de los nodos.
4. Cálculo de resultados adicionales: Principalmente en los softwares que ofrecen los resultados del cálculo de estos problemas matriciales, se obtienen los establecidos básicamente, como en el ejemplo anterior mencionado de la viga Cantiléver, se obtienen únicamente, al inicio, resultados de fuerzas y deformaciones respectivas. Sin embargo, con estos resultados también es posible obtener algunos extras, como lo puede ser el esfuerzo para cada uno de estos nodos, en este ejemplo [37].

2.4.3 Software para análisis de elemento finito FEM e ingeniería asistida por computadora CAD.

Son varias las disciplinas que sirven de sustento al diseño asistido por ordenador, entre ellas las siguientes:

1. *Modelado geométrico.* Se ocupa del estudio de los métodos de representación de modelos con contenido geométrico. Para sistemas 2D en los que la representación gráfica sean esquemas se suele utilizar modelos basados en instanciación de símbolos. Para modelar objetos de los que solo interese el contorno, (perfiles, trayectorias, carrocerías, fuselajes, etc.) se suelen usar métodos de diseño de curvas y superficies. Para objetos sólidos (piezas mecánicas, envases, moldes, ingeniería civil, etc.) [38].

2. *Técnicas de visualización.* Son esenciales para la generación de imágenes del modelo. Los algoritmos usados dependerán del tipo de modelo, pudiendo variar desde simples Técnicas de dibujo 2D, para el esquema de un circuito, hasta la visualización realista usando trazado de rayos o radiosidad, para el estudio de la iluminación de un edificio o una calzada. Además, se suelen usar técnicas específicas para la generación de la documentación (generación de curvas de nivel, secciones, representación de funciones sobre sólidos o superficies).

3. *Técnicas de interacción gráfica.* Son el soporte de la entrada de información geométrica del sistema de Diseño. Entre estas, las técnicas de posicionamiento y selección poseen una especial relevancia. Las técnicas de posicionamiento se utilizan para la introducción de posiciones 2D o 3D. Las técnicas de selección permiten la identificación interactiva de un componente del modelo, son por tanto esenciales para la edición.

4. *Bases de datos.* El soporte para almacenar la información del modelo, cuando se diseñen objetos de un cierto tamaño, sea una base de datos. El diseño de bases de datos para sistemas CAD plantea una serie de problemas específicos, por la naturaleza de la información y por las necesidades de cambio de la estructura con la propia dinámica del sistema.

5. *Métodos numéricos.* Son la base de los métodos de cálculo y simulación [39]

Algunos softwares de este tipo son ANSYS, NX Siemens, Solidworks, Fusion 360, ABAQUS, Creo CAD Software, etc.

CAPÍTULO 3

EXPERIMENTACIÓN

3.1. Datos técnicos e información sobre el módulo TEM seleccionado.

Con el conocimiento de la aproximación de temperaturas internas en el motor mencionadas en el subtema 3.2, se seleccionó un módulo TEM comercial con un costo relativamente bajo, pero con adecuadas prestaciones de generación de potencia eléctrica. Dicho módulo es un HZ-20HV de la compañía *Hi-Z Technology Inc.*, del cual se muestra un ejemplo en la Figura 25 (a), así como el grafico de potencia desarrollada respecto al diferencial de temperaturas que exista entre el módulo Figura 25 (b).

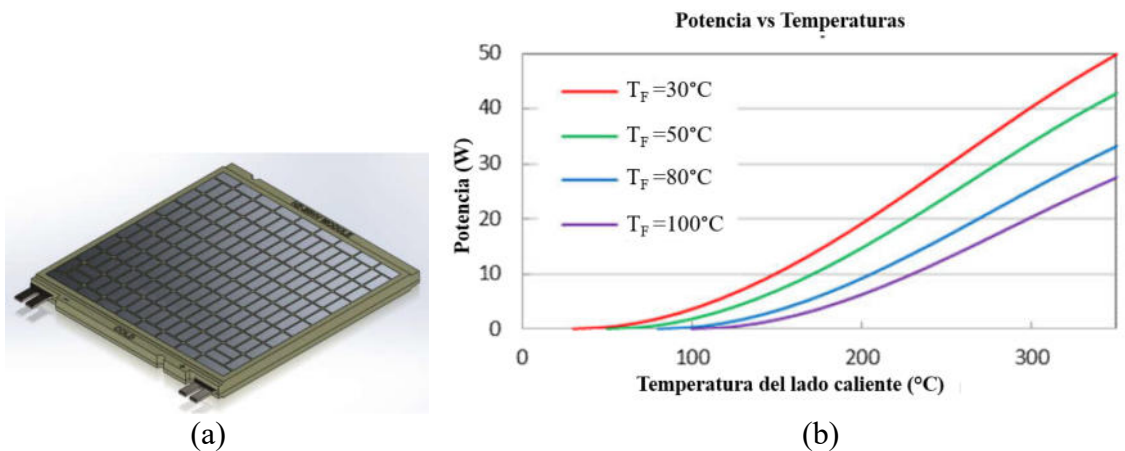


Figura 25 Relación entre la potencia y el diferencial de temperaturas en el módulo TEM [40].

Las especificaciones técnicas, están documentadas en la referencia [31], donde el fabricante establece que la temperatura máxima de operación del módulo es de 350°C ; sin embargo, a esa temperatura la vida útil del mismo se reduce, por lo que de acuerdo con el grafico, y teniendo en cuenta las temperaturas que se desarrollan dentro del motor del tractocamión y una posible adecuación del sistema para que trabaje con $T_{\text{fría}} = 100^\circ\text{C}$ y $T_{\text{caliente}} = 300^\circ\text{C}$, se tendrá un diferencial de temperatura de aproximadamente 200°C , que según el gráfico estaría generando cerca de los 20W por módulo.

Dado esto el desarrollo a continuación plantea el cómo llegar a un diseño óptimo del sistema para mantener esas temperaturas basándose en rediseño de componentes, optimización y resultados de análisis de elemento finito con simulación en software.

3.2. Datos técnicos del motor

En el motor de un tractocamión clase VIII se tienen muchos datos técnicos sobre su funcionamiento, donde para el presente estudio y análisis por elemento finito se utilizarán principalmente las temperaturas de los gases de escape derivados de la combustión en el motor, y la temperatura del refrigerante de este.

En esta tabla 4 se puede ver que la temperatura de los gases de escape es de 440 °C durante un movimiento a velocidad crucero o velocidad nominal de operación. Además de que la temperatura del refrigerante dentro de un MCI se mantiene alrededor de 80°C o 90°C, para asegurar que no haya sobrecalentamientos y que el refrigerante se mantenga estable.

Tabla 4 Datos técnicos del motor de un tractocamión clase VIII.

	Potencia gobernada	Potencia máxima	Torque máximo
Velocidad del motor	1800 RPM	1600 RPM	1100 RPM
Potencia de salida	451 HP	461 HP	346 HP
Torque	1313 lb*pie	1514 lb*pie	1650 lb*pie
Flujo de gases de escape	816 L/s	793 L/s	593 L/s
Temperatura de gases de escape	440 °C	452 °C	452 °C
Flujo del líquido refrigerante	6.8 L/s	6 L/s	4.1 L/s
Temperatura líquido refrigerante	80°C	95°C	95°C

3.3. Diseños preliminares del sistema TEG.

El primer paso para el diseño del sistema del generador termoeléctrico en formato CAD, es establecer las dimensiones base necesarias para cada componente, espacios a tener en cuenta, sujeciones y posibles uniones entre estos, lugares disponibles a considerar dentro del habitáculo del camión en el motor, ya que estos están muy restringidos y existe muy

poca disponibilidad de área circundante al motor en donde se puedan agregar nuevos componentes, como lo es este sistema TEG. Para esto se muestra a continuación el diseño inicial de los componentes del sistema en función de la idea principal de formas para cada componente, y las características necesarias para que los módulos TEM puedan generar corriente eléctrica basado esto en la teoría explicada.

3.3.1. Modelado de módulos TEM.

Uno de los componentes fundamentales del sistema a desarrollar es el módulo TEM (Thermoelectric module), el cual, mediante la investigación de posibles módulos existentes en el mercado, y como se mencionó anteriormente se utilizó un HZ-20HV, con capacidad de generar 20W de energía eléctrica. Al momento de acudir a la información del módulo en la página del fabricante [31], se encuentra lo que se muestra en la Figura 26, es decir, las dimensiones y geometrías del módulo, con las que simplemente se desarrolló en el software NX dicho modelo siguiendo la guía de dimensiones mencionada.

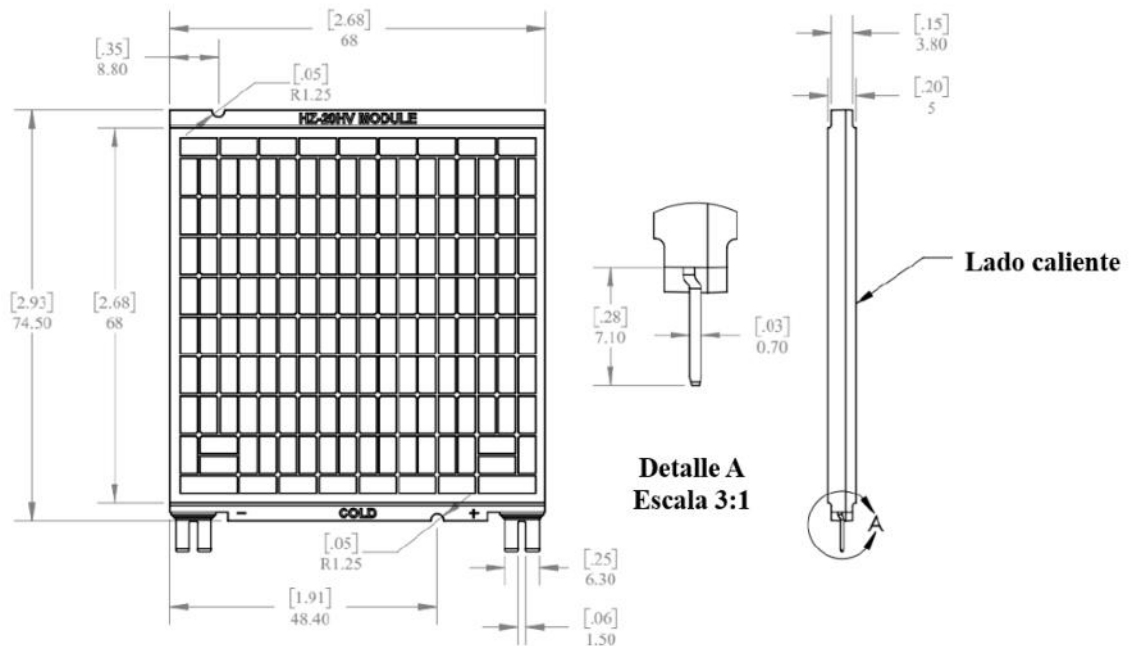


Figura 26 Dimensiones del módulo termoelectrico HZ-20HV [40].

Al tener el CAD del módulo TEM, es posible comenzar a diseñar los componentes del sistema, basando un poco la idea en el concepto del esquema mostrado en el subtema 2.3.1 del presente documento.

3.3.2. Diseño del colector de calor y tubería para línea de escape.

Sabiendo entonces las dimensiones de los lados de cada uno de los módulos TEM, con un largo de 7.45 cm y un ancho de 6.8 cm, se plantea integrar principalmente una tubería que conecte con la línea de escape, supliendo una sección de esta, a semejanza de la instalación de un silenciador. Este nuevo segmento de tubería para la salida de los gases de escape debe contar con una brida de sujeción que permita sujetar el colector de calor.

Para ello basta con establecer el diámetro del segmento de tubería igual al diámetro de la tubería de escape del motor, la cual, suele ser de 4 pulgadas de diámetro, Figura 27. Además, se establece para esta sección una longitud inicial de 38 cm, de tal manera que a lo largo se puedan colocar 4 líneas con 4 módulos TEM sobre el colector de calor que más adelante se mostrara su modelado.

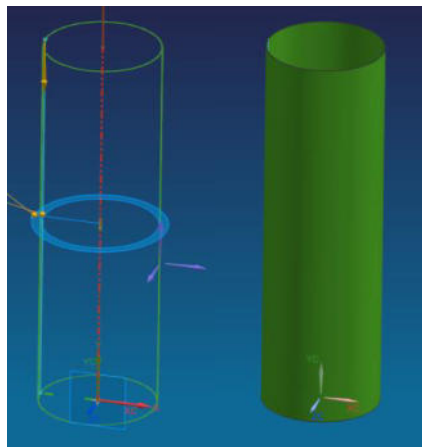


Figura 27 Modelado de tubería de escape para ensamble con colector de calor.

En los extremos de dicha tubería se genera una nueva extrusión con el cubijo mostrado en la Figura 28, para colocar así una brida que permita la sujeción entre la tubería y el colector de calor.

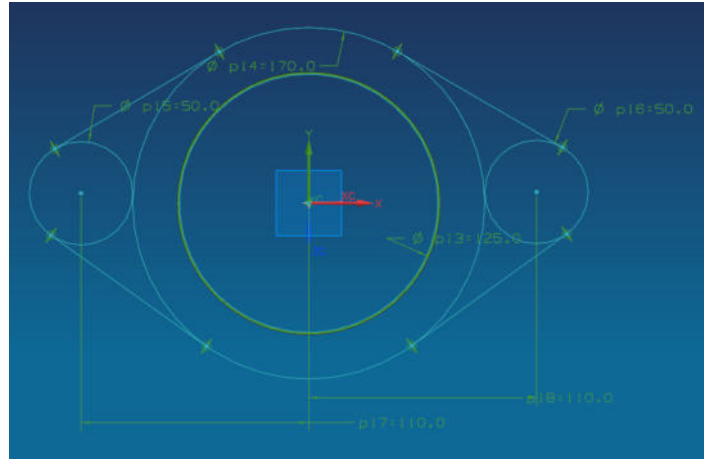


Figura 28 Dibujo brida de sujeción.

Entonces esta brida se extruye con un espesor de 1 pulgada uniéndola a la tubería mediante el software, en ambos extremos con sus respectivos redondeos, esto se muestra en la Figura 29.

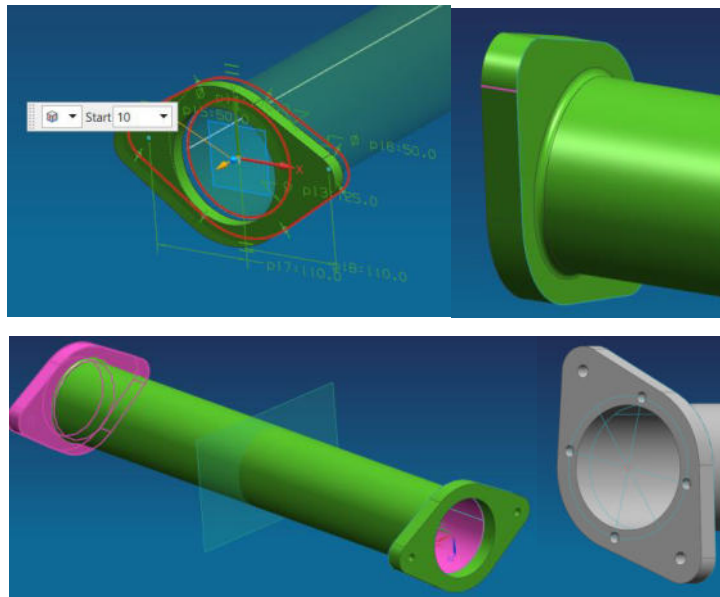


Figura 29 Modelado de tubería de escape para colector de calor.

Como diseño preliminar de la Figura 29, se establecen perforaciones que permitan en la zona interna de la brida, uniones con el colector de calor que se muestra a continuación, además de dos perforaciones sobre la brida de sujeción, para la unión con la tubería original de escape del motor. Posterior a esto, en la Figura 30 se muestra el dibujo que se utilizó para la simulación del modelo preliminar del colector de calor.

En el colector, se crea un modelo en dos partes iguales que se podrán ensamblar, esto con la finalidad de tener en cuenta la facilitación de la manufactura o fabricación de cada componente. En la Figura 30, se observa el dibujo y extrusión de una de las dos mitades del colector de calor, con media circunferencia en la parte central que permita el contacto con la tubería de escape, y con esto la transferencia de calor desde los gases de escape que cruzaran por esa línea, hacia el propio colector, además de en su parte superior y laterales, el espacio donde se puedan colocar los módulos TEM.

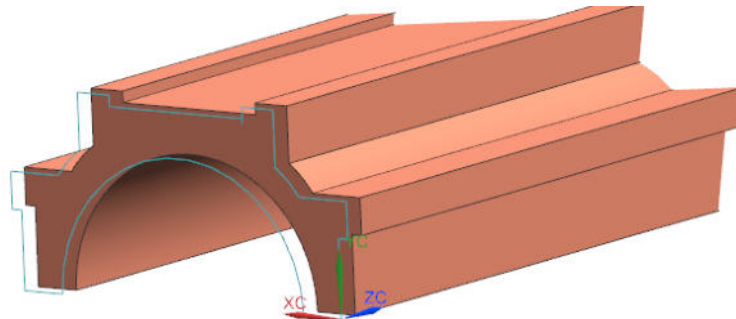
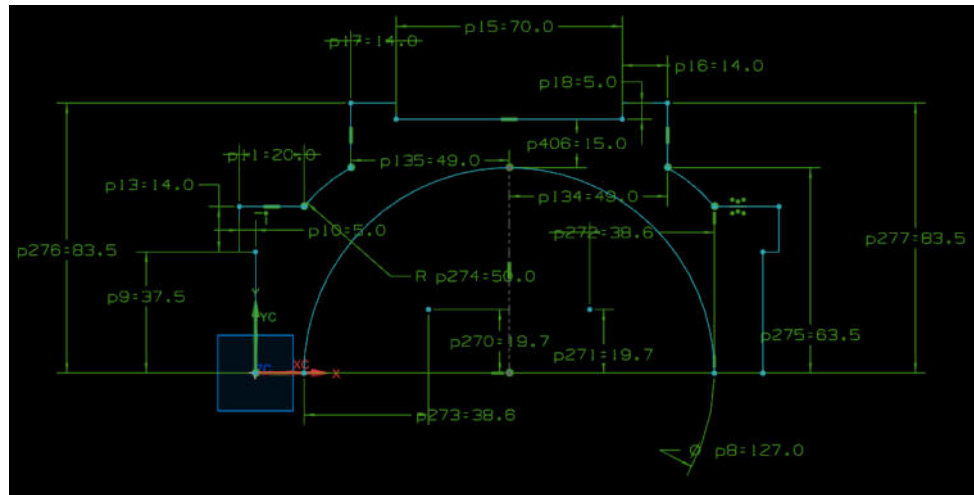


Figura 30 Dibujo y extrusión del colector de calor.

Además de añadir en la parte superior un patrón de extrusiones para cada uno de los espacios para cada módulo TEM, ya que al momento del ensamble de los componentes estos deben situarse de forma que se mantengan en una misma posición, ilustrado en la Figura 31, observándose también una de las una de las cuatro líneas de módulos que tendrá el sistema internamente.

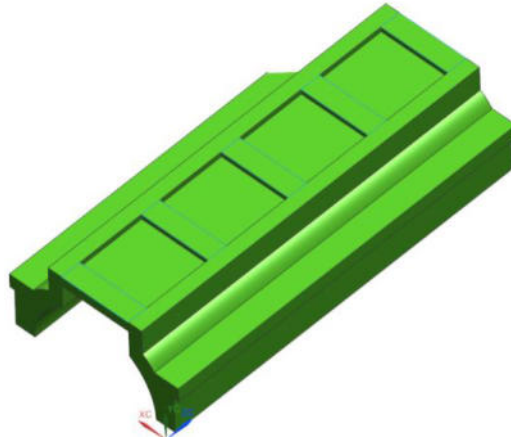


Figura 31 Espacios para los módulos TEM en el colector de calor.

El proceso de generación de los espacios para los módulos TEM se repite en los laterales del colector, después, con el mismo dibujo anterior, se realiza un corte de la parte interna, para que solo este en contacto el área que conducirá el calor al módulo (Figura 32), esto a su vez ayudará con la reducción de peso del componente. Haciendo un efecto de espejo hacia el otro lado para que sea igual.

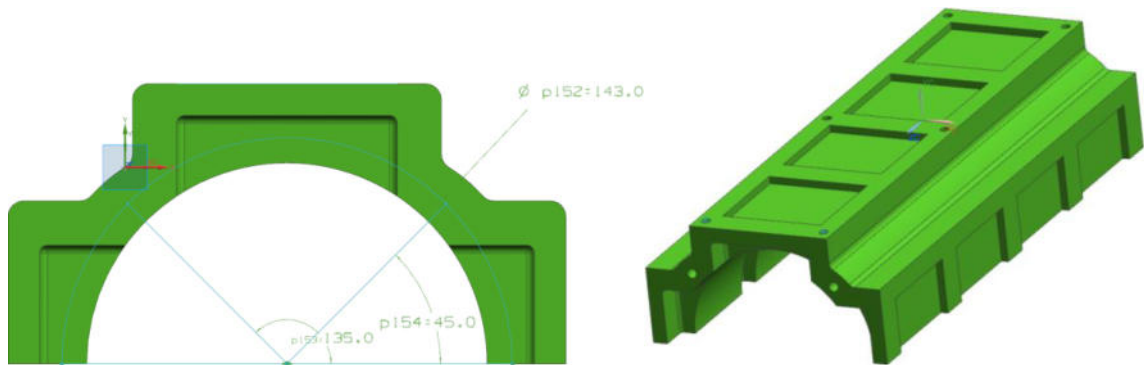


Figura 32 Recorte de geometría para reducción de peso del colector de calor.

Esta primera parte del componente, se utilizará dos veces para lograr los dos lados del colector de calor con las cuatro líneas con cuatro módulos TEM cada una.

3.3.3. Diseño colector del refrigerante y tuberías internas.

Logrando los modelos de la línea de escape y del colector de calor, queda lista la parte del sistema que transferirá calor hacia los módulos TEM, es decir, la parte de temperatura caliente. Ahora se debe generar un colector de refrigerante y dissipador de calor, mismo

que permitirá mantener el otro extremo de los módulos TEM a baja temperatura, siendo el lado frío del sistema.

Para este componente del sistema se comienza con una extrusión de un rectángulo ajustado a las dimensiones de la parte superior del colector de calor ilustrado en la Figura 33, donde se usará un plano intermedio de referencia para realizar la ruta de los ductos por donde va a pasar el refrigerante, en la parte interna de la pieza. Teniendo en cuenta que se concentre la temperatura fría del refrigerante del motor de cierta forma en las zonas donde se colocaran los módulos TEG, y además que no se intercepte con los huecos de los pernos.

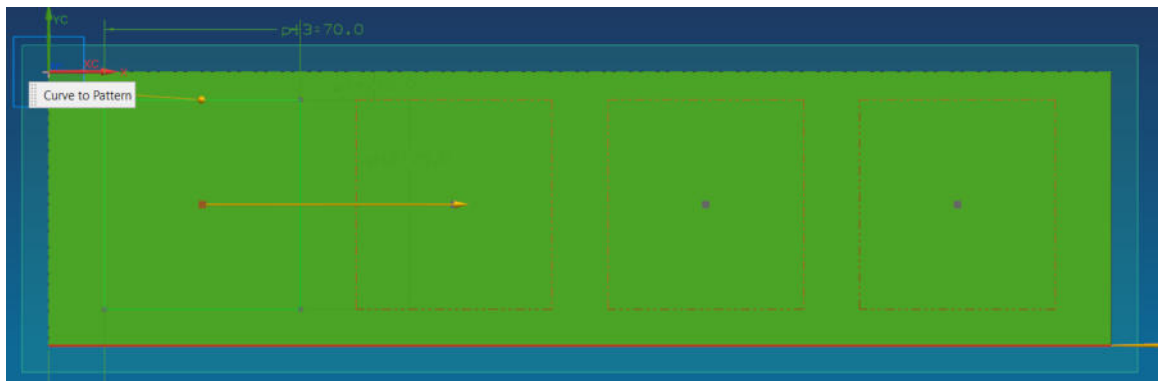


Figura 33 Primera extrusión del colector del refrigerante y guías para colocación de ductos internos.

Como se observa en la Figura 34, teniendo las guías de la ubicación de cada uno de los cuatro módulos TEM, se pueden crear rutas de ductos que permitan estratégicamente la circulación del refrigerante del motor, dentro de estos componentes. Las rutas del refrigerante deben permitir el ingreso y salida de dicho fluido, para esto se muestra en seguida las líneas a seguir para cada uno de los ductos.

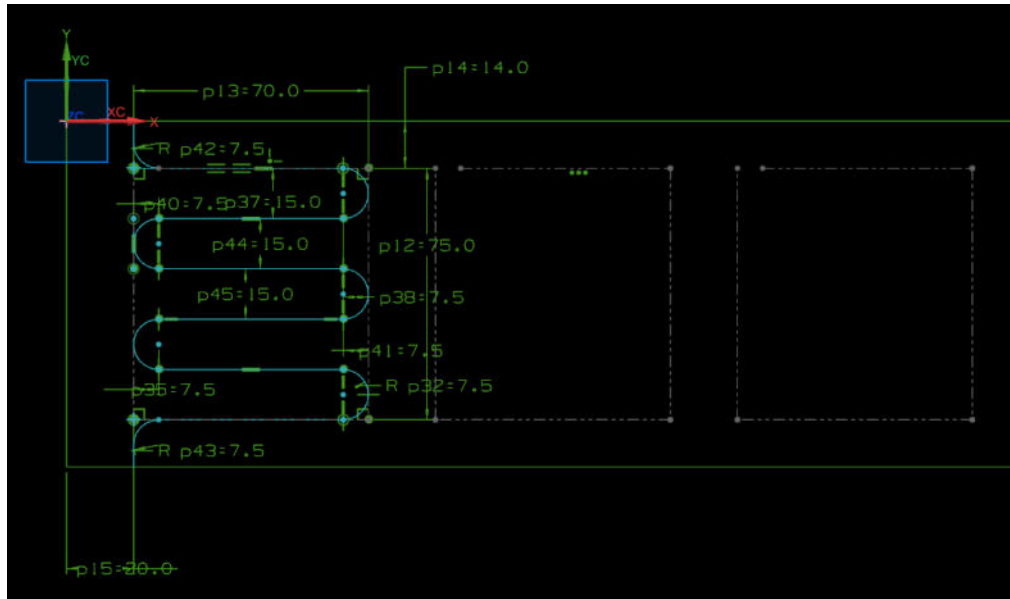


Figura 34 Rutas guía para los ductos internos del colector de calor.

Mediante una entrada y una salida de refrigerante, sobre cada uno de los Módulos TEM, será sencillo llegar a temperaturas adecuadas, mencionando que en el software CAD se genera un corte de barrido en estas guías, internamente.

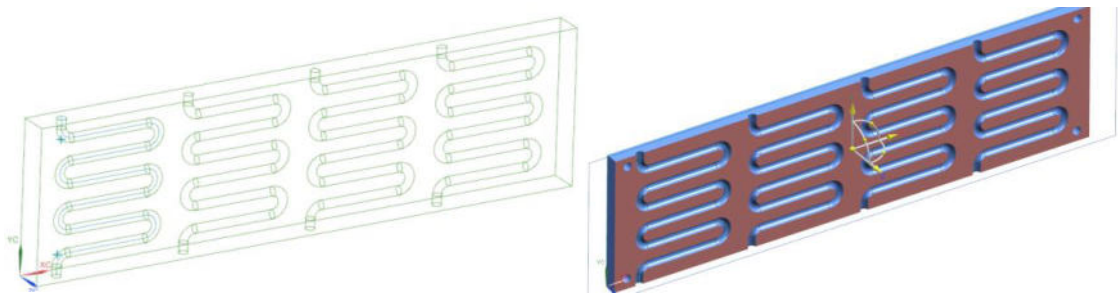


Figura 35 Propuesta #1 del colector del refrigerante.

Sin embargo, el modelo de la Figura 35 sería complicado de manufacturar, por lo que es necesario crear un modelo nuevo simplemente con líneas cilíndricas internas, y colocar las guías para el refrigerante como tuberías añadidas a la pieza.

Para ello se hacen cinco ductos en la parte lateral del colector para generar un patrón, y realizar a lo largo de la pieza las nuevas guías que se muestran en la Figura 36.

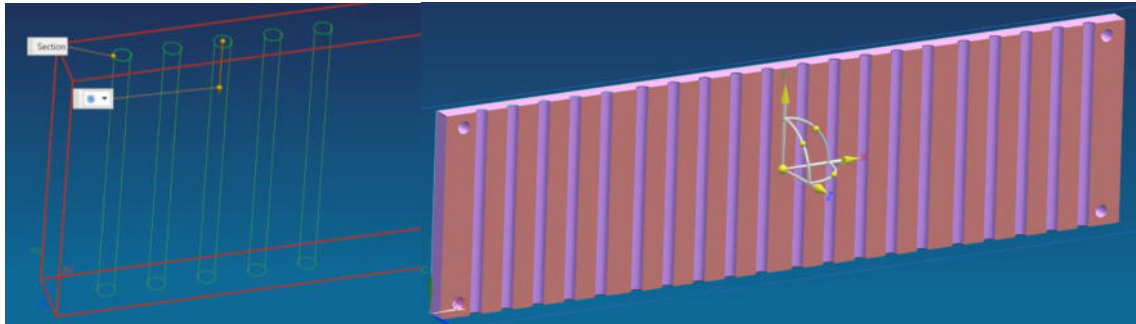


Figura 36 Guías rectas para el colector del refrigerante y vista de sección del colector del refrigerante.

También, para la tubería interna, se divide en varias secciones, el primer segmento se denominará segmento A, y se crea el espesor de la tubería y después la guía en un plano perpendicular al primero, para la extrusión del tubo.

Luego con la función en Surface, se usa “sweep along guide”, y se seleccionan primero la curva y después la guía para extruir como se muestra a continuación. Además de extruir una conexión en la parte inicial de la tubería para conectar mediante una abrazadera una manguera que conduzca al interior del colector, el refrigerante, Figura 37.

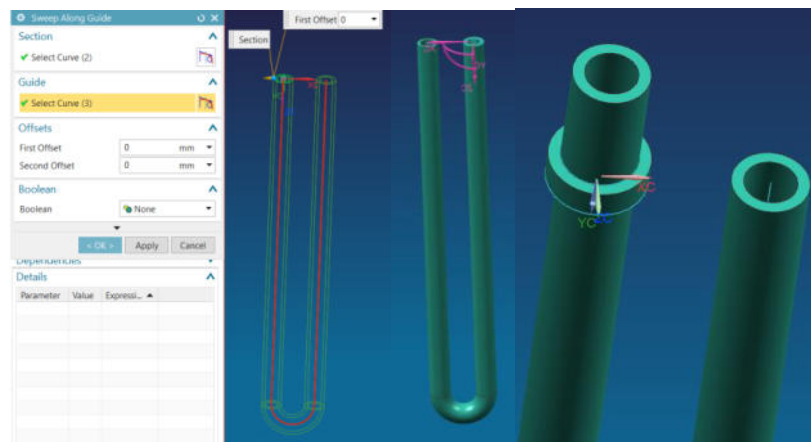


Figura 37 Tubería interna del refrigerante segmento A.

Se repite la misma operación de modelado para crear todos los segmentos internos y codos necesarios para la interconexión entre estos.

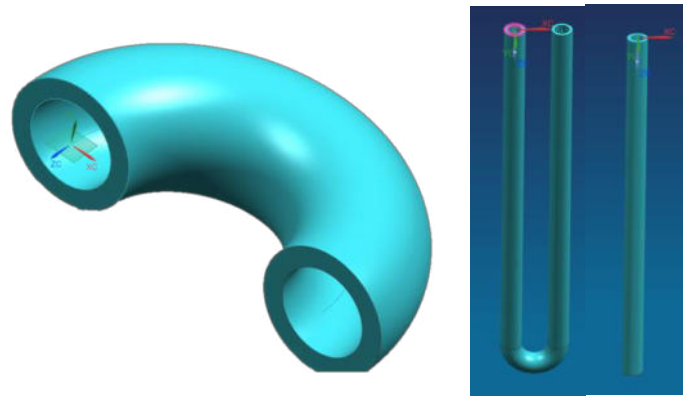


Figura 38 Segmentos de tuberías internas B, C y D.

Finalmente se genera en la parte superior del colector del refrigerante, una zona de disipación de calor con aspas que permitan la transferencia de calor por convección hacia el aire circundante y así ayudar con la refrigeración, esto se observa en la Figura 39.

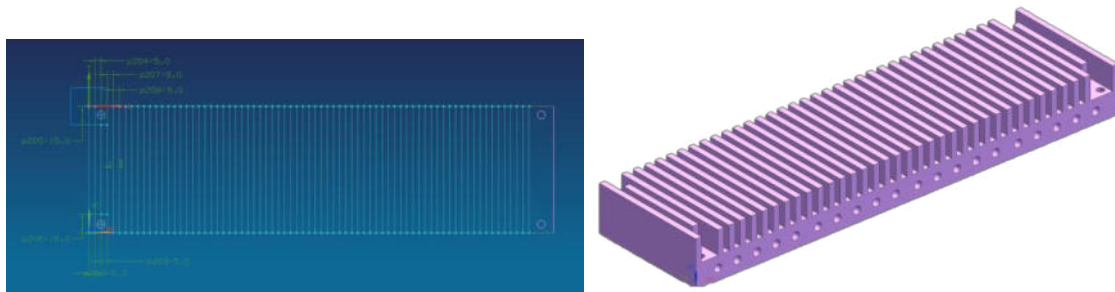


Figura 39 Disipador de calor del colector de refrigerante.

3.3.4. Ensamble de los componentes.

Con el uso del mismo software NX se establecen condiciones de posicionamiento entre los componentes que permitan ensamblarlos, esto previo a generar una simulación y análisis de elemento finito FEA (Finite Element Analysis) para el estudio de la transferencia de calor entre dichos componentes y para la discusión y observación del estado de las temperaturas posteriores a la simulación.

En NX, como base de ensamble se coloca la tubería para conexión a la línea de escape de forma fija, para después agregar mediante restricciones de alineamiento sobre esta una primera mitad del colector de calor, Figura 40. Alineando también las guías o ranuras para la tornillería de sujeción entre el colector y la brida. Que una vez se agrega la otra

mitad inferior del colector de calor, y se alinea de la misma forma que la parte superior, resulta el siguiente subensamble.

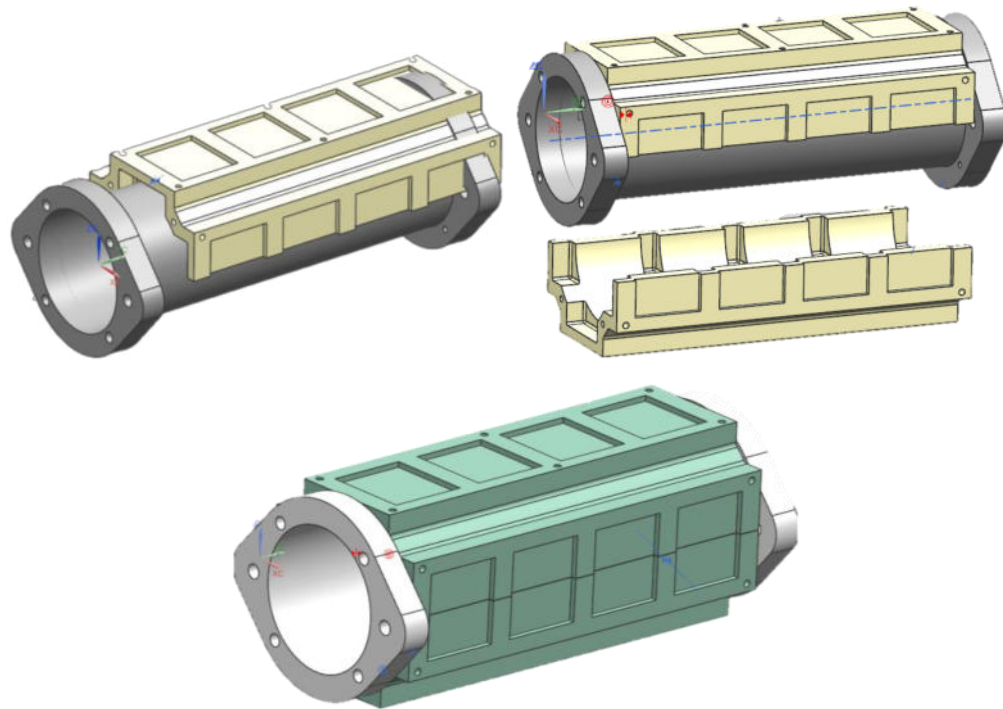


Figura 40 Subensamble colectores de calor y línea tubería de escape.

Listo esto, se agrega ahora uno de los módulos TEM, de los cuales se modelo parte por parte según el fabricante las piezas de este, para posteriormente comenzar con un subensamble alineado al mismo colector de calor.

El módulo TEM consta de una placa inferior que se coloca en la parte inferior de cada uno de los recuadros o espacios del colector de calor, después, sobre esta primera parte se alinea el marco superior del mismo modulo, Figura 41, de modo que así se logre un espacio en el cual se colocan termoelementos internos, siendo que aquí se simplificará a únicamente pequeños segmentos rectangulares de cobre, simulando las conexiones que tiene cada uno de los pares de semiconductores de tipo N y P. Se simplifica de esta manera ya que es necesario observar cómo se distribuye la temperatura de esta manera, sin embargo, al ser de tamaños muy reducidos cada uno de los pares de semiconductores, al momento de generar el mallado en el FEA, se complicaría en el sentido de que para refinar dicha malla tendría que generar muchos elementos y nodos sobre la superficie de estos

semiconductores. Por lo que simplificarlos a rectángulos de cobre, vease la Figura 41, se podrá optimizar el mallado en el análisis.

Esta parte respecto al número de nodos y elementos del mallado, se mencionará en el subtema de “Simulación” del presente documento.

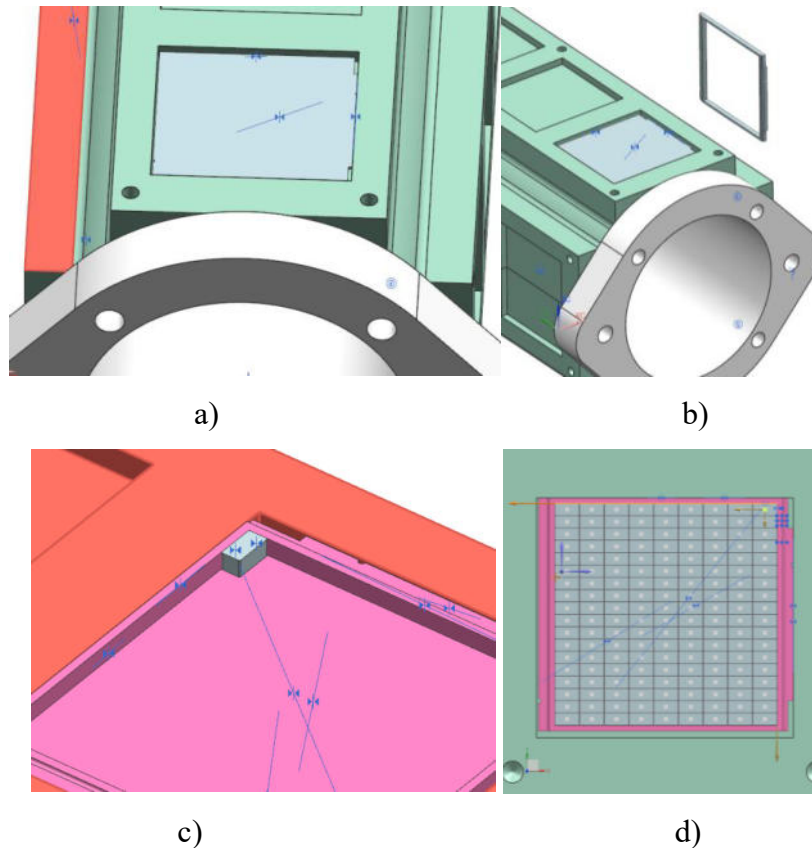


Figura 41 a) Subensamble placa inferior modulo TEM, b) Subensamble placa superior modulo TEM, c) Subensamble elemento semiconductor N y P, d) Patrón de ensamble de elementos semiconductores.

Al obtener este subensamble de las piezas del módulo TEM, se repite el procedimiento de creación de un patrón lineal respecto a la longitud en el colector, y circular respecto a la circunferencia de la línea de escape del ensamble para colocar cada uno de los módulos en sus respectivos espacios en el colector de calor, Figura 42.

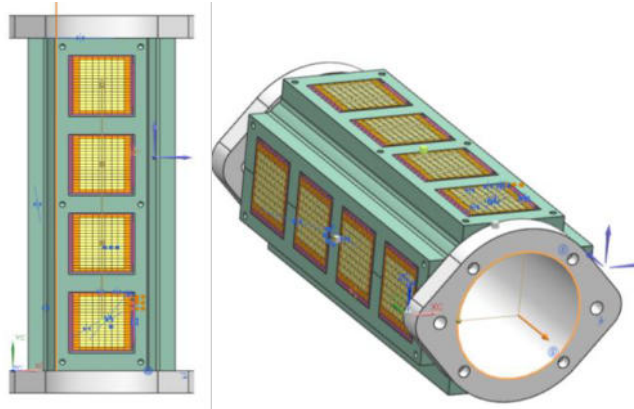


Figura 42 Ensamblaje de módulos TEM en los colectores de calor del sistema TEG.

Sobre cada una de las cuatro áreas sobre los módulos TEM, es necesario ahora agregar los colectores del refrigerante, donde dichos componentes se alinean con las dimensiones y caras del colector de calor.

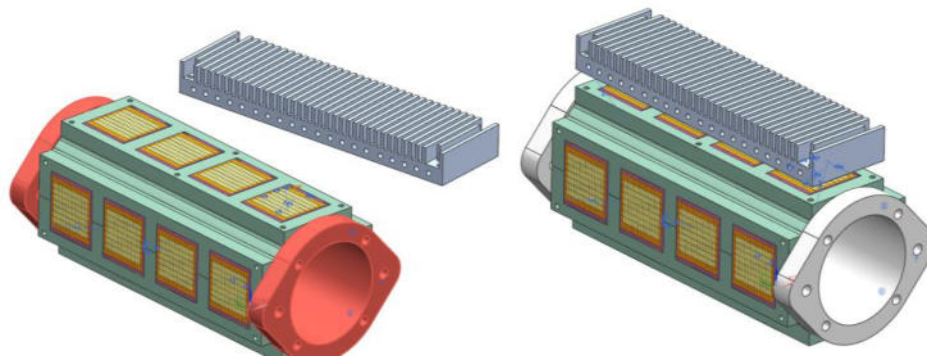


Figura 43 Ensamblaje de colector de refrigerante en el sistema TEG.

Previa a la continuación del proceso de diseño, es necesario ajustar la terminación de las bridas de sujeción de la tubería para la línea de escape, esto debido a que deben ser también compatibles o similares con las características de las bridas de sujeción existentes en el escape del motor, además de reducir en gran parte las dimensiones para un aligeramiento en el peso. En la Figura 44 se aprecia una de las terminaciones de la línea de escape existente ya en el motor, donde, el componente color naranja conecta directamente a la tubería y se expande hacia una brida de sujeción con abrazadera. Entonces, es necesario que las terminaciones de las dos bridas de sujeción de la tubería de escape del sistema TEG también tengan terminaciones circulares de este tipo.

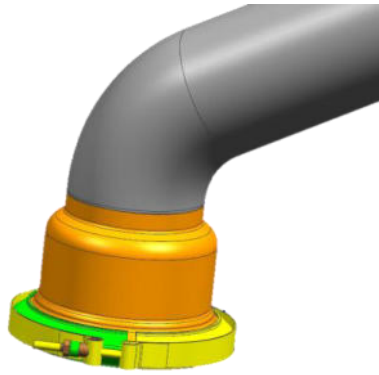


Figura 44 Complemento para conexión entre las líneas de tubería de escape de un motor Diesel de tracto camión.

El proceso de rediseño y optimización de varios de los componentes del sistema TEG, se muestra posterior al subtema siguiente, como parte del desarrollo y experimentación inicial de la simulación de transferencia de calor en el análisis por elemento finito.

3.3.5. Ejemplo del dispositivo del motor con el que es compatible el sistema TEG.

El sistema en desarrollo deberá también restringirse en dimensiones debido al espacio disponible dentro del habitáculo del camión, en el motor, siguiendo el espacio que ocupa la tubería de escape actual, proveniente del turbocompresor, y al ser un sistema que suplirá un segmento del escape, esto permitirá la compatibilidad necesaria entre componentes.

En la Figura 45 se muestra un ejemplo de uno de los motores que son desarrollados en la industria automotriz, así mismo se aísla la tubería de escape que utiliza para la salida de los gases de escape.

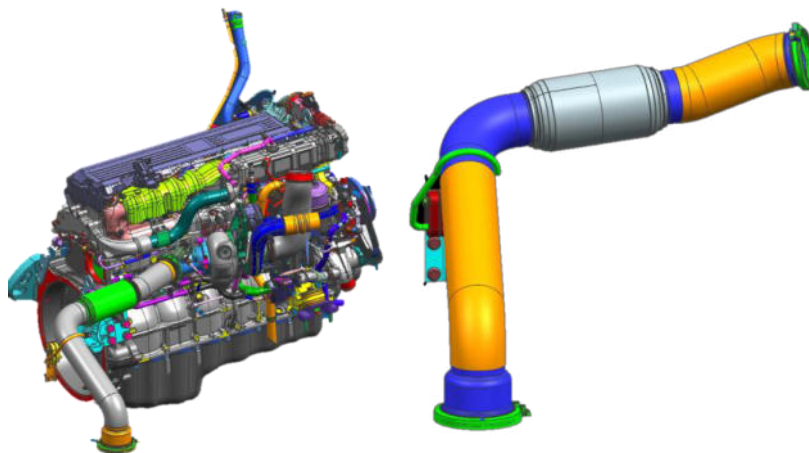


Figura 45 Modelo de ensamble CAD de un Motor de tractocamión y tubería de escape.

El sistema pretende suplir un segmento de la línea de escape, en la Figura 49 se muestra en color gris (línea de gases de escape) un componente colocado sobre la tubería, siendo un ejemplo claro de como quedaría colocado el sistema TEG, es posible analizar las dimensiones que existen, como ejemplo de esto está el diámetro actual de la línea de escape, de cuatro pulgadas, con lo que el sistema TEG necesita ajustarse a esa dimensión, observar la longitud de ambos para saber si se podría colocar, mismos conflictos que se estudian y desarrollan a continuación.

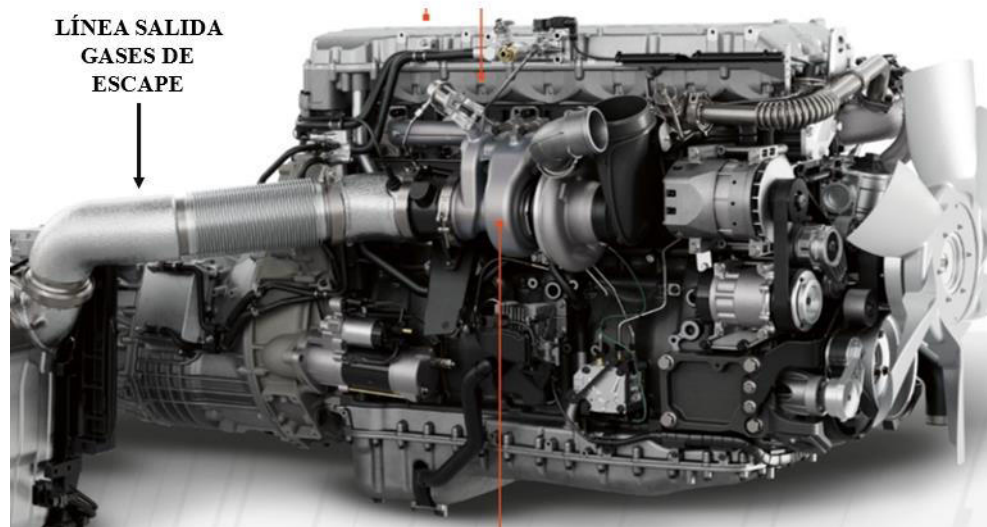


Figura 46 Ejemplo de demostración de ubicación de línea de salida de escape en un motor Diesel.

Análisis de elemento finito ANSYS.

3.5. Rediseño y optimización de componentes.

Se explica a continuación el desarrollo de la optimización de cada uno de los componentes del sistema TEG, de tal manera que cada vez que se realice alguna modificación en las geometrías de dichos componentes, se realice también un análisis de elemento finito y una simulación nueva, que permita observar si existió mejora o no respecto a la distribución de temperaturas y al diferencial de temperatura obtenido entre el lado frío y el lado caliente del módulo TEM.

Dividiendo esto en partes, donde cada parte significa un nuevo rediseño y su respectiva simulación, hasta encontrar cual es la geometría adecuada y mejor aplicable respecto a los resultados obtenidos en el diferencial de temperaturas.

PARTE I

El diseño preliminar mostrado anteriormente para ejemplificar gráficamente la idea, se debe rediseñar para optimizar dimensiones, espacios, acabados, en relación a que no implique un peso elevado en el camión, a que sea fácilmente manufacturable pero sobre todo que permita la correcta transferencia de calor entre los componentes hasta los módulos TEM, de tal manera que se mantenga un diferencial de temperaturas entre el lado frío y el lado caliente del módulo de manera estable durante el funcionamiento del camión. Para esto a continuación se muestra en que consistió el primer rediseño de algunos componentes y una simulación de transferencia de calor en estado estable del sistema.

3.5.1. Línea de escape y ensamble de tuberías internas del colector del refrigerante.

El primer componente que se simplifica es la línea de conexión para el sistema de escape, en la Figura 47 se aprecia como en los extremos de la tubería, se redujo en gran cantidad las dimensiones del componente, para reducir lo mayor posible el peso y mantener únicamente lo necesario para conectar el componente a la línea de escape del motor.

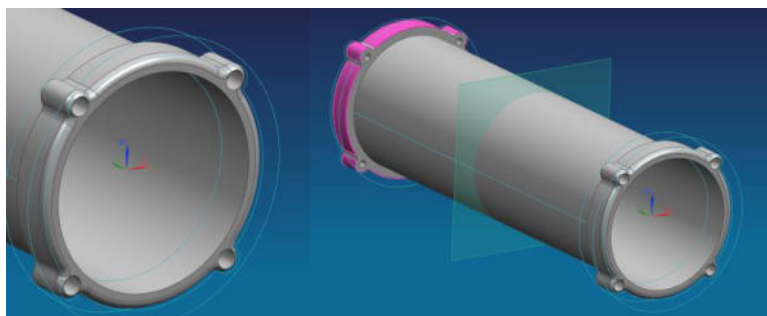


Figura 47 Optimización de tubería para conexión a línea de escape del motor.

Se agregó también una pestaña sobre el extremo de la brida de sujeción y a lo largo de la circunferencia del diámetro interno que permita la unión hacia las conexiones del sistema de escape, es decir, con el cople mencionado anteriormente en la Figura 43, para soldarlo en esa pestaña. Además de algunos redondeos para mejorar estética y mejoras respecto a manufactura. De tal manera que con este rediseño de la tubería además de el ensamblaje

de las tuberías internas del colector de refrigerante, el diseño estaría en el siguiente punto, Figura 48.

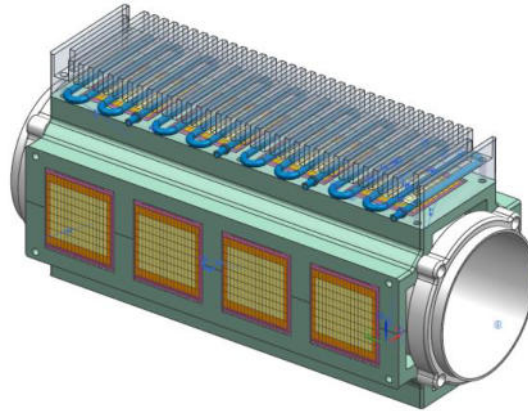


Figura 48 Rediseño de la tubería de línea de escape y ensamble del sistema TEG.

3.5.2. Colector de refrigerante

Las dimensiones de la parte del disipador de calor en el colector del refrigerante sobresalen demasiado a las áreas circundantes cerca de la tubería de escape del motor, por lo que se reducen las dimensiones dándole una forma circular a la parte superior del colector del refrigerante, Figura 49. Logrando así un mejor terminado, además de menor espacio, reducción de peso. Como agregado a enseguida se muestra también como resulta el ensamble del sistema TEG con estos componentes rediseñados.

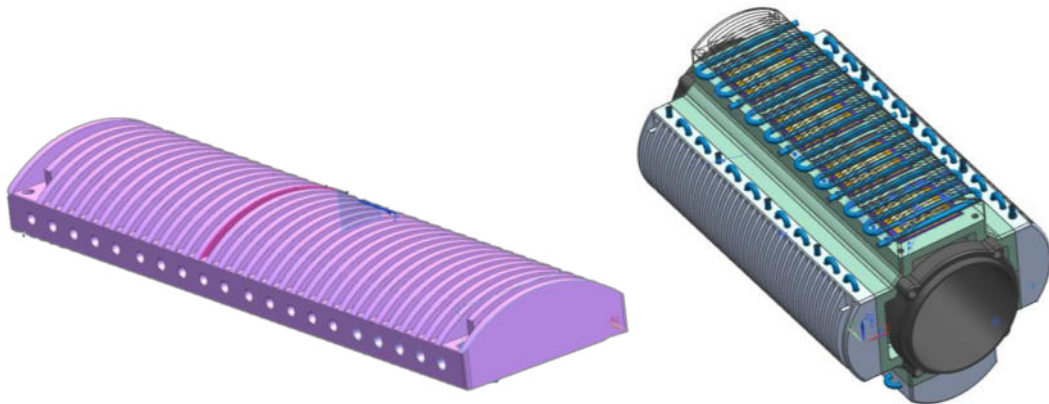


Figura 49 Rediseño del colector del refrigerante y ensamble completo del sistema rediseñado.

3.5.3. Simulación de transferencia de calor en estado estable para sistema rediseñado I.

Para la simulación en ANSYS se simplifican los modelos para reducir la carga computacional debido a que la licencia estudiantil permite un número limitado de nodos y elementos en el mallado para el análisis de elemento finito.

Sin embargo, debido a que las geometrías del sistema son simétricas e iguales en diferentes secciones, es posible hacer dicha simplificación, para analizar de primera mano únicamente uno de los módulos TEM, y los componentes circundantes a él mismo, de forma que se pueda observar lo que pasa con la transferencia de calor en el sistema.

Primero se simplifica el colector de calor, en donde se utilizará solo una de las mitades del modelo diseñado anteriormente, haciendo un corte de sección para que quede únicamente un espacio para un módulo TEM, como se muestra en la Figura 50. El modelo original del colector de calor, mostrado en la Figura 49 se cortará de la siguiente manera.

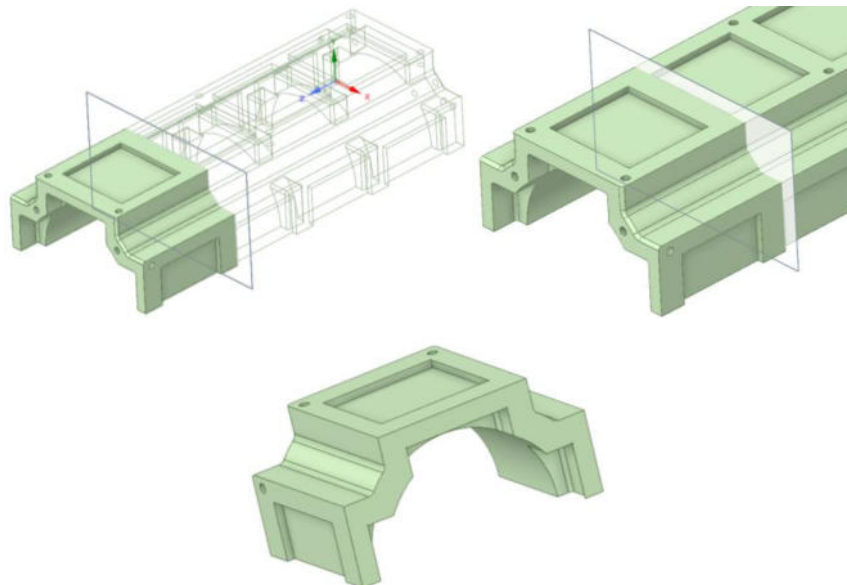
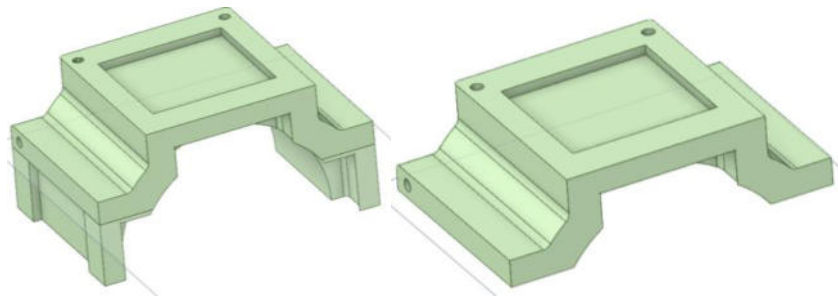


Figura 50 Colector de calor simplificado para simulación con FEA.

Lo que se muestra en la Figura 50 es la colocación de un plano de referencia, en la Figura de la izquierda, que permitirá utilizar el comando de “Dividir cuerpo” en Spaceclaim de ANSYS, de tal forma que podamos eliminar de manera estratégica gran parte del modelo.

Para simplificar aún más el modelo, se coloca un plano de referencia adicional como se muestra en el corte de la Figura siguiente.



Ahora se replica el procedimiento, pero en el colector del refrigerante, como se muestra en la Figura 51, en donde es necesario saber la dimensión de la longitud del colector de calor, para que ensamble adecuadamente.

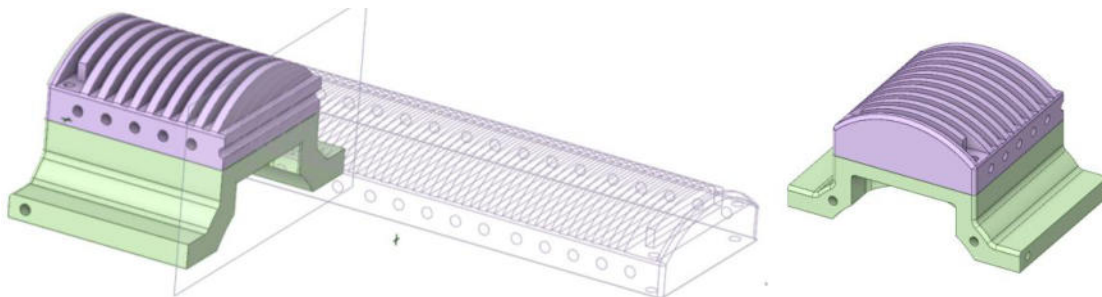


Figura 51 Colector de refrigerante simplificado para FEA.

Finalmente se agrega al ensamble en la parte interna el módulo TEM, así como las tuberías internas en el colector del refrigerante. En la Figura 52 ahora se encuentra el ensamble completo y simplificado necesario para el FEA y la simulación a desarrollar.

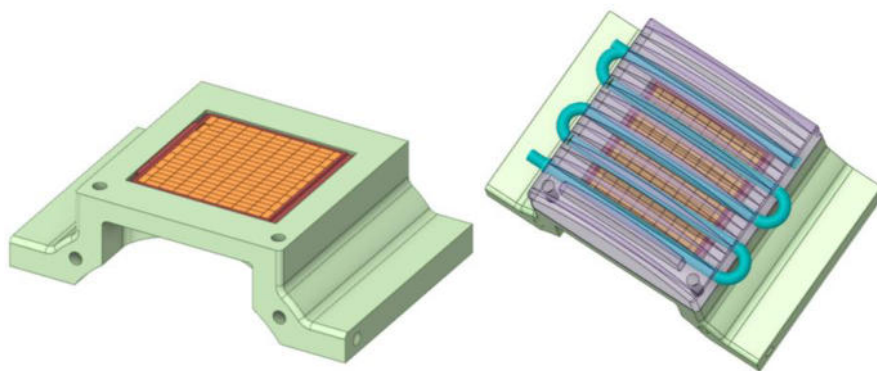


Figura 52 Ensamble de componentes simplificados para FEA.

Por lo que, para la configuración del estudio en la simulación, se trabaja el archivo nuevo en “workbench” en donde se carga la geometría del ensamblaje realizado previamente. Y se selecciona un nuevo estudio o análisis térmico de estado estable, todo esto en software ANSYS.

3.5.4. Materiales seleccionados y asignación a los componentes

Es necesario explicar un poco como se seleccionan los materiales para cada uno de los componentes del sistema, siendo esto fundamental ya que de ello depende la correcta transferencia de calor además de aspectos como la ligereza en peso y el posible costo de fabricación general. Para los componentes principales, el colector de calor y el colector del refrigerante, así como las tuberías internas del mismo, se aplicará como material el aluminio predeterminado del software ANSYS, para la carcasa del módulo TEM se utiliza silicio, y para los conductores internos se aplica cobre, las características y propiedades de cada material se mencionan detalladamente en las tablas 5, 6 y 7.

Tabla 5 Propiedades del Silicio, material para la carcasa de cada módulo TEM.

SILICIO	
Densidad	2329 kg/m ³
Propiedades estructurales	
Módulo de Young	1.627x10 ¹¹ Pa
Razón de Poisson	0.27
Esfuerzo ultimo a tensión	1.723x10 ⁸ Pa
Esfuerzo de cedencia	1.723x10 ⁸ Pa
Propiedades térmicas	
Conductividad térmica	154.3 W/m°C

Tabla 6 Propiedades del Aluminio.

ALUMINIO	
Densidad	2770 kg/m ³
Propiedades estructurales	

Módulo de Young	7.1×10^{11} Pa
Razón de Poisson	0.33
Esfuerzo ultimo a tensión	3.1×10^8 Pa
Esfuerzo de cedencia	2.8×10^8 Pa
Propiedades térmicas	
Conductividad térmica	209.3W/m°C

Tabla 7 Propiedades del Cobre.

ALUMINIO	
Densidad	8300 kg/m ³
Propiedades estructurales	
Módulo de Young	1.1×10^{11} Pa
Razón de Poisson	0.34
Esfuerzo ultimo a tensión	4.3×10^8 Pa
Esfuerzo de cedencia	2.8×10^8 Pa
Propiedades térmicas	
Conductividad térmica	401 W/m°C

En este caso es mejor utilizar aluminio por la mayor capacidad de transferencia de calor, además de ser mucho más ligero que el acero inoxidable, material predeterminado que ofrece el FEA en ANSYS, siendo uno de los principales factores en el proceso del diseño, en donde se necesita aligerar lo más posible cada componente además de que sea lo suficientemente resistente térmicamente hablando. Ambos tienen buenas propiedades anticorrosivas, además el costo del aluminio es más accesible que el costo del acero inoxidable.

Un punto a tener en cuenta son la temperatura de los gases de escape, que es de alrededor de 440°C. De modo que el aluminio al tener un punto de fusión de 660°C podrá resistir la temperatura elevada de los gases de escape.

La información de la aleación del aluminio proveniente de la librería de materiales de ANSYS.

Después de haber colocado a cada geometría del sistema el material, se procede a colocar la temperatura en la parte interna del colector de calor, como se muestra en la Figura 53, a partir de los datos existentes en Navistar.

Observándose en dichos datos que la temperatura de los gases de escape salientes del turbocargador es de 440°C. Además de la temperatura de entre 80°C y 90°C para el refrigerante dentro del colector del lado frío.

Se cargan entonces las geometrías del ensamble, y a cada elemento se condiciona el material, siendo en su mayoría componentes de aluminio, a excepción de los conductores eléctricos dentro del módulo TEM, los cuales son de cobre, Figura 53.

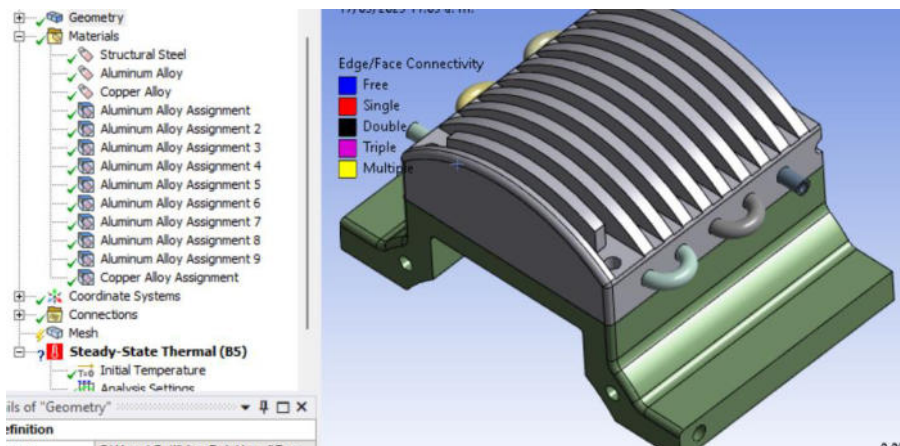


Figura 53 condición de materiales para cada componente del sistema.

Posteriormente en el análisis, se genera el mallado, el cual debe tener ciertas modificaciones en cuanto al tamaño de los elementos se refiere, el software permite no más de 100000 nodos y elementos, por lo que es necesario modificar dicho tamaño de mallado para no exceder ese límite.

El análisis se genera con un tamaño de elementos de 0.005m, logrando el mallado de la Figura 54, sin exceder el límite mencionado.

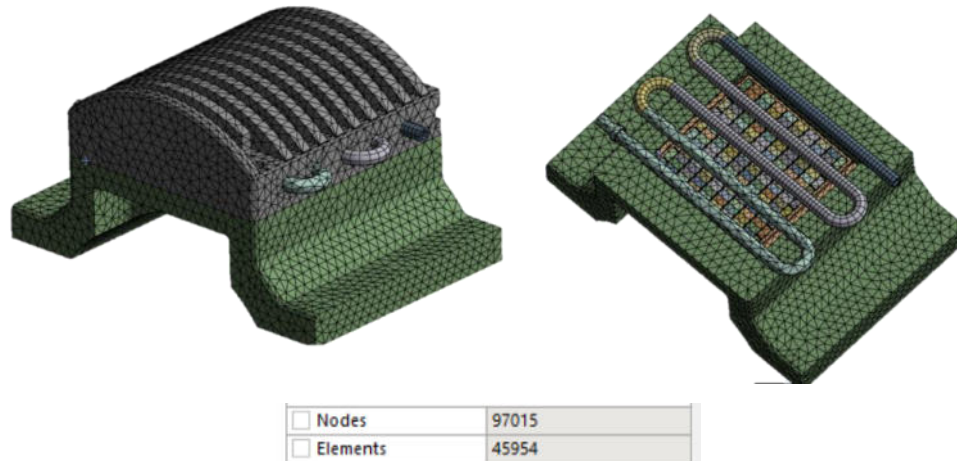


Figura 54 Mallado para simulación de transferencia de calor.

Teniendo listos la geometría, los materiales de cada componente, y un control relativo en la forma y tamaño de la malla para el análisis del elemento finito, se procede a verificar la especificación de los contactos entre los componentes como se aprecia en la Figura 55, ya que el software automáticamente genera en base a las condiciones de ensamblaje, los contactos que hay entre los elementos.

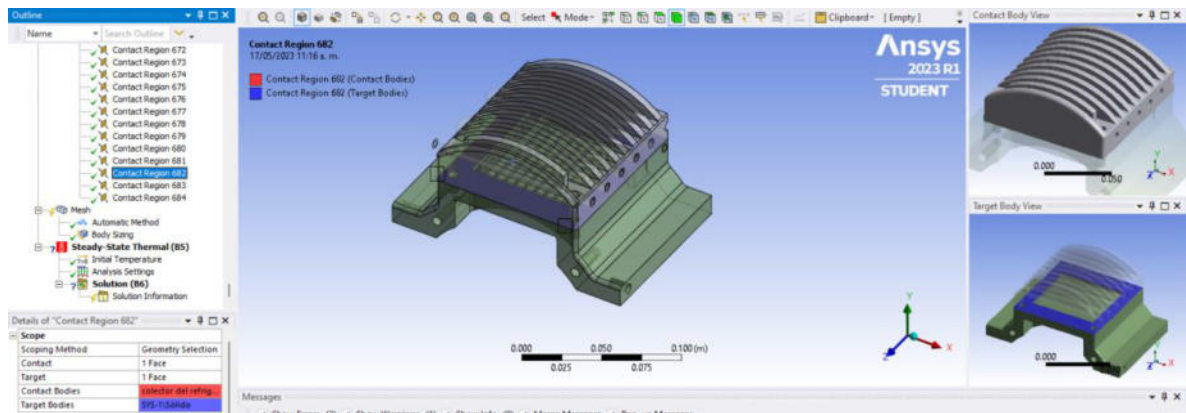


Figura 55 Contactos entre componentes.

Después de esto se agregan las temperaturas, primero con la temperatura caliente, en la parte interna del colector de calor, estando a 440°C provenientes de la temperatura de los gases de escape, y debido a la transferencia de calor por conducción desde la tubería de la línea de escape. Se muestra en la Figura 56 este proceso.

También se establece una segunda temperatura, en la parte interna de las tuberías del colector del refrigerante, estando a 80°C como se muestra a continuación.

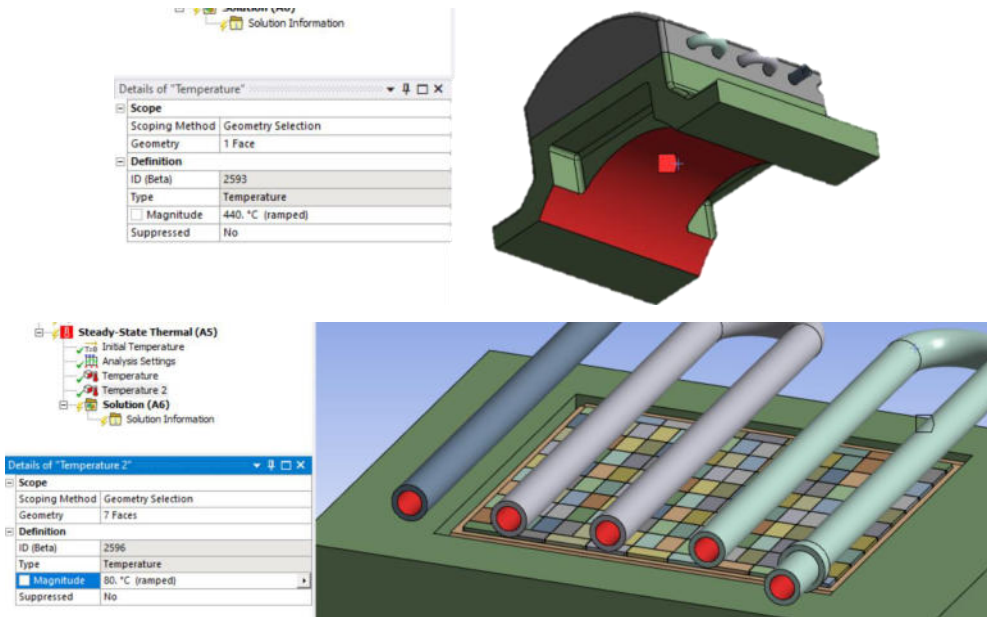


Figura 56 Temperatura de gases de escape y de refrigerante establecidas para el sistema. Finalmente se solicita en el software resultados para temperaturas y transferencia de calor.

PARTE II

3.5.4. Rediseño II Colector de calor.



Figura 57 Colecto de calor rediseño II.

Como la temperatura caliente se reduce mucho al llegar al módulo TEM en los resultados de la simulación anterior, es necesario ahora reducir la distancia desde la circunferencia del tubo de línea de escape hacia la parte inferior del módulo, como se muestra con las flechas azules en la Figura 57.

Estableciendo esa distancia de 5 mm, y omitiendo las ranuras internas para que haya más contacto con la tubería de escape y con esto más transferencia de calor, resulta el modelo de la Figura 58.

De modo que ahora, se repite el procedimiento de ensamble de los componentes, así como de la simulación con las mismas condiciones establecidas anteriormente, para este nuevo diseño.

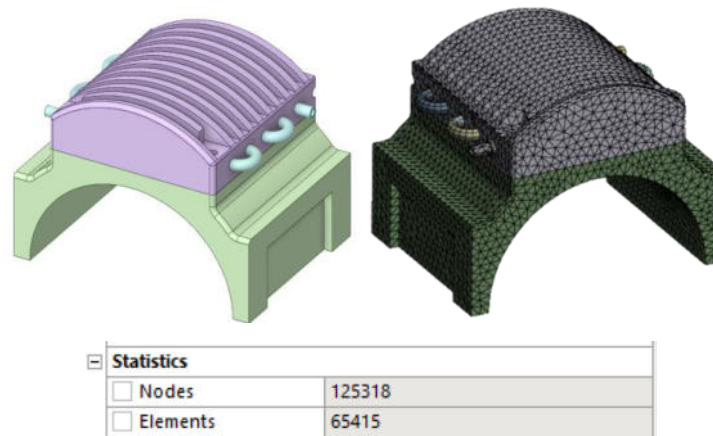


Figura 58 Número de nodos obtenidos en la malla del ensamble de componentes para simulación.

Logrando así la distribución de temperaturas en el sistema que se muestra en el capítulo de resultados del presente documento, alrededor del módulo TEM.

PARTE III

3.5.6. Rediseño III Colector de refrigerante.

Por lo tanto, también es necesario un pequeño ajuste en las dimensiones del colector del refrigerante, para que la transferencia de calor de ese lado del sistema sea mejor, en el sentido de que baje aún más la temperatura en el lado frío del módulo TEM, Figura 59.

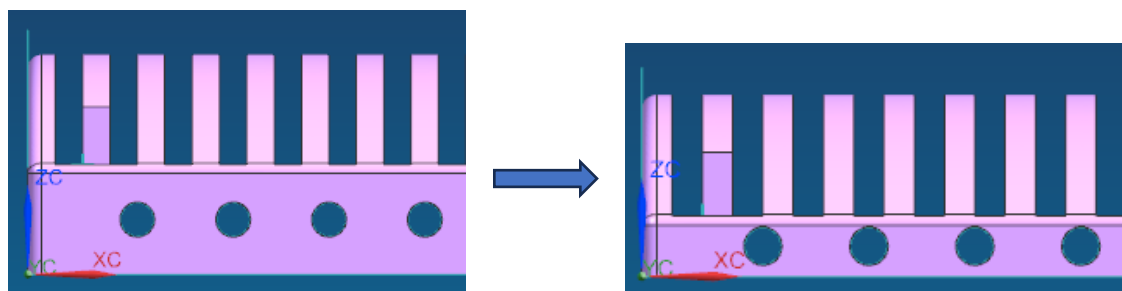


Figura 59 Cambio de dimensiones en colector del refrigerante.

En la Figura 59 se observa que el espesor de la parte inferior del colector del refrigerante, disminuye, exactamente pasa de 20 mm (lado izquierdo) a 10 mm (lado derecho). Lo que

permite así que las tuberías que conducen el refrigerante se encuentren mucho más cerca, hacia la parte inferior, de los módulos TEM.

Donde una vez repetido el procedimiento, con esta nueva geometría para la simulación de transferencia de calor, se obtiene lo siguiente, el modelo simplificado en el colector de calor y en el colector del refrigerante, así como los resultados obtenidos al simular el sistema con esas dimensiones.

PARTE IV

3.5.7. Rediseño IV Colector de calor

En esta parte, es necesario que la parte inferior en el colector de calor, es decir, por donde se transfiere la energía y temperatura caliente hacia los módulos, tenga una superficie plana, esto se muestra en el dibujo de la Figura 60, de tal forma que la distribución de temperatura en la parte inferior del módulo TEM, sea la misma.

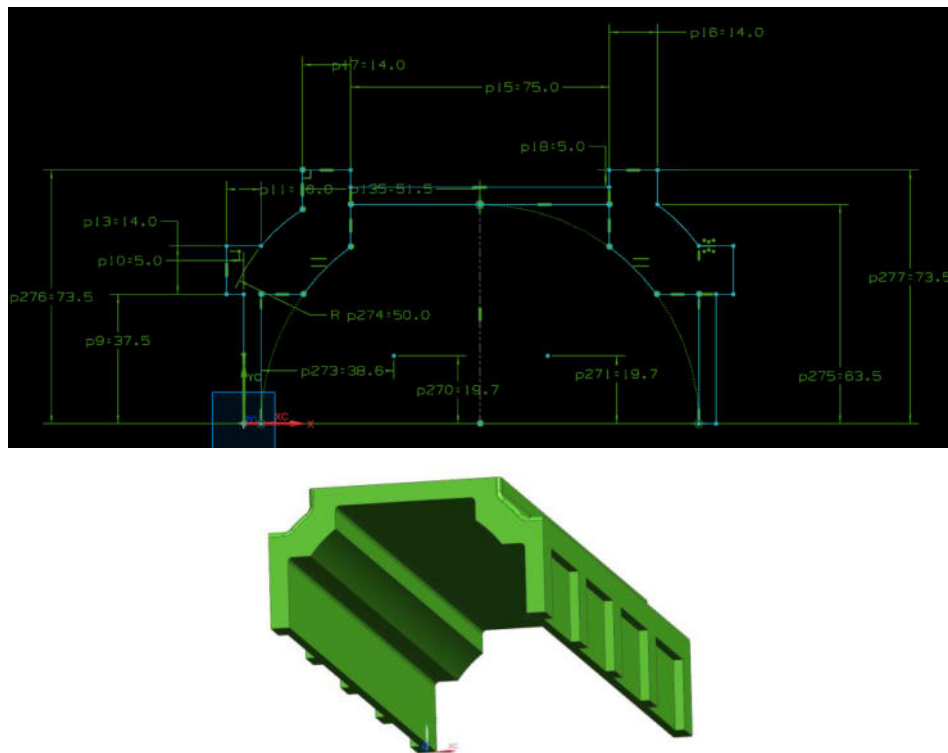


Figura 60 Ajuste de dimensiones y geometría del colector de calor.

Pero teniendo esto, también es necesario modificar la tubería de escape a la misma forma del colector de calor, se muestra con una modificación del sistema, en la que el colector

de calor y la tubería de escape se forman de un mismo componente, contrayendo cada extremo del colector de calor para generar sobre su misma geometría la forma necesaria para conectarlo directamente con las tuberías de escape propias del motor.

Además, debe hacerse un barrido de superficie entre la geometría con la forma del colector de calor, hasta una geometría con forma circular, de 4 pulgadas de diámetro, esto permitirá que el recorrido de los gases de escape sea con un flujo estable y laminar, y que no haya turbulencias o restricciones del paso de los gases de escape.

Para lograr esto primero se realiza un nuevo dibujo en un plano de referencia ubicado a 5 cm de distancia de la cara lateral del colector de calor, Figura 61.

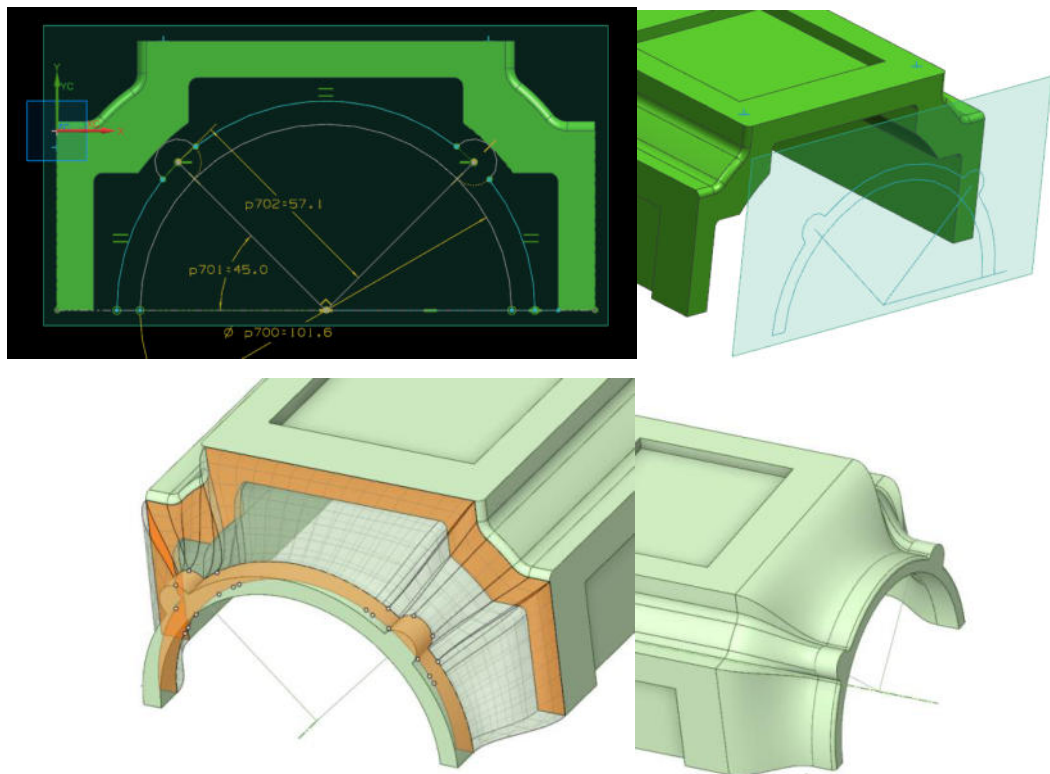


Figura 61 Dibujo para modificación del colector de calor.

Donde se generó un círculo de 4 pulgadas de diámetro que contenga espacios para la colocación de tornillería de sujeción, para realizar la siguiente operación de unión y extrusión, siguiente Figura, dado que esto nos ayuda a realizar una operación de Loft, para unir dos superficies y combinarlas en cuanto a sus geometrías.

De esta manera es posible también realizar la conexión, mediante las bridas de sujeción, entre el sistema y la línea de escape propia del motor del camión, mostrándose en la Figura 62 el ensamble de todos los componentes del sistema.

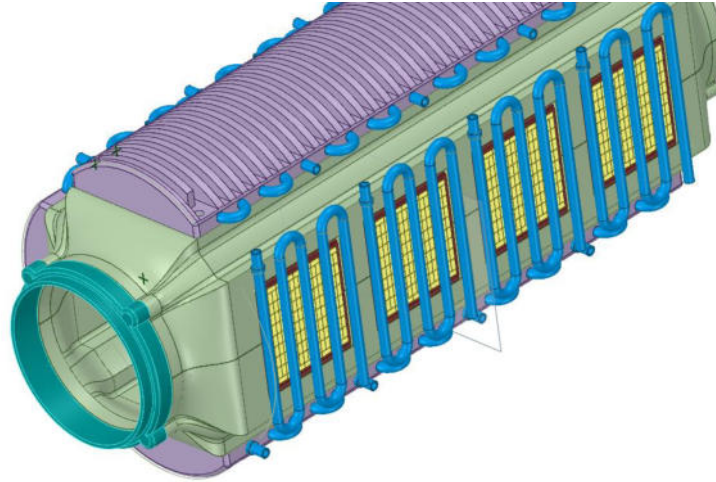


Figura 62 Ensamble de componentes rediseñados.

También en base a esta forma final del colector de calor, se genera una última simulación térmica para observar la mejora en la distribución de temperaturas debidas a la transferencia de calor, repitiendo el procedimiento anterior de las simulaciones previas en cuanto a la configuración de las variables establecidas para las temperaturas, obteniendo así los siguientes resultados de distribución de temperatura.

Se muestra además en la Figura 63 como se ensambla el sistema TEG desarrollado sobre el subensamble de la tubería de escape modificada, de tal manera que pueda adaptarse sobre esta el colector de calor del TEG, esto sobre los modelos base CAD propios de un motor Diesel de un tractocamión clase VIII,

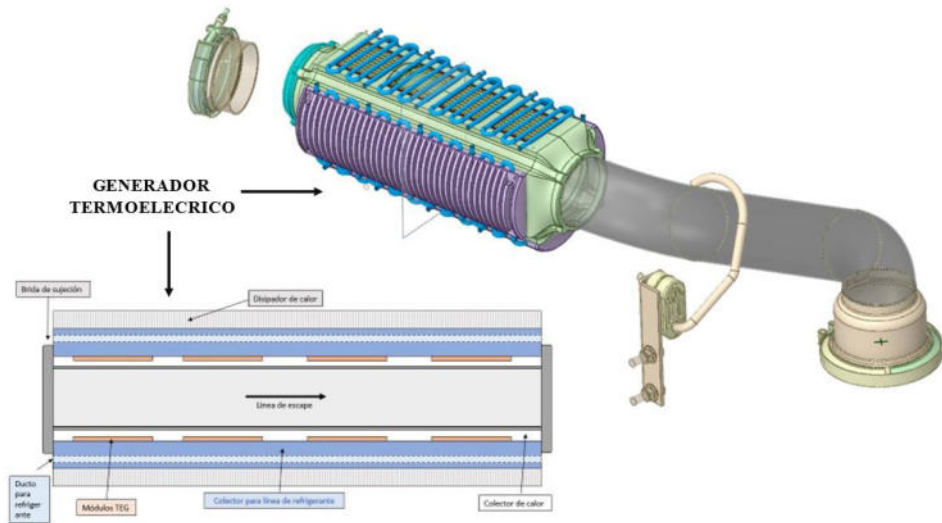


Figura 63 Ensamble de sistema TEG sobre subensamble de línea de escape.

PARTE V

3.5.9. Rediseño V Colector de refrigerante y tuberías internas

Con la modificación del colector del refrigerante, Figura 64, para reducir aún más la temperatura del lado frío, se consideró que, en vez de constar de tuberías internas, sea un solo segmento por donde el flujo del refrigerante fluya dentro del colector de refrigerante, y con esto poder tener un flujo de calor estable uniformemente distribuido con respecto al área de contacto entre el colector del refrigerante y el módulo TEM.

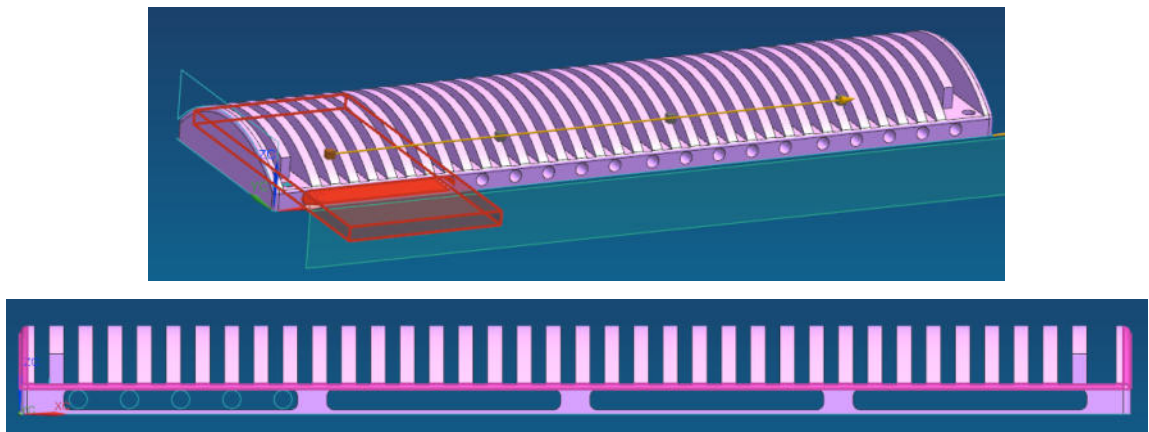


Figura 64 Rediseño del colector del refrigerante para simulación V.

Así se repite el procedimiento de simulación con un análisis FEA, para obtener con este nuevo rediseño las temperaturas en el lado frío y lado caliente del sistema.

También se genera la nueva tubería interna para el colector del refrigerante, siendo un ducto que permite que la superficie de contacto entre el colector del refrigerante y el colector de calor tenga la transferencia de calor mejor distribuida, este ducto nuevo se muestra en color azul, en la Figura 65.

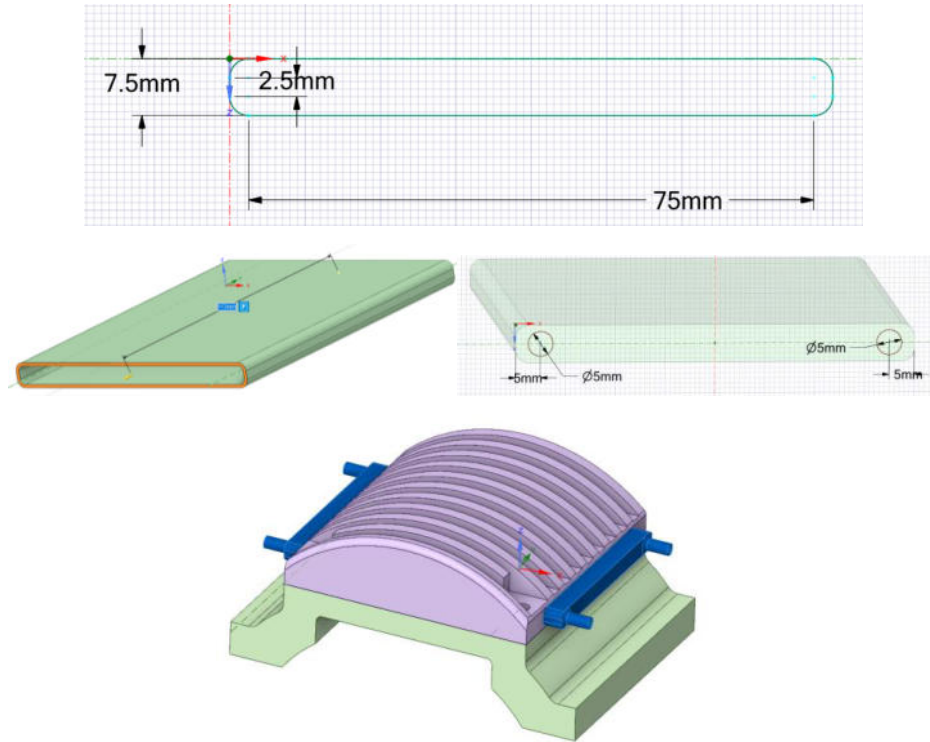


Figura 65 Ensamble de componentes con colector de refrigerante rediseñado.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De la misma manera que se explicó en la experimentación, como se fue desarrollo por partes cada una de las iteraciones de rediseño y optimización de cada uno de los componentes, se muestra ahora una separación por partes igual de cada respectivo resultado de las simulaciones realizadas en la experimentación, así como la observación puntual en cada caso de la temperatura a cada lado del módulo TEM, y el resultado del diferencial de temperatura entre ambos lados, para así discutir, en función de este diferencial y los datos del fabricante del módulo TEM, si es apropiado que el módulo

opere así, y si con esto podrá generar suficiente potencial eléctrico a la par de mantenerse en temperaturas de operación que no perjudiquen la vida útil de los módulos.

PARTE I

Iteración final de diseño

4.1. Resultados simulación I

Se muestra a en la Figura 66 el resultado de la primera simulación preliminar del procedimiento de diseño mediante el análisis del elemento finito, con la simulación de transferencia de calor en estado estable para la obtención de las temperaturas a los alrededores de los módulos TEM en el software CAE ANSYS.

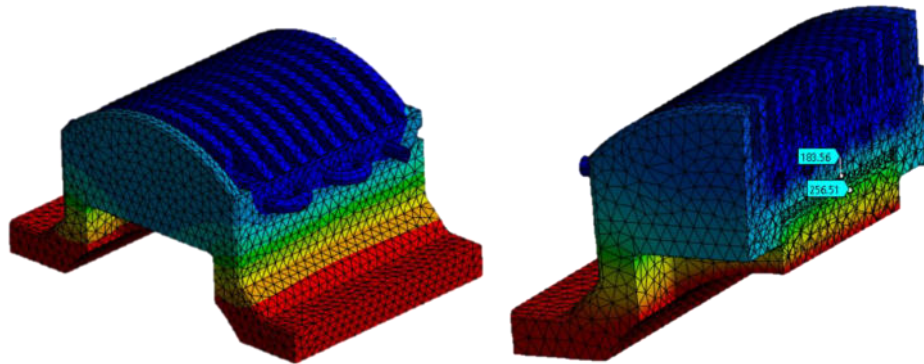


Figura 66 Primer muestra de temperaturas y transferencia de calor mediante simulación y análisis FEA.

Se puede observar en la Figura anterior que en la parte fría del módulo TEM se tiene una temperatura de 183.56°C y en el lado caliente se tiene una temperatura de 256.51°C . Con base en lo establecido en el subtema 3.2, no es funcional ya que el diferencial de temperatura entre ambos es:

$$\Delta T = 256.51^{\circ}\text{C} - 183.56^{\circ}\text{C} = 72.95^{\circ}\text{C} \text{ aproximadamente.}$$

Como se mencionó anteriormente, es necesario al menos acercarse a un $\Delta T = 200^{\circ}\text{C}$, de manera que la generación de corriente sea la máxima posible, claro siempre y cuando se encuentren los módulos bajo el límite de los 350°C como máximo para asegurar su

durabilidad. Además de que lo ideal sea tener una temperatura mínima lo más cercano a los 100°C del lado frío, y como máximo 300°C del lado caliente.

Para esto se procede efectuando rediseños y optimización de los componentes del sistema TEG, para repetir el FEA con la simulación y obtener el mejor resultado de diseño.

PARTE II

4.2. Resultados simulación II

Posterior al primer resultado de la simulación, y al primer rediseño de componentes del sistema TEG, se obtienen los resultados de la Figura 67.

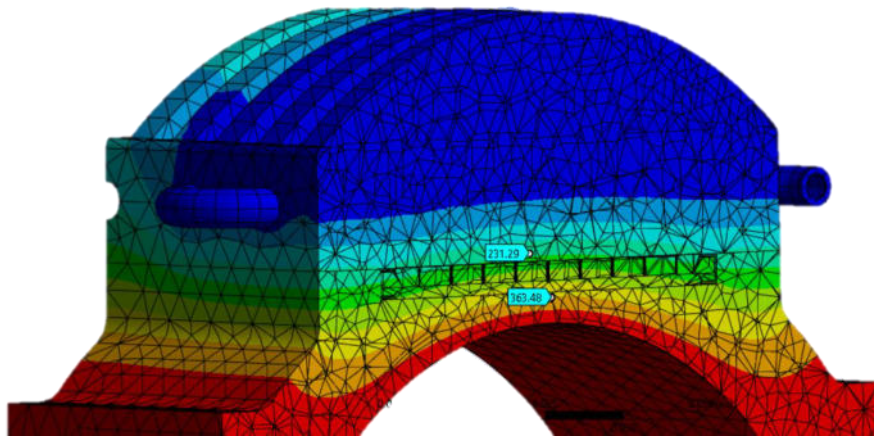


Figura 67 Resultado de temperaturas con el primer rediseño del colector de calor.

Con esto, según el módulo TEM seleccionado comercialmente, la temperatura del lado caliente queda cerca del valor máximo de 350° C del módulo, por lo que ahora es necesario que el lado frío pase de los 230°C que se observan en la Figura anterior, a lo más cerca de 100°C y reducir la temperatura en el lado caliente a por lo menos 300°C. Esto debido a que así habría un diferencial de temperatura $\Delta T=200^{\circ}\text{C}$, lo que significa que el módulo teóricamente, y según las especificaciones del fabricante, podrá producir aproximadamente 20W.

$$\Delta T = 363.48^{\circ}\text{C} - 231.29^{\circ}\text{C} = 132.19^{\circ}\text{C} \text{ aproximadamente.}$$

PARTE III

4.3. Resultados simulación III

Continuando el análisis y rediseño para la obtención de la mejor distribución de temperaturas, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 68.

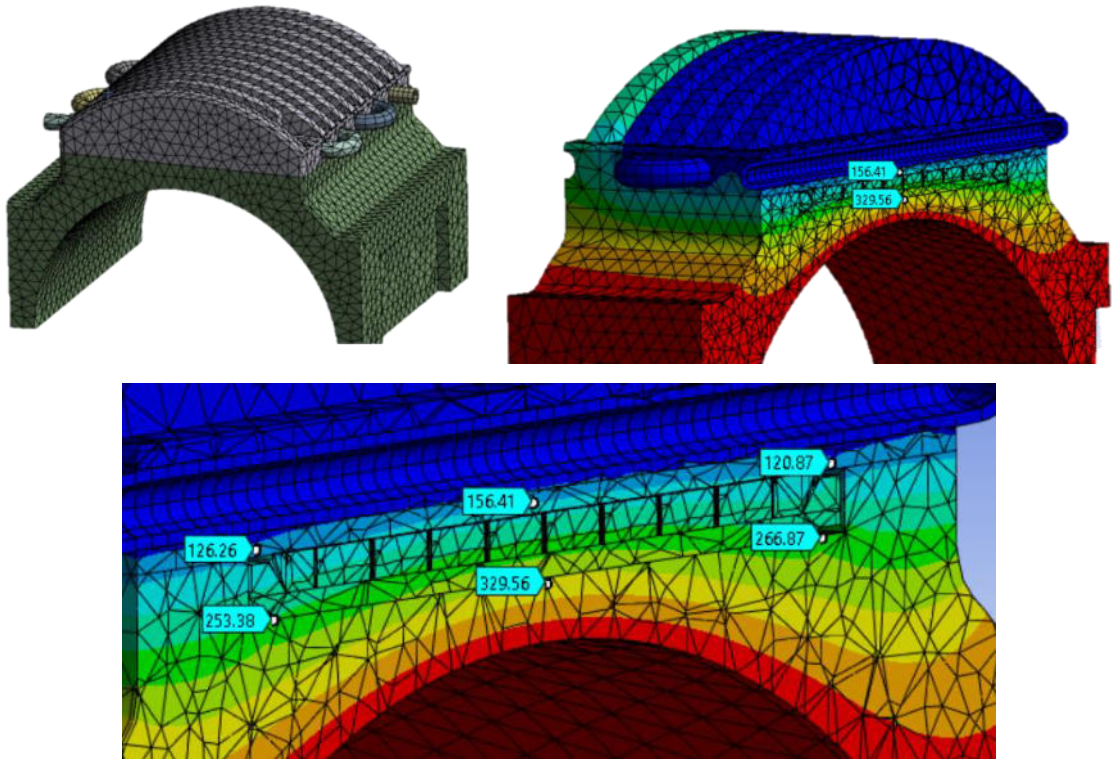


Figura 68 Resultado de simulación posterior al rediseño del colector del refrigerante.

Aquí se puede apreciar que el diferencial de temperatura es:

$$\Delta T = 329.56^{\circ}\text{C} - 156.41^{\circ}\text{C} = 173.15^{\circ}\text{C} \text{ aproximadamente.}$$

Esto acerca bastante a un diferencial de temperatura de 200°C , sin embargo no hay una distribución uniforme de la temperatura sobre la cara del lado caliente del módulo, como se aprecia en la Figura anterior hay una curva de temperatura que hace que el centro este a temperatura más alta con respecto a los extremos del modulo.

PARTE IV

4.4. Resultados Simulación IV

Desarrollando la misma simplificación de los componentes para la reducción de carga computacional, y generando un nuevo estudio y FEA en la simulación.

En la Figura 69 se muestra que se obtiene que, al reducir un poco las dimensiones de la parte inferior del colector de calor, fue posible reducir un poco el tamaño de los elementos hasta 0.005 mm para tener una mejor calidad de malla y con ello mejores resultados en la simulación.

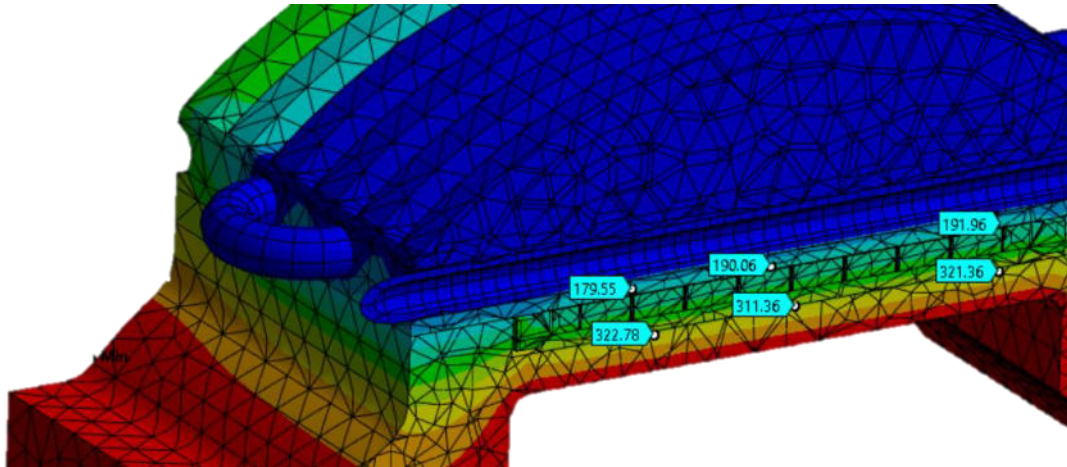


Figura 69 Resultado de temperaturas en simulación IV.

$$\Delta T = 311.36^{\circ}\text{C} - 190.06^{\circ}\text{C} = 121.3^{\circ}\text{C} \text{ aproximadamente.}$$

Sin embargo, después de realizar la simulación, la temperatura del lado caliente es adecuada según los datos del fabricante del módulo TEM, pero es necesario aun reducir la temperatura del lado frío por lo menos a lo más cercano a los 100°C , ya que está alejado del diferencial de temperaturas propuesto anteriormente para el mejor desempeño de los módulos, para esto es necesario replantear el diseño del colector del refrigerante para que la transferencia de temperatura sea más uniforme.

Rediseñar la parte de las tuberías internas para que estas distribuyan mejor el calor a las áreas circundantes, ya que, al ser tuberías, la mayor transferencia de calor se da de forma

lineal a lo largo de dichas tuberías, pero para mejorar esto se muestra a continuación el rediseño del colector del refrigerante.

PARTE V

4.5. Resultado simulación V

La nueva versión del colector del refrigerante, y de los ductos internos del mismo, donde pasa el refrigerante generan una mejora en la transferencia de calor entre los componentes, y con esto una mejora en las temperaturas que se pueden apreciar en la Figura 70.

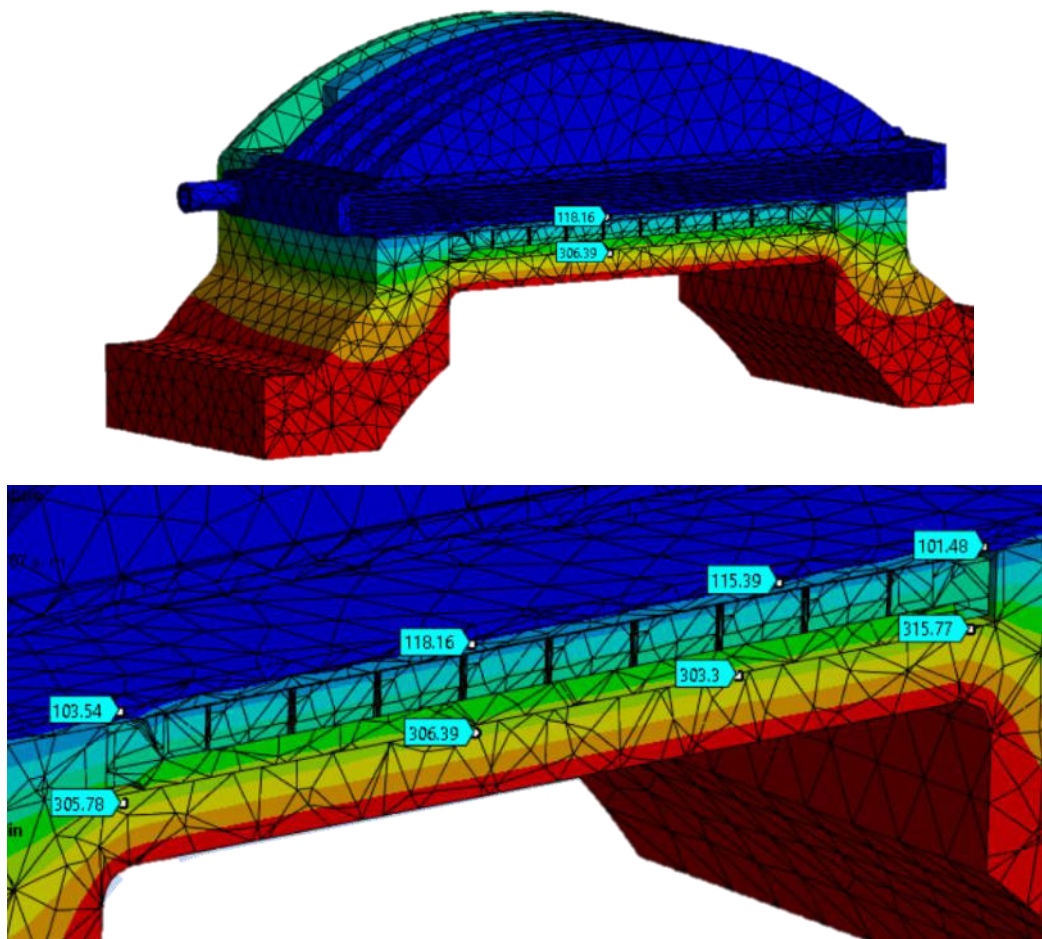


Figura 70 Temperaturas resultantes de la simulación V.

$$\Delta T = 306.39^{\circ}\text{C} - 118.16^{\circ}\text{C} = 188.23^{\circ}\text{C} \text{ aproximadamente.}$$

Finalmente, con este sistema, se observa que el diferencial de temperaturas está muy cercano a los 200°C establecidos a obtener, además de lograr que la temperatura del lado frío del módulo esté muy cerca de los 100°C y que la temperatura del lado caliente este

cerca de los 300°C. Además, esto se ordena y muestra también en el siguiente diagrama de flujo de operación con aceptación o rediseño en base a los resultados previos de cada simulación.

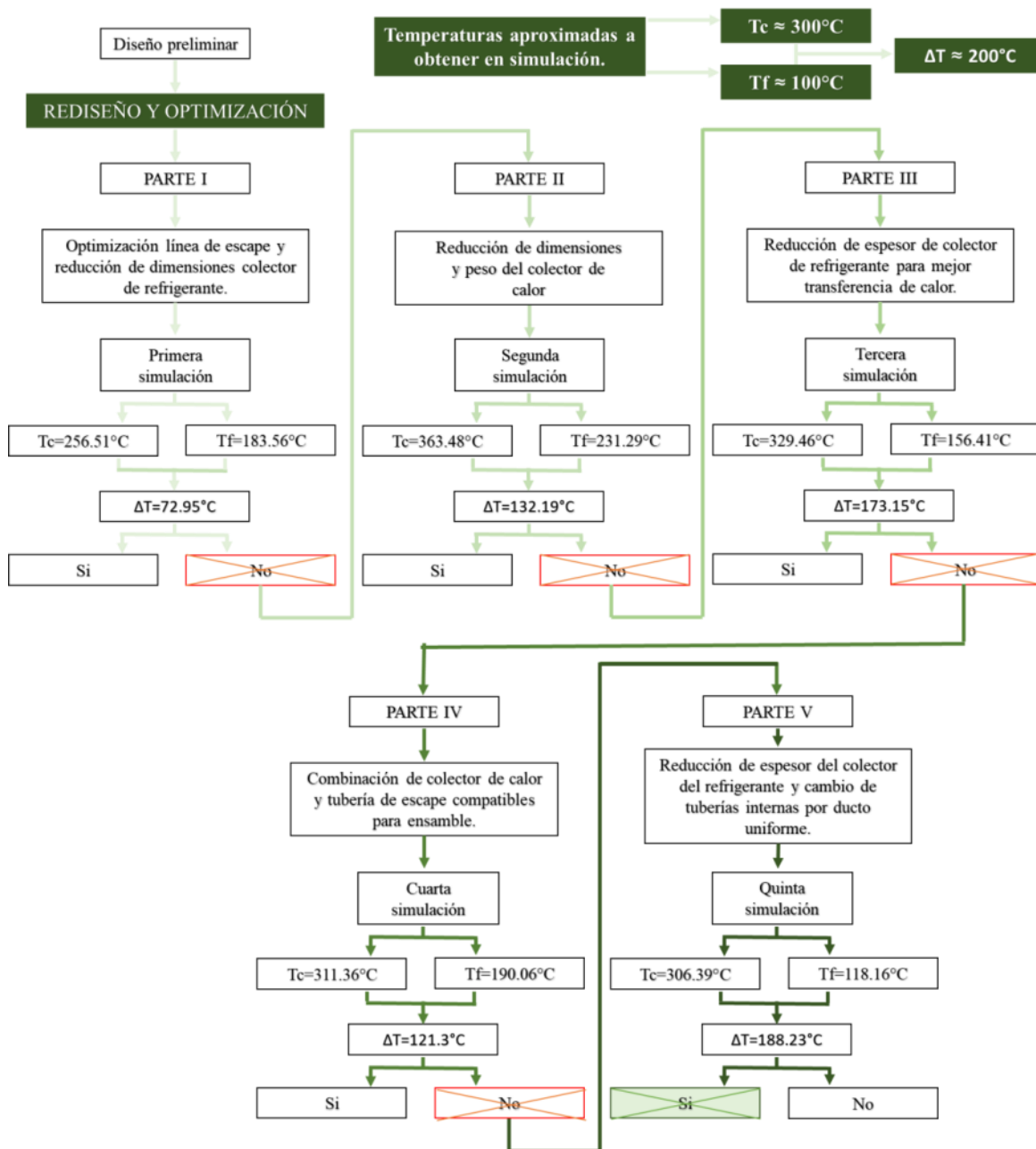


Figura 71 Diagrama de resultados obtenidos en base a rediseños y optimizaciones de los modelos CAD.

Donde, al establecer que con el diseño simplificado logrado en la parte 5 de la experimentación anterior, que permite la mejor transferencia de calor, y con ello, las temperaturas más cercanas a las requeridas por los módulos TEM, a continuación, se muestra en la Figura 72, los modelos CAD finales del sistema desarrollado.

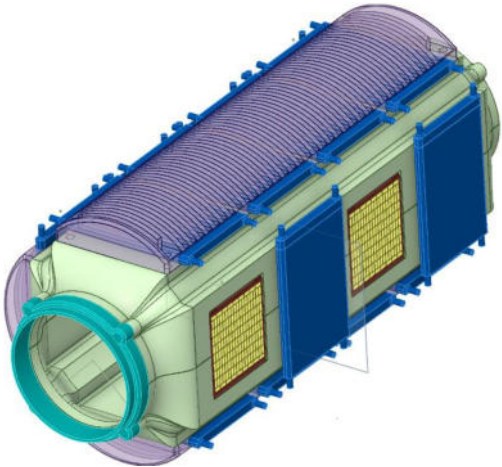


Figura 72 Diseño final del sistema TEG desarrollado.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 Conclusiones

Como se observó en el diagrama de la Figura 71 en el capítulo de resultados, en el primer diseño preliminar de cada componente, una vez realizado el análisis por elemento finito con la simulación de transferencia de calor, se obtuvieron temperaturas del lado caliente y del lado frío de $T_c = 256.51^\circ\text{C}$ y $T_f = 183.56^\circ\text{C}$, respectivamente, que resultan en un diferencial de temperaturas de $\Delta T = 72.95^\circ\text{C}$.

Esto no es nada óptimo considerando las expectativas de operación que son necesarias para que cada uno de los módulos TEM pueda generar corriente eléctrica. En este caso, las temperaturas aproximadas que se deben de lograr en la simulación son las siguientes.

$$T_c \approx 300^\circ\text{C}$$

$$T_f \approx 100^\circ\text{C}$$

$$\Delta T \approx 200^\circ\text{C}.$$

Con esto, posterior a la optimización en la segunda parte del rediseño con la reducción de dimensiones del colector de calor, además del ahorro en peso, se obtiene que $T_c = 363.48^\circ\text{C}$ y $T_f = 231.29^\circ\text{C}$, con lo que el diferencial de temperaturas resulta en $\Delta T = 132.19^\circ\text{C}$. Aquí con estas modificaciones se altera mucho la absorción de calor del sistema llevando a temperaturas por arriba de los 350°C , esto es deficiente ya que a esa temperatura los módulos TEM reducen drásticamente su vida útil.

Sin embargo, en la tercera parte de la optimización, se modificó el colector del refrigerante, permitiendo así enfriar de mejor manera el sistema, logrando las siguientes temperaturas: $T_c = 329.46^\circ\text{C}$ y $T_f = 156.41^\circ\text{C}$, con un diferencial de temperaturas resultante en $\Delta T = 173.15^\circ\text{C}$. Ahora los resultados se acercan más a los requeridos por el

módulo, pero la temperatura del lado caliente sigue estando muy cerca de los 350°C, siendo necesario reducir aún más ese dato.

En la parte cuatro de la optimización, al combinar la tubería de escape con el colector de calor para que formen un solo componente, se reduce mucho el material a cruzar por el calor transferido, obteniendo $T_c = 311.36^\circ\text{C}$ y $T_f = 190.06^\circ\text{C}$, con un diferencial de temperaturas resultante en $\Delta T = 121.3^\circ\text{C}$. Este resultado se ve afectado ahora en el lado de la temperatura fría, ya que se aumentó mucho, siendo necesario reducir ese dato.

Finalmente, en la parte cinco de la optimización, con la modificación en dimensiones del colector de refrigerante, así como el cambio de tuberías internas del mismo por ductos de sección de transferencia plana, que permite mejor la transferencia de calor y el enfriamiento del sistema, se obtiene lo siguiente: $T_c = 306.39^\circ\text{C}$ y $T_f = 118.16^\circ\text{C}$, con un diferencial de temperaturas resultante en $\Delta T = 188.23^\circ\text{C}$. Donde ahora estos resultados son lo suficientemente cercanos a los requeridos para el óptimo funcionamiento de los módulos TEM, sin llegar a perjudicar su vida útil.

El procedimiento y experimentación desarrollados en el presente documento funcionaron para concretar cuales son las posibilidades de generación de corriente eléctrica en función de la energía residual existente durante la operación y movimiento de un tractocamión clase VIII. Esta información permitió el desarrollo de un diseño de sistema tecnológico que podría reutilizar la energía calorífica desperdiciada por el motor, la cual no genera trabajo adicional para el desplazamiento, y podría convertirla en energía eléctrica almacenable.

El sistema de módulos TEM propuestos, que, en base a la investigación y el módulo seleccionado para el sistema, fue validado a través de una serie de experimentos con simulaciones en software numérico con análisis de elemento finito; mismo que permitió observar el comportamiento del sistema con las temperaturas internas del motor y refrigerante del mismo.

Al modelar cada componente y posteriormente simularlos en conjunto, se pudo observar el comportamiento de la transferencia de calor entre estos, de tal manera que pudieron tomarse decisiones para trabajar con un proceso de rediseño y optimización de cada uno de ellos hasta lograr una adecuada transferencia de calor, y alcanzar también que las paredes caliente y fría de los módulos TEM se estabilizaran hasta las temperaturas correctas de operación, para poder generar el potencial eléctrico que menciona el fabricante.

El sistema final teórico en base a las simulaciones realizadas es una potencial propuesta para el desarrollo de un prototipo físico que pruebe dichos resultados de temperaturas en la realidad. De tal modo que esto contribuya al desarrollo tecnológico para la reutilización de energías y la reducción de la utilización de combustibles que generen contaminantes en el medio ambiente. Además, mediante la investigación desarrollada se pudo comprender cuales son todas esas opciones de energía residual circundante al funcionamiento del tractocamión, con el fin de que se mostraron las ventajas y desventajas de cada una de ellas, generando al conocimiento científico acerca de cuáles son las potenciales fuentes de energía a aprovechar alrededor de cualquier vehículo de combustión interna.

Estas decisiones del estudio realizado aplicadas en los tractocamiones pueden ser útiles para el entendimiento de cualquier vehículo al cual se quiera agregar baterías para una movilidad híbrida, ya que las baterías podrían cargarse ya con el mismo funcionamiento de los motores de combustión interna aprovechando estas energías residuales.

Se prueba entonces que este tipo de estudio favorece a la investigación de energías alternas limpias que ayuden con las necesidades que se presentan en la movilidad actual. Con una fundamentación para posibles desarrollos y pruebas futuras sobre sistemas de este estilo.

5.2 Trabajo futuro

Se propone en un siguiente trabajo de investigación buscar alguna herramienta o software que permitiera simular la generación de corriente en las mismas circunstancias para el

módulo, es decir, probar previo a una manufactura la capacidad de generación de los módulos TEM en el sistema.

De no contar con algún software de este estilo, se continuaría el trabajo mediante la fabricación del prototipo físico, el modelo mismo simplificado para la simulación realizada en ANSYS podría fabricarse rápidamente, utilizando solo un módulo TEM, que permitiría que no fuera costoso, y buscar recrear el escenario en el que va a desenvolverse dentro del motor del camión.

Generando ese sistema prototipo físico y agregando las temperaturas necesarias para cada uno de los lados del módulo TEM, con una herramienta de medición se podrá observar como un módulo de forma independiente generará la carga, para así establecer definitivamente si el sistema funcionara en la realidad.

Esperando que, con las bases teóricas y experimentales obtenidas, posterior a este procedimiento de proyecto estudiado y a un prototipo fabricado, poder generar un sistema que pueda probarse en un motor de un tractocamión real, para observar el comportamiento del sistema hasta que el motor del camión y el refrigerante llegaran a las temperaturas necesarias de operación, y con esto, observar cuanta carga pueden generar realmente. Con el fin de continuar con el proceso de desarrollo para la implementación adecuada y optimización dentro de los espacios del tractocamión.

REFERENCIAS

- [1] M. Yolanda, R. Morales, L. Gerardo, and S. Vela, “Análisis de las características y capacidad de diseño de los vehículos de carga considerando la potencia y torque del motor del vehículo,” *Secretaria de comunicaciones y transportes*, 2014.
- [2] H. Holger Rogner and Popescu Anca, “Part I Energy and major global issues. Chapter 1: An introduction to energy.”
- [3] Walker Mort, “Chapter 2 Concept of energy,” 1996.
- [4] “Work, Kinetic Energy and Potential Energy,” Cookeville Tennessee, USA.
- [5] Maxwell Clerk J., “Theory of heat,” London., 1872.
- [6] Eduardo. Alomá Chávez and Manuel. Malaver, “Los conceptos de calor, trabajo, energía y teorema de Carnot en textos universitarios de termodinámica.,” *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. REDALYC.*, vol. 11, Sep. 2007.
- [7] Ramalingam and K.K., “Handbook of Mechanical Engineering Terms,” 2009.
- [8] B. L. Theraja and Theraja A. K., “A textbook of electrical technology. Volume II. AC and DC machines,” 2007.
- [9] A. Royale, “Hybrid vehicle thermal energy recovery systems,” 2021.
- [10] M. Mohan Behera, “Piezoelectric Energy Harvesting from Vehicle Wheels,” Odisha, India., May 2015.
- [11] R. S. Dahiya and M. Valle, *Robotic tactile sensing: Technologies and system*, vol. 9789400705791. Springer Netherlands, 2014. doi: 10.1007/978-94-007-0579-1.
- [12] A. Mamgai, “REGENERATIVE BRAKING SYSTEMS (RBS),” New Delhi, Delhi, India., 2021.
- [13] P. Bhandari, S. Dubey, S. Kandru, and R. Deshbhratar, “Regenerative Braking Systems (RBS),” 2017.
- [14] A. Thiruvengadam, S. Pradhan, P. Thiruvengadam, M. Besch, D. Carder, and O. Delgado, “Heavy-Duty Vehicle Diesel Engine Efficiency Evaluation and Energy Audit.,” 2014.
- [15] A. Ross, “Making Stirling Engines,” 1993.

- [16] E. Cisneros, L. Carlos, G. Almeida, and J. Luis, “Diseño y construcción de un motor Stirling solar para el laboratorio de termodinámica.,” 2011.
- [17] Beltrán-Chacón R, “Analysis and Design of a Dish/Stirling System for Solar Electric Generation with a 2.7 kW Air-Cooled Engine Velázquez-Limón N,” *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 1, pp. 43–53, 2012.
- [18] R. Muñoz Zurdo, “Diseño de un sistema termoelectrico aprovechando características geométricas.,” 2013.
- [19] “Clean Energy Project Analysis Third Edition RETScreen ® Engineering & Cases Textbook,” Canada, 2005.
- [20] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, “Wind Energy Explained: Theory, Design and Application,” 2010.
- [21] R. Corkish, W. Lipiński, and R. J. Patterson, “Introduction to Solar Energy,” 2016, pp. 1–29. doi: 10.1142/9789814689502_0001.
- [22] A. Arulious Jora, D. Earlina, D. Harish, P. Sakthi Priya, A. Inba Remy, and J. S. Nancy Mary, “Design of solar powered electric vehicle,” in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Nov. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/2070/1/012105.
- [23] G. R. Chandra Mouli, P. Bauer, and M. Zeman, “System design for a solar powered electric vehicle charging station for workplaces,” *Appl Energy*, vol. 168, pp. 434–443, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.01.110.
- [24] M. C. Laguna, “Development and characterization of thermoelectric generators for thermal energy recovery from reciprocating internal combustion engines.,” 2019. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10803/668142>
- [25] B. I. Ismail and W. H. Ahmed, “Thermoelectric power generation using waste-heat energy as an alternative green technology,” *Recent Patents on Electrical Engineering*, vol. 2, no. 1. pp. 27–39, Jan. 2009. doi: 10.2174/1874476110902010027.
- [26] D. M. Rowe, “Thermoelectric waste heat recovery as a renewable energy source.,” *International Journal of Innovations in Energy Systems and Power.*, vol. 2, no. 1. pp. 27–39, Jan. 2006. doi: 10.2174/1874476110902010027.

- [27] T. Taguchi, “Exhaust heat recovery power generation device and automobile equipped therewith.,” *United States Patent Application Publication* , 2006.
- [28] Weiling L and Shantung TU., “Recent developments of thermoelectric power generation.” Jan. 2004. doi: 10.2174/1874476110902010027.
- [29] M. R. A. Bhuiyan, H. Mamur, M. A. Ustuner, and O. F. Dilmac, “Current and Future Trend Opportunities of Thermoelectric Generator Applications in Waste Heat Recovery,” *Gazi University Journal of Science*, vol. 35, no. 3. Gazi Universitesi, pp. 896–915, Sep. 01, 2022. doi: 10.35378/gujs.934901.
- [30] C. Cekdin, Z. Nawawi, and M. Faizal, “The usage of thermoelectric generator as a renewable energy source,” *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 18, no. 4, pp. 2186–2192, 2020, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.V18I4.13072.
- [31] N. P. Bayendang, M. T. Kahn, and V. Balyan, “Thermoelectric Generators (TEGs) modules—Optimum electrical configurations and performance determination,” *AIMS Energy*, vol. 10, no. 1, pp. 102–130, 2022, doi: 10.3934/ENERGY.2022007.
- [32] S. Ezzitouni *et al.*, “Electrical modelling and mismatch effects of thermoelectric modules on performance of a thermoelectric generator for energy recovery in diesel exhaust systems,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 11, Jun. 2021, doi: 10.3390/en14113189.
- [33] Z. Dashevsky, A. Jarashneli, Y. Unigovski, B. Dzunzda, F. Gao, and R. Z. Shneck, “Development of a High Performance Gas Thermoelectric Generator (TEG) with Possible Use of Waste Heat,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 11, Jun. 2022, doi: 10.3390/en15113960.
- [34] D. W. Ao *et al.*, “Novel Thermal Diffusion Temperature Engineering Leading to High Thermoelectric Performance in Bi₂Te₃-Based Flexible Thin-Films,” *Advanced Science*, vol. 9, no. 5, Feb. 2022, doi: 10.1002/advs.202103547.
- [35] Y. Zhao *et al.*, “Thermoelectric performance of an exhaust waste heat recovery system based on intermediate fluid under different cooling methods,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 23, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.csite.2020.100811.
- [36] J. N. Reddy, “Introduction to the Finite Element Method,” 2019. [Online]. Available: <http://mechanics.tamu.edu>.

- [37] G. P. Nikishkov, "INTRODUCTION TO THE FINITE ELEMENT METHOD," Aizu-Wakamatsu Japan, 2004.
- [38] A. Saxena and B. Sahay, "Computer Aided Engineering Design," 2005.
- [39] J. C. Torres, "Diseño Asistido por Ordenador." 2021.
- [40] "HZ-20HV 20W TEG Module Data Sheet."

RESUMEN BIOGRAFICO

Ing. Guillermo Castillo Córdova

Candidato para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz

Tesis:

METODOLOGÍA DE APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA RESIDUAL PARA GENERACIÓN DE CORRIENTE ELÉCTRICA EN UN TRACTOCAMIÓN CLASE VIII.

El Ing. Guillermo Castillo Córdova nació en la ciudad de Zacatecas, México el 25 de noviembre de 1997. Es hijo de la Sra. María Elizabeth Córdova López y el Sr. Guillermo Castillo Dávila.

Cursó sus estudios de licenciatura en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Autónoma de Zacatecas culminando en mayo del 2021. Inicio la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz en agosto del 2021 becado por CONACYT.