



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Título

**SIMULACIÓN DE UN RECUPERADOR DE CALOR
PARA GASES DE ESCAPE BASADO EN
MATERIALES TERMOELÉCTRICOS.**

Autor

Gonzalo Gainza Moreno

Director

Sergio Usón Gil

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Junio de 2015

SIMULACIÓN DE UN RECUPERADOR DE CALOR PARA GASES DE ESCAPE BASADO EN MATERIALES TERMOELÉCTRICOS

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrollará el diseño de un termogenerador destinado a vehículos provistos de motor de combustión interna, pero en concreto, la geometría se ha adaptado a mi coche particular, un Peugeot 206, y tiene como objetivo principal desacoplar el alternador del motor en la medida de lo posible para así reducir el consumo de combustible.

En primer lugar, se ha elaborado la memoria descriptiva en la que se incluye un primer capítulo de introducción, un segundo en el que se exponen las consideraciones de partida como por ejemplo el vehículo en el que se basa el trabajo, las temperaturas establecidas, las características geométricas y una breve introducción a las experiencias previas. El tercer capítulo abarca las etapas de diseño y su justificación así como el modelo realizado en AutoCAD.

El siguiente capítulo sería el referente al modelo de cálculo exponiendo las ecuaciones fundamentales en las que se ha basado este trabajo. El quinto capítulo recopila los resultados numéricos obtenidos con EES al que se ha añadido un análisis paramétrico considerando distintas situaciones de partida. En el sexto capítulo se ha diseñado un esquema básico del control de la válvula del baipás y el acoplamiento conjunto con el alternador a la batería. El séptimo capítulo recoge las conclusiones generales que se extraen del trabajo y por último, un octavo donde aparece una recopilación de bibliografía de consulta.

Y en segundo lugar se han adjuntado cuatro anexos. El contenido de los mismos es el siguiente:

- ANEXO I: REVISIÓN DE ESTA TECNOLOGÍA.

Este primer anexo se compone de dos partes. La primera corresponde con la revisión de artículos técnicos en los que se puede ver el estado de la tecnología y avances actuales a los que han llegado algunos fabricantes. Y la segunda revisión corresponde con artículos científicos en los que han trabajado grupos investigadores de varias universidades de distintos países.

- ANEXO II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y APLICACIONES.

Este segundo anexo está formado por una revisión teórica de la termoelectricidad como una ciencia, las bases en las que se fundamenta y algunas de las aplicaciones en las que se le da uso.

- ANEXO III: CÁLCULOS.

Anexo compuesto por el código fuente del modelo de cálculo implementado en el programa EES (Engineering Equation Solver) en el cual aparecen los todos los resultados que se han obtenido, tanto los concluyentes como los resultados de los pasos intermedios.

- ANEXO IV: DOCUMENTACIÓN TÉCNICA Y OTRAS IMÁGENES DE INTERÉS.

Por último, este anexo se compone de la documentación técnica de los módulos termoeléctricos que forman el generador, gráficas de interés e imágenes aclaratorias de la disposición del dispositivo en el vehículo.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	1
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.	
1.1 ORIGEN DEL TRABAJO	2
1.2 OBJETO	2
1.3 ALCANCE	3
1.4 ACLARACIONES TERMINOLÓGICAS	3
CAPÍTULO 2: CONSIDERACIONES INICIALES.	
2.1 ELECCIÓN DEL VEHÍCULO	4
2.1.1 Situación en el vehículo	4
2.1.2 Medidas del espacio libre bajo el vehículo	6
2.1.3 Estimación de las necesidades eléctricas de este vehículo	7
2.2 CONDICIONES DE TRABAJO DEL GENERADOR TERMOELÉCTRICO	8
2.2.1 Principio de funcionamiento	8
2.2.2 Proceso de generación de electricidad	9
2.2.3 Consideraciones de temperatura en el vehículo	9
2.3 INTRODUCCIÓN A LA REVISIÓN DE EXPERIENCIAS PREVIAS	9
CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL GENERADOR TERMOELÉCTRICO.	
3.1 ETAPAS DE DISEÑO	10
3.1.1 Diseño de la estructura	10
3.1.2 Elección de los módulos termoeléctricos	10
3.1.3 Sistema de aleteado	11
3.1.4 Refrigeración del TEG	11
3.1.5 Disposición de los módulos	12
3.1.6 Válvula del baipás	12
3.1.7 Diseño básico con software CAD	13

CAPÍTULO 4: MODELO DE CÁLCULO.

4.1 MODELO DE PARTIDA	15
4.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	15
4.3 BALANCE EXERGÉTICO	18

CAPÍTULO 5: RESULTADOS OBTENIDOS.

5.1 RESULTADOS PARA EL VEHÍCULO DE REFERENCIA	19
5.2 ANÁLISIS PARAMÉTRICO	21

CAPÍTULO 6: ESQUEMA BÁSICO ELECTRÓNICO DE CONTROL DE APERTURA DE LA VÁLVULA DEL BAIPÁS Y ACOPLAMIENTO CONJUNTO DEL TEG CON EL ALTERNADOR A LA BATERÍA.	27
--	-----------

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES	32
---------------------------------------	-----------

BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA	33
---------------------------------------	-----------

ANEXOS

ANEXO I: Revisión de esta tecnología.

ANEXO II: Fundamentos teóricos y aplicaciones.

ANEXO III: Cálculos.

ANEXO IV: Documentación técnica y otras imágenes aclaratorias.

AGRADECIMIENTOS

Como no podría ser de otra manera, en primer lugar he darle las gracias a mi familia: mis padres, mi hermana y mi novia puesto que sin su esfuerzo y apoyo en los momentos más difíciles el camino hasta este punto se habría tornado más complicado. A Sergio Usón, director de este TFG por su acogimiento y atención durante estos meses. Agradezco también la ayuda y consejo de Manuel G. Bedia y Javier Roy, profesores de esta escuela que también me han marcado en mi paso por aquí. A mis compañeros y amigos de carrera, Iñaki, Miguel, Jesús, Juan y Alberto F. A mis amigos de siempre y a Serve, mi incondicional de los jueves. Y por último y no por ello menos importante, he de agradecer profundamente a Javier Gainza, su paciencia y dedicación desinteresada hacia mí durante toda la carrera, no ha podido haber otro mejor.

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

1.1. ORIGEN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

Este trabajo surge de la necesidad en la sociedad actual de reducir el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.

Del mismo modo que hablamos del uso de esta tecnología en automoción, se puede extrapolar a cualquier medio de transporte o proceso industrial que se nutra de un motor térmico para su funcionamiento.

Las normativas europeas sobre contaminación de vehículos (la actual para coches es la Euro VI) son cada vez más restrictivas en los límites marcados, hecho que obliga al desarrollo de nuevas tecnologías para aprovechar mejor el combustible.

Cuando vemos que el rendimiento actual de los motores de combustión interna se sitúa entre un 25% y un 35%, nos damos cuenta que tenemos margen para impulsar ideas como la presentada en este trabajo, que nos pueden ayudar a mejorar la eficiencia de estas máquinas.

1.2. OBJETO

El objetivo principal de este trabajo es diseñar un termogenerador que nos entregue la potencia suficiente para, en el mejor de los casos, desacoplar el alternador del vehículo o al menos reducir su funcionamiento.

Haciendo una síntesis, los principales pilares de este trabajo son:

- Recuperación de la energía del calor de los gases de escape de una máquina térmica.
- Transformación de la energía térmica en energía eléctrica con el mayor rendimiento posible.
- Reducción del consumo de combustible.
- Integrar las soluciones tecnológicas.
- Impulsar una tecnología muy poco conocida tanto por profesionales de la automoción como por la sociedad en general.

A partir de estas ideas, se consigue aminorar las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.

Aun así, por motivos de fiabilidad del funcionamiento de nuestro vehículo, se podrá montar un alternador lo más pequeño posible para que en momentos de picos de potencia eléctrica requerida, pueda ser conectado si el generador termoeléctrico no la puede entregar. Además sirve de generador auxiliar en caso de avería del termogenerador o de otros elementos.

1.3. ALCANCE

El alcance de este trabajo es muy amplio, porque aunque el objetivo es una reducción del consumo de combustible, los temas abordados son muy diversos, entre ellos están la termodinámica, la tecnología de materiales, y la eléctrica / electrónica.

Un resumen de las metas fijadas en este trabajo son:

- Revisión del estado del arte de esta tecnología y experiencias previas.
- Introducir a los fundamentos teóricos de la termoelectricidad.
- Realizar un modelo de cálculo con EES.
- Análisis paramétrico comparando distintas condiciones de diseño, refrigeración, etc.
- Análisis exergético.
- Diseño básico 2D en un software CAD.
- Diseño básico de un esquema electrónico de control.

1.4. ACLARACIONES TERMINOLÓGICAS

Con el fin de evitar posibles confusiones en la terminología de este trabajo, es conveniente aclarar que cuando se habla de “termogenerador” se trata de una abreviatura de generador termoeléctrico, ambos términos son correctos para designar la misma máquina. También cabe decir, que cuando se hace uso de la abreviatura “TEG”, corresponden a las siglas en inglés de “ThermoElectric Generator” que es lo mismo que lo comentado anteriormente.

CAPÍTULO 2:

CONSIDERACIONES INICIALES

2.1. ELECCIÓN DEL VEHÍCULO.

Aunque la idea de este trabajo es diseñar un termogenerador que se pueda implantar en cualquier vehículo con motor térmico del mercado, para poder tomar todas las especificaciones técnicas y las cotas adecuadamente, he decidido utilizar mi vehículo particular como ejemplo para el montaje y el análisis del TEG.

El vehículo en cuestión es un Peugeot 206 del año 2002. Monta un motor tetra-cilíndrico turbodiesel de inyección directa con una cilindrada de 1400 cm^3 y una potencia de 68 cv (50 kW).



Figura 2.1. Vista principal del vehículo seleccionado.

2.1.1. Situación en el vehículo.

Se ha levantado el coche con un elevador hidráulico para poder seleccionar el hueco óptimo donde implantarlo y tomar las cotas de dicha cavidad.

Se ha decidido colocar el TEG en la línea del tubo de escape del vehículo, lo más cercano al colector de escape posible para aprovechar las temperaturas más elevadas, en la zona baja del coche y paralela al suelo. En este modelo, el elemento inmediatamente posterior al colector

de escape es la turbina del turbocompresor, a continuación se monta el convertidor catalítico o catalizador y tras éste es donde se va a colocar el generador termoeléctrico.

La posición relativa del TEG con respecto al coche completo se sitúa en el segundo cuarto del total, dicho de otro modo, la parte final del TEG correspondería con aproximadamente la mitad de la longitud del vehículo.

Se ha diseñado para que quede un hueco libre entre el TEG y la calzada lo suficientemente amplio para mantener una distancia de seguridad en caso de terrenos muy abruptos.

A continuación se muestran dos imágenes ilustrativas tomadas de la posición que ocupa.

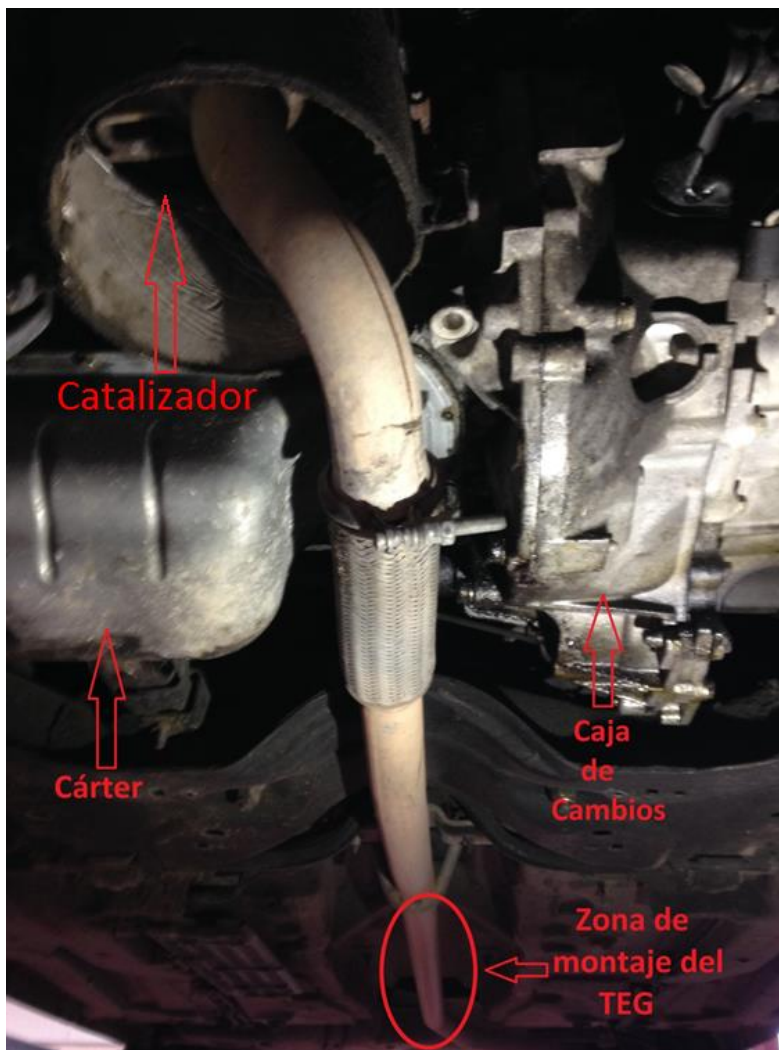


Figura 2.2. Vista inferior de la zona de montaje.



Figura 2.3. Vista inferior de la zona de montaje.

2.1.2. Medidas del espacio libre bajo el vehículo.

El espacio escogido es el que se puede ver en la Figura 2.3 y tiene unas cotas totales de 500 mm. de longitud, 240 mm. de anchura y 120 mm. de altura. En esa cavidad es donde se alojará el TEG rodeando perimetralmente al tubo de escape.

Cotas detalladas:

- Longitud libre de tramo recto: 500 mm.
- El espacio entre la zona de chapa más baja del coche hasta la varilla que transmite el movimiento de la palanca a la caja de cambios (altura): 120 mm.
- La anchura en la parte superior es de: 240 mm.
- La anchura en la parte inferior es de: 290 mm.
- El espacio libre que queda entre la zona de chapa más baja del coche hasta el punto en el espacio que correspondería cuando las suspensiones estuviesen totalmente comprimidas (caso más desfavorable): 85 mm.

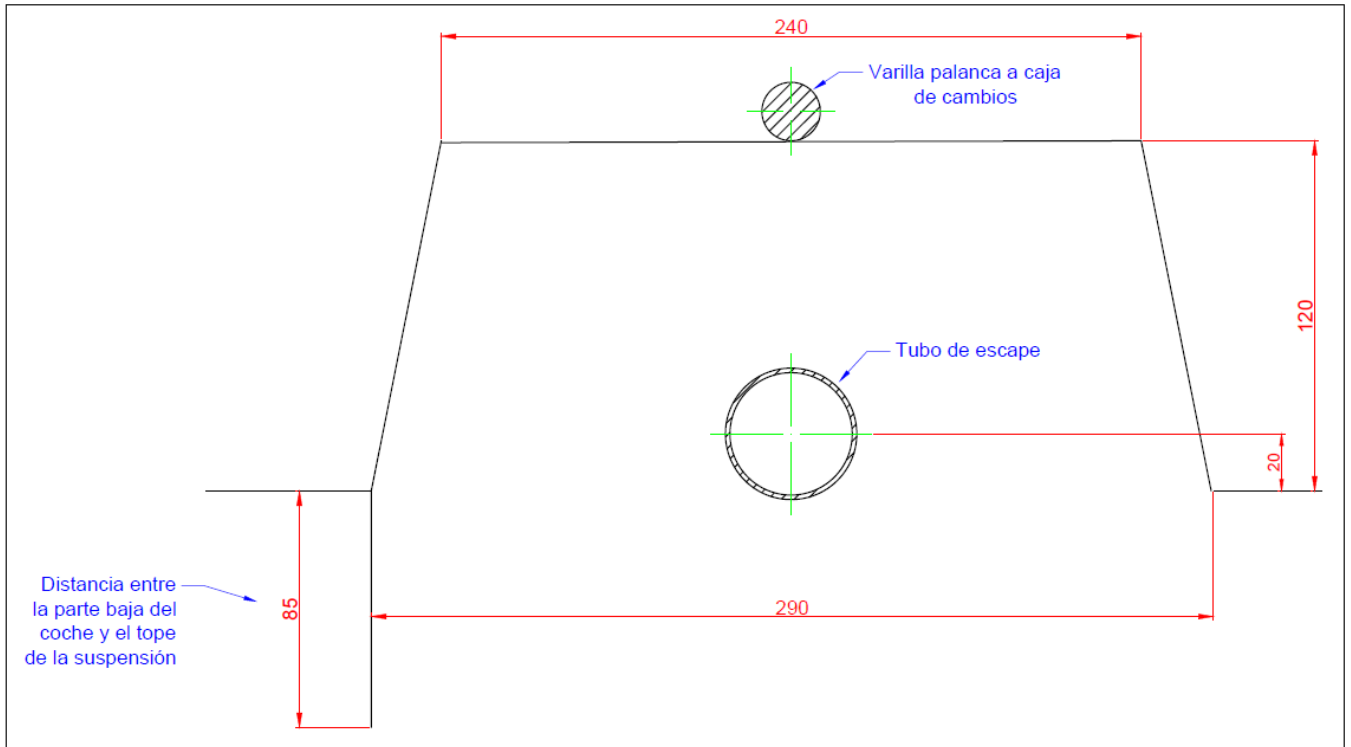


Figura 2.4. Plano del hueco donde se ubicará el TEG.

2.1.3 Estimación de las necesidades eléctricas de este vehículo.

Para calcular la potencia eléctrica requerida se ha hecho una revisión del manual de usuario en el cual detallan la potencia de los elementos de iluminación para el caso de tener que sustituirlos por desgaste o avería. De los elementos que no aparecen en dicho manual se ha hecho una búsqueda de información en un taller especializado de este fabricante francés.

Únicamente se han tenido en cuenta los sistemas que incorpora este modelo, se han desestimado otros posibles equipamientos más completos como pudiera ser sistema de navegación GPS, asientos eléctricos y calefactables, etc.

Es evidente que cuando se conduce un coche no pueden estar en funcionamiento todos los sistemas que requieren potencia eléctrica al mismo tiempo, por esta razón la suma total se ha multiplicado por un coeficiente de simultaneidad de 0,5 por lo que la potencia máxima en un caso desfavorable podría ser en torno a 575 W (según recoge la Tabla 2.5). Para casos extraordinarios en los que se produzcan picos de demanda de potencia siempre podrá actuar el alternador.

En la siguiente tabla se muestran los consumos eléctricos de los elementos que integra el coche.

Elemento	Consumo (W)	Cantidad	Total (W)
Luces población delanteras	5	2	10
Luces población traseras	5	2	10
Luces cortas / largas	60	2	120
Intermitentes principales	21	4	84
Intermitentes laterales	5	2	10
Luces marcha atrás	21	2	42
Luces freno principales	21	2	42
3ª luz de freno	5	5	25
Luz antiniebla trasera	21	1	21
Luces matrícula	5	2	10
Luz alumbrado maletero	5	1	5
Luz alumbrado interna	10	1	10
Luces cuadro mandos	5	4	20
Luz cenicero	2	1	2
Sistema calefacción / AACC	100	1	100
Equipo de sonido	100	1	100
Control motor (ECU, sensores)	50	1	50
Ventiladores	100	2	200
Limpia parabrisas (bomba agua + motor escobillas)	100	1	100
Elevavinas eléctrico	50	1	50
Cuadro de mandos	25	1	25
Compresor AACC	100	1	100
Gestión TEG	10	1	10
		TOTAL	1146

Tabla 2.5. Recopilación de los consumos eléctricos del vehículo estudiado.

2.2. CONDICIONES DE TRABAJO DEL GENERADOR TERMOELÉCTRICO.

2.2.1. Principio de funcionamiento.

Al quemarse la mezcla en la cámara de combustión de un motor térmico se liberan una gran cantidad de gases a una temperatura muy elevada. Esta temperatura es precisamente la que aprovecha el TEG para generar electricidad. Los productos de la combustión recorren la línea de escape hasta que se hacen circular entre las aletas del termogenerador para que cedan parte de su calor a los módulos que son los encargados de generar la caída de tensión entre sus polos. Posteriormente el gas se dirige hacia el silenciador y a continuación es liberado a la atmósfera.

2.2.2. Proceso de generación de electricidad.

Cuando sometemos el material termoeléctrico a un gradiente de temperatura se produce una difusión neta de portadores de carga hacia el lado frío debido a una dependencia de movilidad de éstos con la temperatura y el resultado es una diferencia de potencial en los extremos del módulo.

2.2.3. Consideraciones de temperatura en el vehículo.

Temperatura de los gases.

La temperatura de los gases de la combustión sube con la carga que se esté demandando, como se puede ver en la Figura 9.4.5 del Anexo IV. En un motor turbodiésel las temperaturas de salida en el colector de escape suponiendo cargas medias ronda los 800 °C. Hay que tener en cuenta que estos gases pasan a continuación por la turbina del turbo y posteriormente en este caso por el catalizador, elementos en los que el gas sufre una expansión y pierde temperatura a su paso. Por esta razón se ha fijado una temperatura media a la entrada del dispositivo de 500 °C (773 K).

Temperatura del refrigerante.

El objetivo para un buen funcionamiento del termogenerador es conseguir el mayor salto térmico entre el foco caliente y el foco frío. Se ha optado por evacuar el calor con el mismo líquido refrigerante del coche que en este caso su temperatura normal de trabajo son 80 °C como se puede observar en la Figura 9.4.4 del Anexo IV.

2.3. INTRODUCCIÓN A LA REVISIÓN DE EXPERIENCIAS PREVIAS.

Varios fabricantes de coches llevan trabajando en este campo más de una década mejorando sus diseños con el paso de los años. Toda la información desarrollada referente al estado de esta tecnología se puede consultar en el Anexo I. Pero a continuación se introduce de forma resumida algunos de los resultados a los que han llegado dichos fabricantes:

- **BMW**: en el año 2003 comenzaron con un prototipo del que consiguieron sacar 80 W de potencia eléctrica, poco a poco fueron desarrollándolo obteniendo 200 W en el año 2006, más adelante 300 W en el 2008 hasta los 600 W de potencia que les entrega el prototipo probado en el modelo X6 durante año 2011.
- **VOLKSWAGEN**: esta firma alemana montó en 2008 un diseño de TEG en el Volkswagen Golf del que consiguieron extraer casi 600 W.
- **GENERAL MOTORS**: esta empresa obtuvo en el año 2011, 350 W en ciclo urbano y 600 W en ciclo abierto en el Chevrolet Suburban.
- **FORD**: esta compañía americana anticipó 500 W de pico en su diseño del año 2011.

CAPÍTULO 3:

DISEÑO DEL GENERADOR TERMOELÉCTRICO

3.1. ETAPAS DEL DISEÑO.

Todos los pasos de este capítulo se han sido pensados teniendo como base las características geométricas de este vehículo expuestas en el Capítulo 2.

3.1.1. *Diseño de la estructura.*

La sección externa es dodecagonal para asemejarse lo máximo posible a una circunferencia y hacer la transferencia de calor más homogénea y además, por razones de disposición de los módulos que se explica en el apartado 3.1.5 de este mismo capítulo.

El material elegido para la estructura es el aluminio debido a su alta conductividad térmica (solo superada en metales convencionales por el cobre), su baja densidad que le concede gran ligereza, su facilidad para el moldeo por extrusión que sería un buen método con el que se podría fabricar y por último sus excelentes propiedades contra la oxidación ya que forma una capa natural de alúmina (Al_2O_3) que al ser ya un óxido, evita la corrosión.

3.1.2. *Elección de los módulos termoeléctricos.*

Hoy en día los módulos termoeléctricos están fabricados por semiconductores dopados. Este dopaje quiere decir que hay uno de los semiconductores con un exceso de electrones y otro con un exceso de huecos. Se emplean este tipo de materiales debido a que tienen una figura de mérito 'Z' muy elevada. Se han valorado varias opciones para esta fase, entre ellas módulos de telurio de plomo ($TePb$) y módulos de telurio de bismuto (Te_2Bi_3).

Hay dos criterios fundamentales a la hora de decidir qué módulos se van a usar en este trabajo.

- El primero es la temperatura máxima que pueden soportar.

En este caso el telurio de plomo aguanta temperaturas de hasta 600 °C y el telurio de bismuto temperaturas más bajas que tienen el límite en 330 °C.

- El segundo es la capacidad de generación.

La cantidad de electricidad y la eficiencia en la generación de los módulos es una parte fundamental de a cara a necesitar el mínimo número de elementos posibles y que ocupen un espacio reducido.

Finalmente se ha optado por módulos de telurio de bismuto de la empresa china "Thermonamic Electronics Corp., Ltd." que son con los que mediante el proceso de cálculo han dado mejores resultados en este trabajo y se adaptan al espacio disponible. En el Anexo IV de documentación técnica se adjunta la hoja de características.

3.1.3. Sistema de aleteado.

Cuando el termogenerador está produciendo electricidad, los gases de combustión circulan por un conducto en el cual se realiza la transferencia de calor a los módulos termoeléctricos. Para favorecer dicha transferencia de calor se optimiza la sección de paso y se disponen una serie de aletas que mejoran el coeficiente de convección del intercambiador en el lado de los gases.

Se han tenido varios detalles en cuenta a la hora de optimizar la sección de paso. Un aspecto importante ha sido diseñar la sección de paso lo más grande posible (y nunca menor o igual a la sección del tubo de escape original para evitar pérdidas de carga del motor) buscando un compromiso con mantener el flujo turbulento para poder utilizar las correlaciones apropiadas mediante las que obtenemos un coeficiente de convección (h_{conv}) más elevado. En el caso límite de que la sección del tubo original y de la nueva sección fuesen iguales, se tendrían pérdidas de carga en el motor porque al introducir aletas el área en contacto o perímetro húmedo aumenta y esto favorece a las pérdidas por fricción con las superficies de contacto.

El número de aletas final ha sido de 65 con un espesor de 3 mm. Se disponen axialmente a lo largo de todo el termogenerador y poseen una longitud total de 400 mm.

Se ha respetado una distancia mínima de 4 mm entre aleta y aleta para evitar obturaciones con las partículas en suspensión producidas en los motores diésel ya que este vehículo no dispone de filtro de partículas.

Las aletas se incluyen como parte de la estructura global por lo tanto están fabricadas en aluminio. En el apartado 3.1.7 de este capítulo se puede ver su diseño de forma gráfica.

3.1.4. Refrigeración del TEG.

Este es uno de los puntos más importantes del diseño puesto que la producción de potencia neta se va a ver beneficiada cuanto más grande sea la diferencia de temperaturas entre la cara caliente y la cara fría del módulo.

Se ha elegido el mismo líquido refrigerante que utiliza el motor para el TEG haciendo una derivación en el circuito principal para llevarlo hasta el dispositivo. El refrigerante se hace pasar a contraflujo con el humo para que de este modo mejore la evacuación calor. Para este apartado también se ha valorado la refrigeración mediante el aire atmosférico que circula bajo el coche cuando se avanza, pero al tener el agua un calor específico a presión constante casi cuatro veces superior al del aire y que ciertas superficies del TEG no están en contacto directo con los flujos exteriores, se ha optado por la refrigeración líquida para disminuir la temperatura del foco frío. El líquido refrigerante se hace circular a través de una cavidad de sección rectangular, fabricada en aluminio y cercana a la cara exterior de los módulos (véase Figura 3.2). Se ha procurado diseñar dicha cavidad para obtener un coeficiente de convección alto y evacuar el máximo calor posible.

En el Capítulo 5 se expondrá un supuesto en el que se coloca un circuito de refrigeración independiente para el termogenerador en la parte delantera del coche y así disminuir todavía más la temperatura de foco frío.

3.1.5. Disposición de los módulos.

El termogenerador está compuesto por un total de 120 módulos. La disposición axial la forman 10 coronas o secciones (véase Figura 3.3) y cada una de ellas se compone a su vez por 12 módulos colocados radialmente.

La conexión eléctrica dentro de una misma fila de módulos se realizará en serie mientras que cada una de las 12 filas entre sí se conectará en paralelo con diodos para que no se puedan descargar una fila a través de otra.

3.1.6. Válvula del baipás.

Antes de que los gases de combustión provenientes del motor se distribuyan en la zona aleteada, se ha colocado una válvula de mariposa de cuarto de vuelta y eje centrado que controla el flujo de gases del baipás y cuyo eje está unido solidariamente por un lado a un potenciómetro que da una tensión en función del ángulo de giro de la válvula según la Figura 6.3 y por el otro a un motor que controla su apertura.

Cuando el TEG no precisa potencia la válvula se abre permitiendo el paso de los gases por el baipás con lo que se reduce la aportación de calor al circuito de refrigeración del vehículo y se aumenta la vida del material termoeléctrico del que están compuestos los módulos.

3.1.7. Diseño básico con software CAD.

A continuación se muestran tres imágenes representativas del modelo.

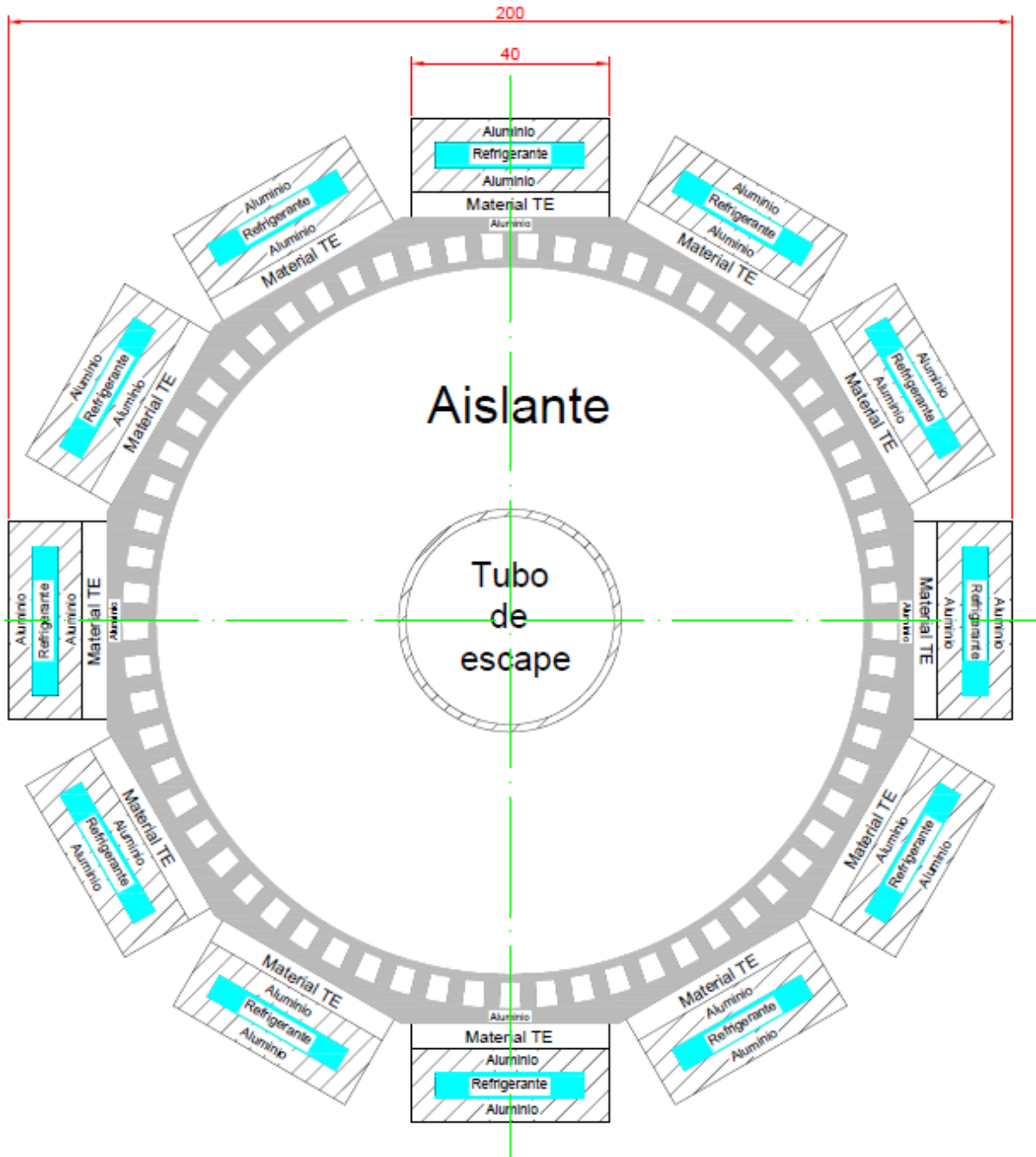


Figura 3.1. Sección transversal del TEG.

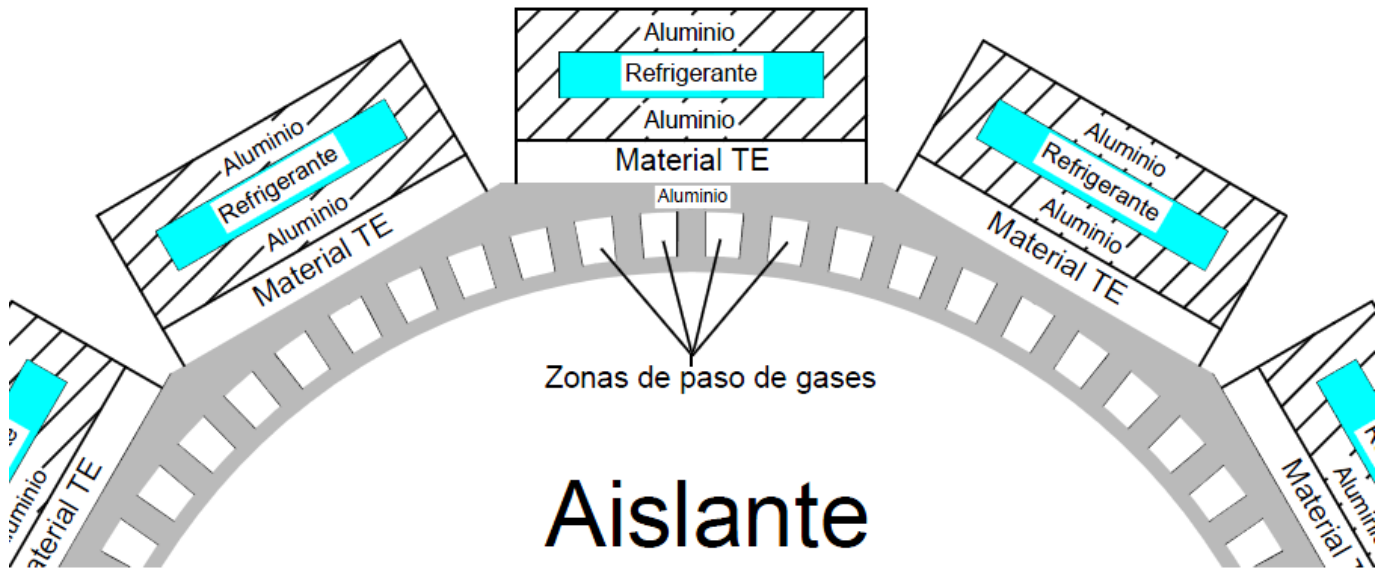


Figura 3.2. Detalle de sección transversal del TEG.

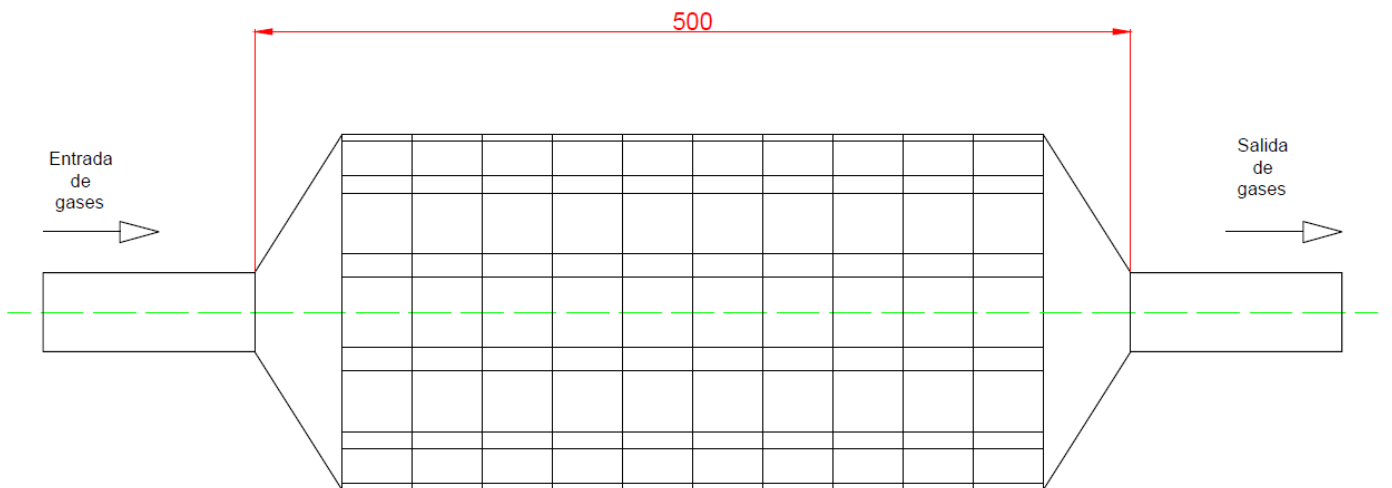


Figura 3.3. Vista de alzado del TEG y del flujo de gases.

CAPÍTULO 4:

MODELO DE CÁLCULO

Este capítulo trata de ofrecer una primera aproximación a los pasos que se han seguido para llegar al resultado final. En caso de que el lector tenga alguna duda, puede consultar el Anexo III en el que se detalla el proceso de cálculo paso a paso.

4.1. MODELO DE PARTIDA.

Para realizar todos los cálculos en este trabajo se ha utilizado el programa informático EES y se han tenido que asumir unas condiciones de partida.

Los cálculos se han realizado cuando el vehículo circula en carrera abierta a una velocidad constante de 120 *km/h* y un consumo contrastado de 6,3 *l/100 km*.

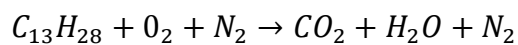
Para el cálculo de las propiedades de los gases de escape se ha utilizado el modelo de aire como gas ideal ya que los motores diésel tienen un dosado del orden de $\frac{1}{25}$ por lo que hay un exceso de aire importante. [1]

Para el cálculo de las propiedades del líquido refrigerante se ha utilizado el modelo de agua como fluido real.

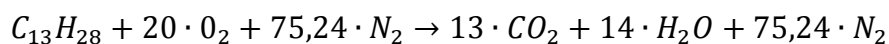
Como combustible se ha optado por el tridecano, este hidrocarburo tiene la siguiente composición química $C_{13}H_{28}$. [2]

4.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

En primer lugar, se ha calculado la velocidad de los gases a su paso por la línea de escape. Mediante el ajuste de la reacción,



Ajustando, queda:



Una vez se tienen los coeficientes de ajuste multiplicamos por su masa molar para obtener el peso de cada componente. Apoyándonos en la ecuación de los gases ideales y jugando con las densidades obtenidas de las tablas de propiedades termodinámicas que proporciona EES obtenemos la velocidad de salida de los gases de combustión.

Con esta velocidad, ya se puede pasar a calcular el coeficiente de convección interna en la zona de paso de gases. Este proceso se ha llevado a cabo mediante la correlación para flujo interno y régimen turbulento desarrollado cambiando el diámetro por el diámetro hidráulico al no ser una sección de paso circular [3]:

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} \cdot Re \cdot Pr}{1,07 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{f}{8}} \cdot (Pr^{2/3} - 1)}$$

$$Nu = \frac{h_{conv,gases} \cdot D_{hidráulico}}{K}$$

A partir de estas ecuaciones se obtiene el coeficiente de convección, $h_{conv,gases}$.

Las aletas se han considerado rectas con un extremo adiabático y para el cálculo de la longitud de éstas se ha tenido en cuenta además de su longitud en la dirección radial, la mitad de la distancia entre aleta y aleta de la zona interna de aluminio.

Su rendimiento viene dado por [4]:

$$\eta_{aleta,gases} = \frac{\tanh(m \cdot L_c)}{m \cdot L_c}$$

Para el lado del refrigerante se han seguido unos pasos similares a los anteriores. El único punto en el que difieren es que en este caso la velocidad del líquido refrigerante varía en función del caudal que esté circulando por el circuito principal y que a su vez éste es dependiente del régimen de giro del motor. En este trabajo se ha considerado un caudal de refrigerante de 1,2 l/s puesto que el motor de este vehículo en cuestión gira próximo a 3000 rpm. en quinta marcha a la velocidad inicialmente establecida.

Una vez hallados los coeficientes de convección del lado de los gases y del refrigerante, se han calculado las propiedades de las variables más importantes mediante un bucle iterativo discretizando el TEG a lo largo de la dirección axial en 10 secciones, tantas como módulos hay por fila.

Se ha planteado un balance de energía a cada sección de paso en dirección radial:

Balance a los gases

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_g \cdot C_{p_g} \cdot (\Delta T^a)$$

$$\dot{Q}_g = h_{conv,gases} \cdot \text{Área} \cdot (\Delta T^a)$$

Donde \dot{Q}_g es calor que ceden los gases al aluminio.

Balance al aluminio interno

Se ha tenido en cuenta la conducción de calor axial o efecto de la conducción de Fourier, como se explica en el Anexo II. Incorporando esta conducción se ha obtenido temperaturas mucho más suavizadas en la estructura de aluminio.

$$\dot{Q}_{saliente/entrante} = \frac{K_{Al} \cdot \text{Área} \cdot (\Delta T^a)}{\delta x}$$

$$\dot{Q}_{saliente} + \dot{Q}_c = \dot{Q}_{entrante} + \dot{Q}_g$$

$$T_{Al1} = T_c$$

Donde \dot{Q}_c es el calor que cede el aluminio al lado caliente del módulo termoeléctrico.

Balance al módulo

$$\dot{Q}_c = P \cdot \left(\Delta T^a \cdot K_{TE} + \alpha \cdot I \cdot T_c - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R_{TE} \right)$$

$$\dot{Q}_f = P \cdot \left(\Delta T^a \cdot K_{TE} + \alpha \cdot I \cdot T_f + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R_{TE} \right)$$

$$W = \dot{Q}_c - \dot{Q}_f$$

Donde \dot{Q}_f es el calor que cede el lado frío del módulo termoeléctrico al agua.

Balance a la chapa de aluminio exterior

Se ha despreciado la resistencia de conducción de calor radial en el aluminio.

$$\dot{Q}_f = \dot{Q}_{agua}$$

$$T_{Al2} = T_f$$

Balance al líquido refrigerante

$$\dot{Q}_{agua} = \dot{m}_{agua} \cdot C_{p_{agua}} \cdot (\Delta T^a)$$

$$\dot{Q}_{agua} = h_{conv,agua} \cdot \text{Área} \cdot (\Delta T^a)$$

4.3. BALANCE EXERGÉTICO.

En este apartado se va a realizar un balance exergético en estado estacionario, se calculará la exergía destruida y posteriormente se evalúa el rendimiento exergético.

Partimos de la ecuación del balance de exergía en estado estacionario [5]:

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e b_{f_e} - \sum_s \dot{m}_s b_{f_s} - \dot{B}_d$$

- Donde el primer término se anula por ser un sistema adiabático.
- \dot{m} es el flujo másico de entrada o salida.
- b_f es la exergía de flujo específica de entrada o salida.
- \dot{B}_d es la exergía destruida.
- \dot{W}_{vc} potencia neta obtenida del volumen de control.

El término b_f corresponde a su vez con la ecuación:

$$b_f = h - h_0 - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2}$$

El balance final queda:

$$\dot{B}_{g,e} + \dot{B}_{agua,e} = \dot{B}_{g,s} + \dot{B}_{agua,s} + \dot{W} + \dot{B}_d$$

Siendo:

- $\dot{B}_{g,e}$ la exergía de los gases a la entrada del TEG.
- $\dot{B}_{agua,e}$ la exergía del líquido refrigerante a la entrada del TEG.
- $\dot{B}_{g,s}$ la exergía de los gases a la salida del TEG.
- $\dot{B}_{agua,s}$ la exergía del líquido refrigerante a la salida del TEG.
- \dot{W} la potencia eléctrica obtenida.
- \dot{B}_d la exergía destruida.

Y el rendimiento exergético viene dado por:

$$\eta_{exergético} = \frac{\dot{W}}{\dot{B}_{g,e}}$$

CAPÍTULO 5:

RESULTADOS OBTENIDOS

5.1. RESULTADOS PARA EL VEHÍCULO DE REFERENCIA.

En este capítulo se van a exponer, por un lado los resultados numéricos obtenidos más relevantes en base a unas condiciones fijadas que se enumeran a continuación y posteriormente se cambiarán las hipótesis de partida y se contrastarán ambos resultados.

Es importante remarcar que los datos de salida son en base a estas condiciones fijadas:

- La circulación se considera en carretera abierta.
- Presión de los fluidos que entran en juego = 1 atm.
- Se ha tenido en cuenta la conducción del aluminio en dirección axial.
- Se ha despreciado la conducción del aluminio en dirección radial.
- Consumo real de combustible a una velocidad de $120 \text{ km/h} = 6,3 \text{ l/100 km}$.
- T^a real del líquido de refrigeración = $80 \text{ }^\circ\text{C}$.
- T^a estimada de los gases de combustión a la entrada del TEG = $500 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Caudal de líquido refrigerante que suministra la bomba = $1,2 \text{ l/s}$.
- Hidrocarburo considerado: Tridecano, cuya composición química es $C_{13}H_{28}$.
- Modelo de aire como gas ideal para el cálculo de propiedades de los gases de escape.
- Modelo de agua como fluido real para el cálculo de propiedades del refrigerante.
- Flujo del líquido refrigerante a contracorriente del flujo de los gases de escape.

Empezando por lo referente a los gases de escape, tenemos:

- Flujo másico que recorre la línea de escape = $0,03493 \text{ kg/s}$.
- Velocidad con la que atraviesa el TEG = $50,47 \text{ m/s}$.
- Coeficiente de convección = $163,6 \frac{W}{m^2K}$.
- Rendimiento de aleta = $99,53 \%$.

Con referencia al líquido refrigerante, tenemos:

- Flujo másico total que recorre el TEG = $1,166 \text{ kg/s}$.
- Velocidad con la que atraviesa el TEG = $0,667 \text{ m/s}$.
- Coeficiente de convección = $5862 \frac{W}{m^2K}$.
- Rendimiento de aleta = $39,89 \%$.

En el aspecto exergético, tenemos:

- La exergía destruida es de 3071 W .
- El rendimiento exergético obtenido es del $3,71 \%$.

Cabe destacar que la temperatura máxima alcanzada por los módulos termoelectricos que están en la primera sección es de $598,1\text{ K}$, cifra que no supera el límite de temperatura máxima soportada por cada uno de ellos que es de 603 K (330 °C) según se puede comprobar mediante el Anexo IV en la ficha técnica de los módulos.

Se ha hecho una tabla paramétrica para ver a qué intensidad se consigue la potencia eléctrica máxima, siendo esta $0,58\text{ A}$ como se observa en la Figura 5.1.

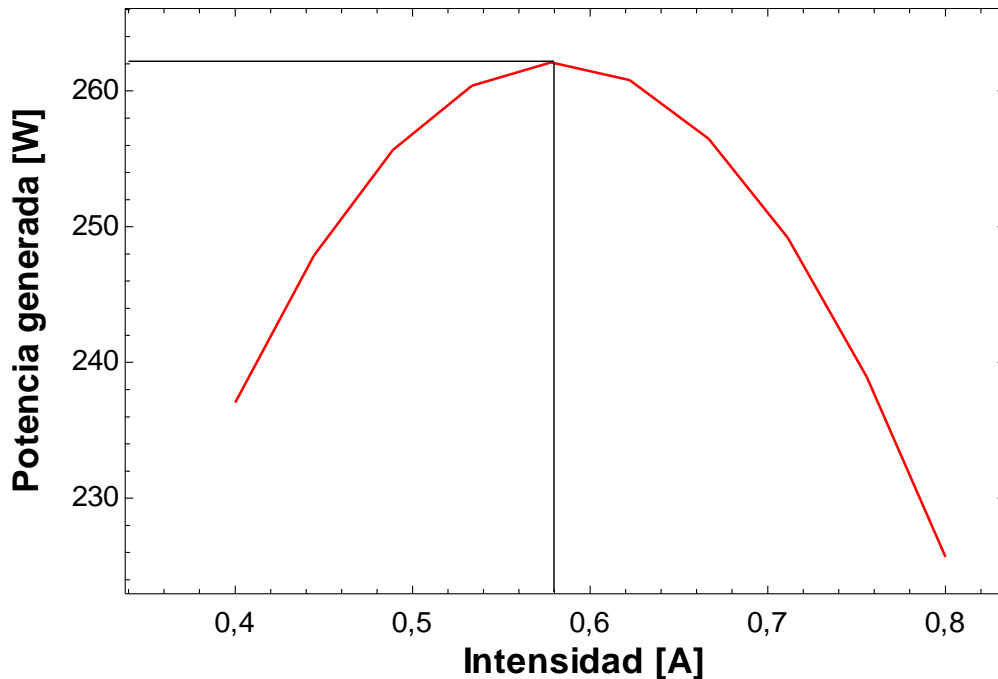


Figura 5.1. Gráfico de la potencia generada frente a intensidad.

La temperatura de entrada del líquido refrigerante varía de 353 K a $354,8\text{ K}$ por lo que únicamente aumenta $1,8$ grados.

Los gases de combustión entran al TEG a 773 K y lo abandonan a 440 K por lo que el salto térmico es de 333 grados.

Y por último, el dato más importante, se consigue una potencia eléctrica de salida de **261,6 W**.

5.2. ANÁLISIS PARAMÉTRICO.

Análisis paramétrico 1. Comparativa de la intensidad frente a la potencia generada variando la temperatura del líquido refrigerante y manteniendo la temperatura de entrada de gases a 773 K (500°C).

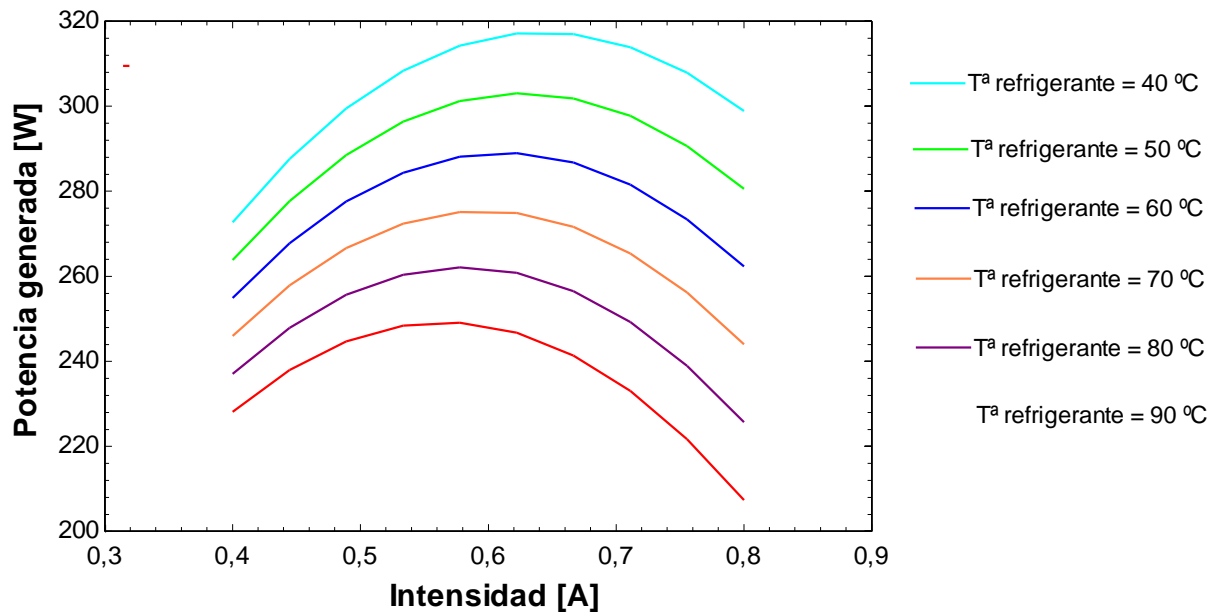


Figura 5.2. Gráfico de la intensidad frente a la potencia generada.

Con este gráfico se comprueba que bajando la temperatura del líquido refrigerante aumenta la potencia generada. Para el caso en concreto refrigerando a 40°C obtenemos una potencia de salida de 314,4 W frente a los 261,6 W que se obtienen con el modelo de referencia, o lo que es lo mismo, una diferencia neta de 52,8 W a favor de este último modelo considerado. Además de este incremento de potencia también se consigue la ventaja de tener el lado caliente de la primera sección de módulos a 583,3 K frente a los 598,1 K del primer modelo, estando más cerca del lado de la seguridad para la duración de los módulos o incluso pudiendo elevar el flujo másico de entrada que todavía incrementaría más la potencia entregada por el TEG.

La contrapartida a estas mejoras es que para conseguir una temperatura del líquido de refrigeración de 40 °C ya no serviría la derivación al TEG del circuito principal sino que se tendría que instalar un pequeño radiador en la parte delantera del vehículo para tal fin con el consiguiente incremento económico y la adición de una bomba extra para hacer circular el fluido por su recorrido y que también tiene un consumo eléctrico.

Análisis paramétrico 2. Comparativa de la intensidad frente al rendimiento exergético variando la temperatura del líquido refrigerante y manteniendo la temperatura de entrada de gases a 773 K (500 °C).

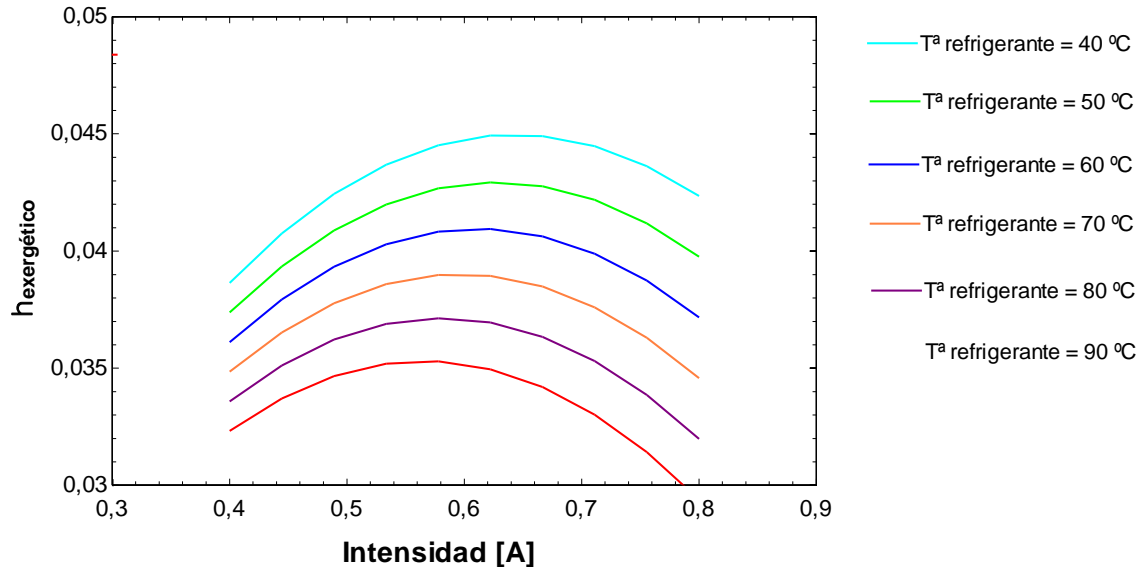


Figura 5.3. Gráfico de la intensidad frente al rendimiento exergético

Se obtiene que el rendimiento exergético aumenta al disminuir la temperatura del líquido refrigerante. En el caso más favorable con una temperatura de refrigeración de 40°C tenemos un rendimiento exergético haciendo circular 0,62 A por cada módulo del 4,49 % a diferencia del modelo de referencia del que se obtiene un 3,71 %.

Análisis paramétrico 3. Comparativa de la intensidad frente a la potencia generada variando la temperatura de los gases de escape y manteniendo la temperatura del líquido refrigerante a 353 K (80 °C).

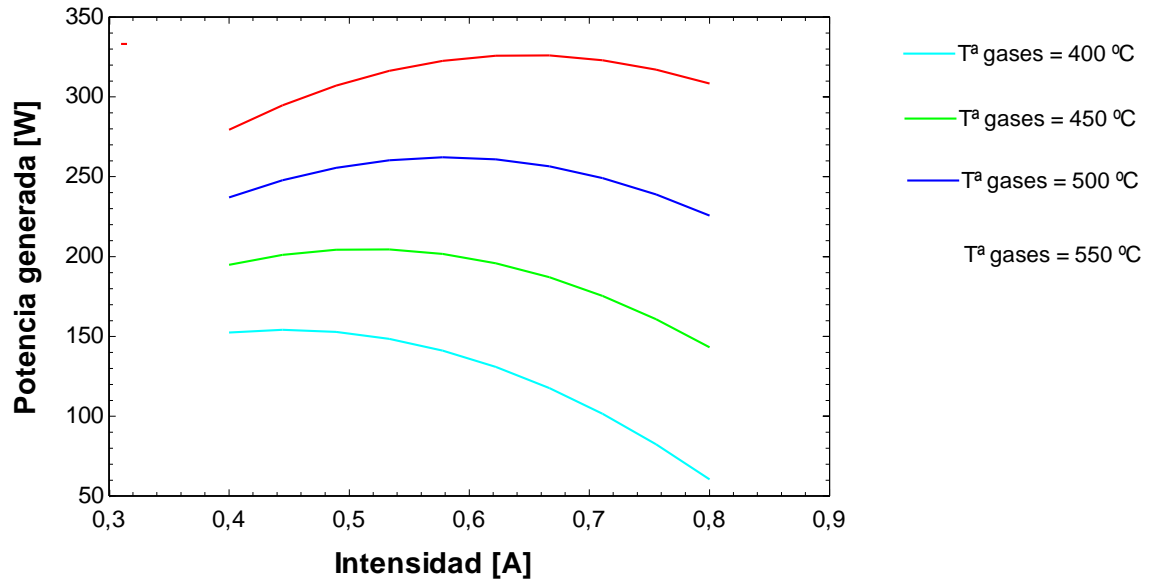


Figura 5.4. Gráfico de la intensidad frente a la potencia generada.

En la Figura 5.4 se observa una generación de potencia más elevada conforme se aumenta la temperatura de los gases de escape. En cambio surge el problema de que los módulos de la primera sección se encuentran a 628 K y la temperatura máxima que soportan es de 603 K por lo que se quemarían. Por lo tanto no es admisible este aumento de temperatura para el correcto funcionamiento del TEG.

Análisis paramétrico 4. Comparativa de la intensidad frente al rendimiento exergético variando la temperatura de los gases de escape y manteniendo la temperatura del líquido refrigerante a 353 K (80 °C).

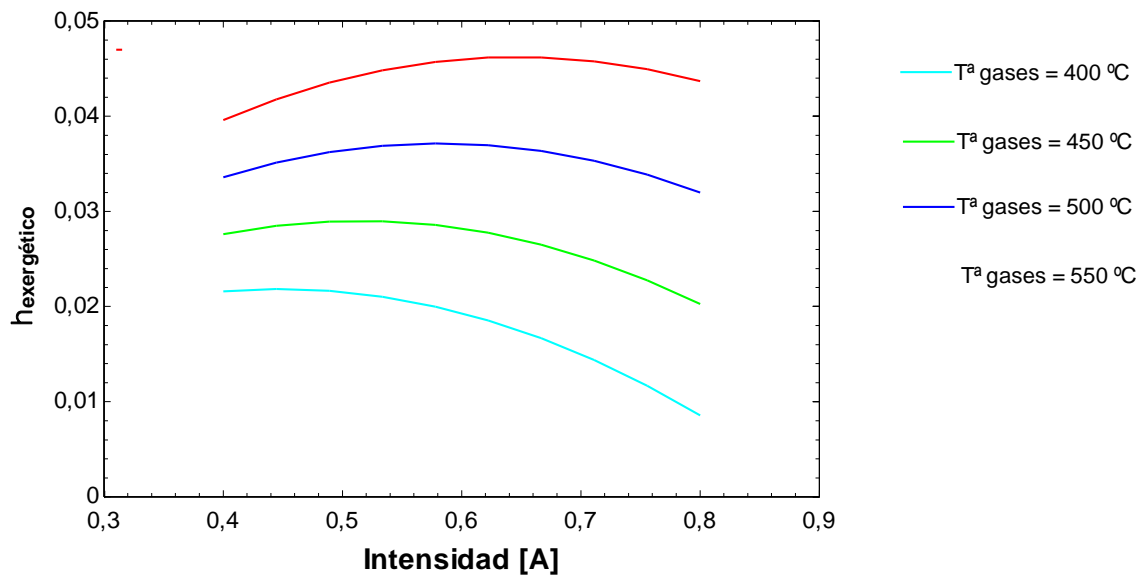


Figura 5.5. Gráfico de la intensidad frente al rendimiento exergético.

Como en el primer caso de este análisis paramétrico, el rendimiento exergético es directamente proporcional al incremento de temperatura.

Análisis paramétrico 5. Comparativa de el espesor de aleta frente a la potencia generada variando el número de aletas.

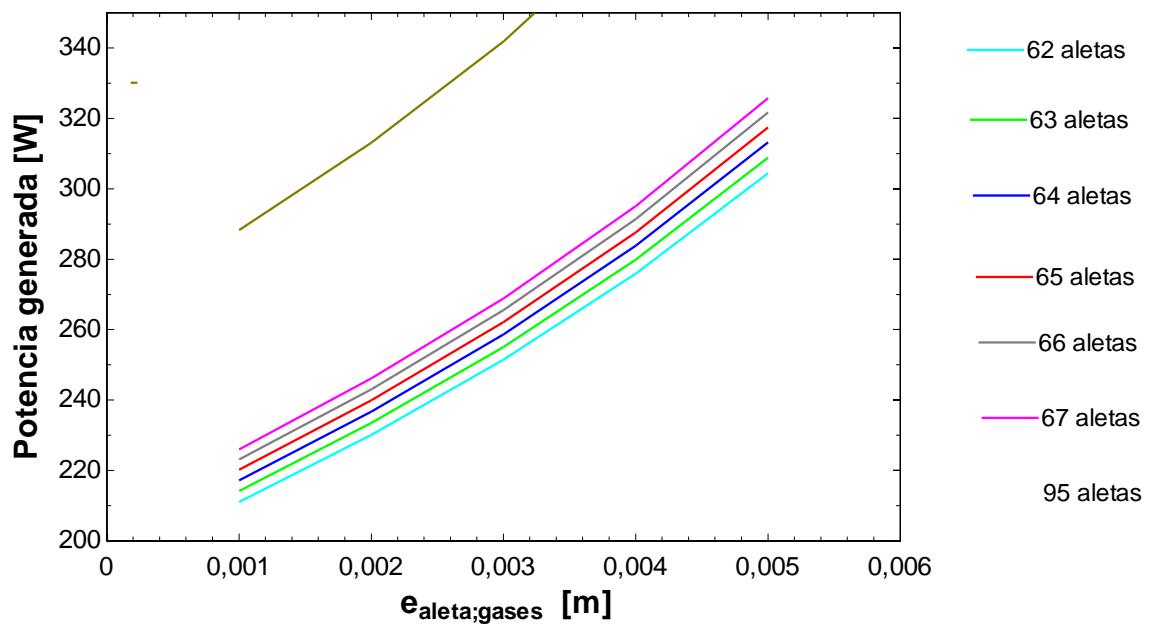


Figura 5.6. Gráfico del espesor de aleta frente a la potencia generada.

En la Figura 5.6 se puede ver como conforme aumentamos el espesor de la aleta y el número de aletas la potencia generada se ve incrementada. Esto es debido a que la sección de paso de los gases cada vez es menor por lo que aumenta la velocidad así como la turbulencia del flujo y esto se traduce en un incremento del coeficiente de convección que eleva la temperatura de la cara caliente de los módulos y el salto térmico sube considerablemente. Se ha llevado al caso límite a 95 aletas, a partir de este número salen errores debido a resultados negativos.

Análisis paramétrico 6. Comparativa de el espesor de aleta frente al coeficiente de convección del lado de los gases de escape variando el número de aletas.

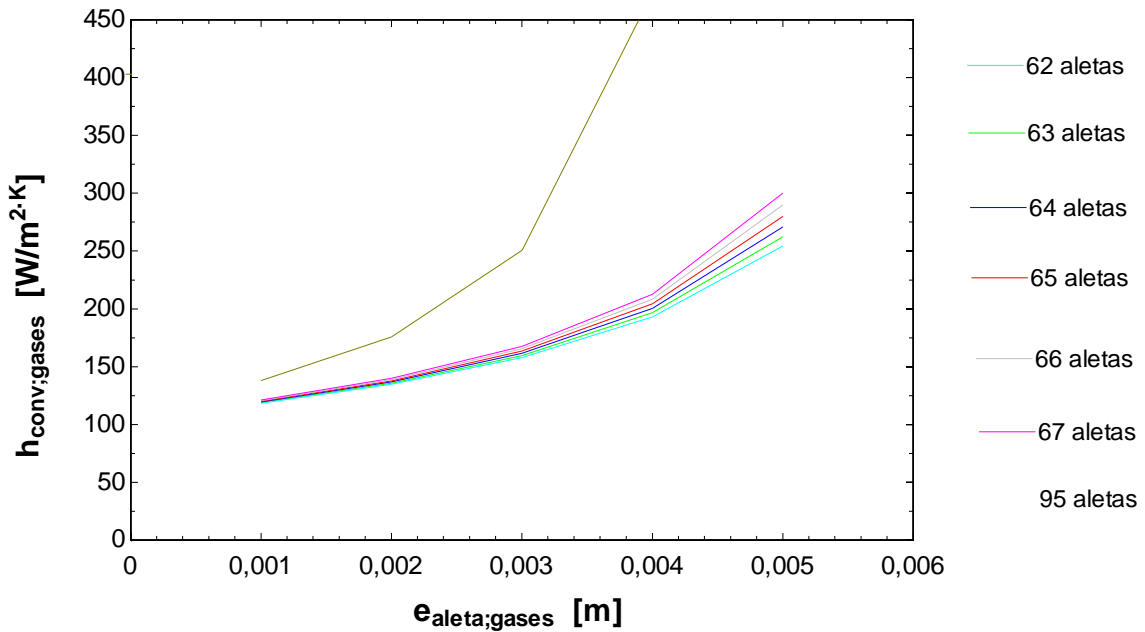


Figura 5.7. Gráfico del espesor de aleta frente al coeficiente de convección.

El resultado que arroja la Figura 5.7 se encuentra íntimamente relacionado con el análisis paramétrico anterior. Al reducir drásticamente la sección de paso de los gases el coeficiente de convección se dispara a valores que no representan la realidad.

Este aumento del espesor y número de aletas está acotado superiormente por la temperatura máxima que soportan los módulos y por el límite de mantener la sección de paso un poco mayor que la original. Con el dato de 95 aletas (y anteriores) la sección de paso es tan reducida que el motor experimentaría importantes pérdidas de carga que le imposibilitarían su correcto funcionamiento.

CAPÍTULO 6: ESQUEMA BÁSICO ELECTRÓNICO DE CONTROL DE APERTURA DE LA VÁLVULA DEL BAIPÁS Y ACOPLAMIENTO CONJUNTO DEL TEG CON EL ALTERNADOR A LA BATERÍA

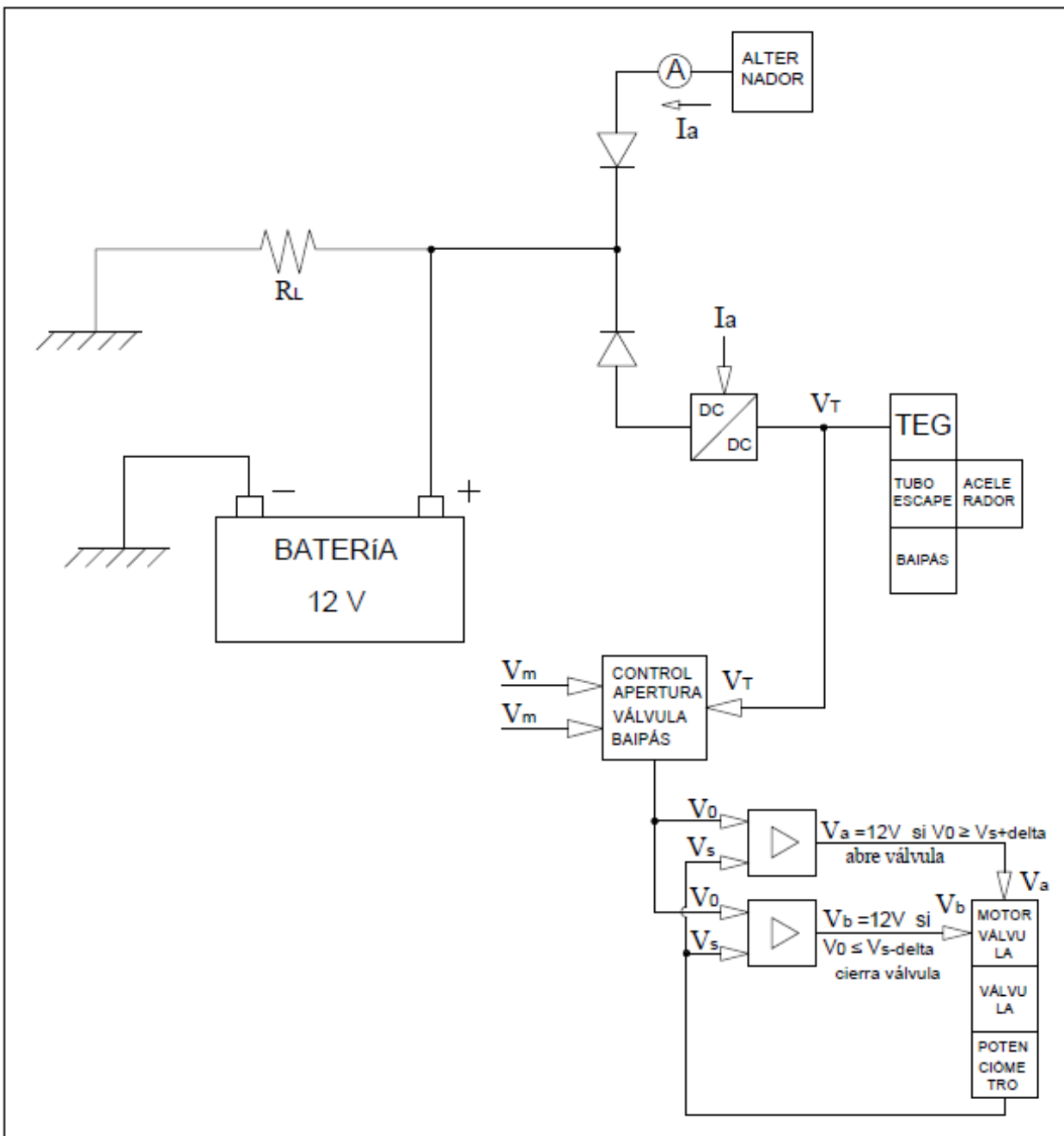


Figura 6.1. Esquema de control básico del TEG.

En el esquema se distinguen dos regulaciones:

- Regulación de la potencia que suministra el TEG a la entrada del convertidor DC/DC.
- Regulación de la potencia que suministra el convertidor DC/DC.

REGULACIÓN DE LA POTENCIA SUMINISTRADA POR EL TEG

Cuando no es necesario que el TEG suministre la potencia máxima que en ese momento puede dar, conviene reducir su capacidad de generación eléctrica disminuyendo la temperatura caliente a la que trabaja. Como ya se ha comentado en el Capítulo 3 se reduce el calor que se cede al circuito refrigerante y se aumenta la vida útil del TEG.

Esta reducción de la temperatura caliente se consigue derivando parte del humo a través del baipás, lo que se realiza mediante un sistema compuesto por tres bloques:

- Control de apertura de la válvula.
- Servo de la válvula.
- Baipás con su válvula de mariposa con reostato asociado.

El módulo de control de apertura analiza la tensión que da el TEG (V_T) y la compara con dos tensiones de referencia: una mínima (V_m) ligeramente superior a la mínima admitida por el convertidor DC/DC y otra máxima (V_M) que dependerá del intervalo de tensiones que da el TEG y de las tensiones de funcionamiento del DC/DC.

En función del resultado de esta comparación, el módulo da una tensión de salida (V_0), según se puede ver en la Figura 6.2 en donde se distinguen tres zonas:

- Si $V_T < V_m$ se pide al TEG que entregue más potencia haciendo $V_0 = 0$. Esto hace que se cierre el baipás y que todos los gases pasen por el TEG.
- Si $V_m < V_T < V_M$ en este caso hay una regulación proporcional de la apertura del baipás respecto a la tensión V_T .
- Si $V_T > V_M$ el TEG da más potencia que la necesaria haciendo $V_0 = 12V$. Esto hace que se abra la válvula del baipás para que los gases de escape pasen por el TEG.

La tensión de salida V_0 va al servo que la traduce en grados de giro de la válvula y por lo tanto en grado de apertura de la misma.

El potenciómetro que gira solidario con el eje de la válvula da una tensión (V_S) proporcional al grado de apertura de la misma, según se puede ver en la Figura 6.3.

Esta tensión se compara con V_0 en el servo y este hace girar el motor que a su vez acciona la válvula - reostato hasta que $V_S = V_0 \pm \delta$.

REGULADOR DE LA POTENCIA SUMINISTRADA POR EL CONVERTIDOR DC/DC

Un convertidor DC/DC convierte una tensión continua de entrada en una continua igual (aislador galvánico) o diferente a la salida. En el que nos interesa, la tensión de entrada puede variar en un amplio margen y a la salida la tensión se ajustará a las necesidades del consumo, siendo de $12V \pm \Delta V$.

Siempre se ha de cumplir que:

$$P_{salida} \cong P_{entrada}$$

es decir:

$$V_h \cdot I_h = V_T \cdot I_T$$

La salida del DC/DC se acopla con la salida de un alternador (con rectificador incorporado) mediante diodos, para evitar interacción mutua.

Cuando el TEG no es capaz de suministrar toda la potencia requerida, la V_{BAT} desciende y el alternador, gracias a su regulación, compensa esta caída de tensión en la batería suministrando una intensidad, I_a situación que detecta la inteligencia del DC/DC poniéndose a máxima potencia, según la Figura 6.4. Para ello aumentará la tensión de salida (V_h) paulatinamente (aumentando la anchura de pulso de chopeado o su frecuencia). Llegará un momento en que ya no podrá incrementarla. En este punto el TEG se encuentra a máxima potencia.

En esta situación, cuando baje el consumo de energía eléctrica o bien se incremente la potencia máxima que puede dar el TEG, la corriente entregada por el alternador se irá reduciendo hasta que $I_a = 0$ situación que detectará el DC/DC. A partir de aquí será el DC/DC quien regule la V_{BAT} .

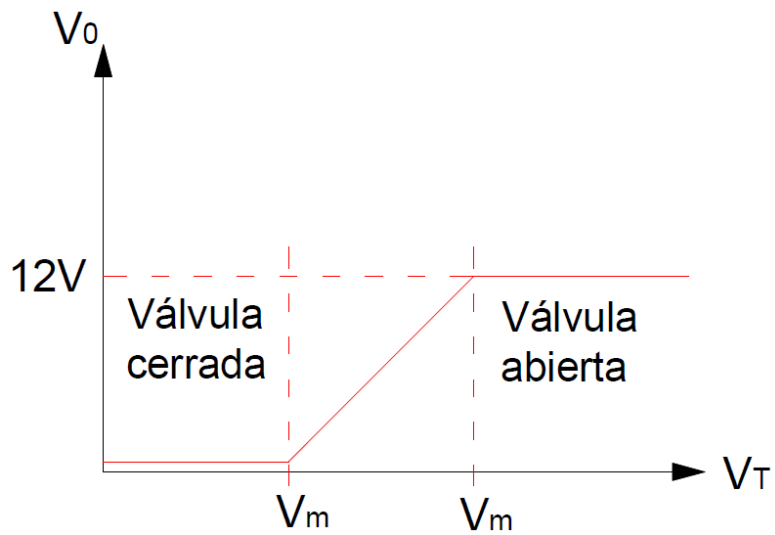


Figura 6.2. Tensión de entrada al comparador (V_0) frente a la que sale del TEG (V_T).

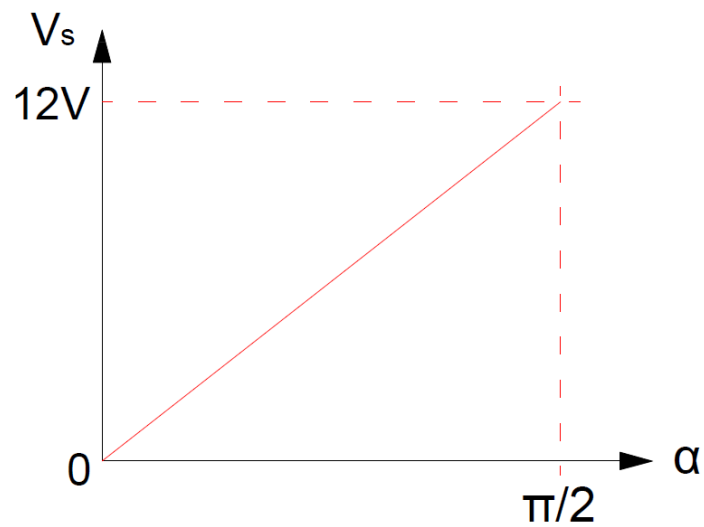


Figura 6.3. Tensión que da el potenciómetro en función del giro de la válvula.

Donde α es el ángulo girado por la válvula del baipás respecto a su posición cerrada ($\alpha=0^\circ$).

En posición abierta $\alpha = \pi/2$ (Válvula de cuarto de mariposa).

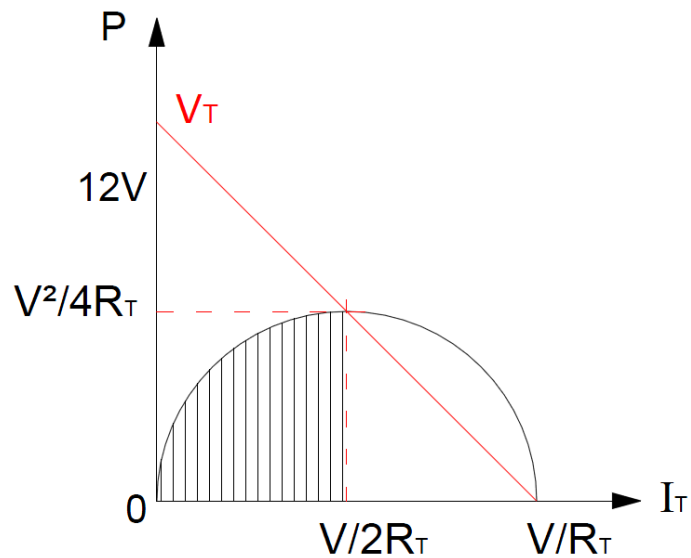


Figura 6.4. Representa la potencia que entrega el TEG frente a la intensidad de salida.

Mientras que I_a (*intensidad alternador*) $\neq 0$ podemos hacer que el DC/DC trabaje en el punto de máxima potencia: $I_T = \frac{V}{2R_T}$ utilizando un lazo de realimentación inteligente.

Si las condiciones del TEG mejoran (aumenta la diferencia de temperaturas en el TEG o aumenta la resistencia de carga R_L) llegará un momento en el que $I_a = 0$ y el lazo de realimentación mantendrá esa tensión de salida constante pasando por el punto de operación a la zona rayada de la Figura 6.4.

Si las condiciones del TEG empeoran (disminuye la diferencia de temperaturas en el TEG o disminuye la resistencia de carga R_L), llegará un momento en que el punto de operación se situará en un máximo y a partir de aquí el TEG no podrá con toda la carga demandada y el alternador se encargará de complementar la carga haciendo $I_a \neq 0$.

CAPÍTULO 7:

CONCLUSIONES

Estoy muy satisfecho con el presente Trabajo Fin de Grado porque pese a que al comienzo de la generación de ideas me he apoyado en modelos de fabricantes de coches que han desarrollado esta tecnología previamente, he elaborado un modelo partiendo desde cero y adaptado a mi vehículo en concreto con datos comprobados y realistas.

Algunas de las conclusiones de carácter técnico son:

- Es de vital importancia seleccionar bien los módulos termoelectricos ya que en función de las temperaturas que entren en juego en nuestro diseño algunos materiales tienen un uso limitado.
- Otro aspecto muy importante es la optimización de la transferencia de calor mediante el incremento los coeficientes de convección, diseñando unas aletas con rendimientos altos, etc.
- No se ha valorado la posible pérdida de carga en el motor que podría acarrear la implantación de este diseño en el vehículo y quizás fuese un aspecto que iría en nuestra contra.
- Habría que valorar la suma del coste económico unitario más el sobrecoste por el aumento de peso que supone implementarlo con el ahorro de combustible a lo largo de la vida útil del vehículo.
- A la vista de los resultados queda que el rendimiento de esta tecnología no es muy elevado, pero las líneas de investigación van avanzando y poco a poco se desarrollan materiales con mejores parámetros.
- El resultado de la potencia eléctrica producida es de 261,6 W que se aproxima bastante a la potencia obtenida por BMW en el año 2008.

Como colofón, quisiera destacar que en determinadas condiciones favorables de conducción, como podrían ser una velocidad mantenida de 120 *km/h* y una demanda de potencia eléctrica al coche baja (no circular con las luces encendidas, no encender la calefacción, etc.) la suma total según la Tabla 2.5 sería de 185 W (equipo de sonido, 100 W + control del motor, 50 W + cuadro de mandos, 25 W + la propia gestión del TEG, 10 W) por lo que con los 261,6 W que nos genera el TEG, este vehículo en concreto podría abastecerse por sí solo de potencia eléctrica y de este modo desacoplamos el alternador liberando de su par resistente al motor y reducimos el consumo de combustible y las emisiones nocivas a la atmósfera.

BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA

- [1] M. Muñoz y F. Payri. "Motores de combustión interna alternativos". Página 329. Sección de publicaciones de la E.T.S. de ingenieros industriales de la UPM. Año 1989.
- [2] M. Muñoz y F. Payri. "Motores de combustión interna alternativos". Página 45. Sección de publicaciones de la E.T.S. de ingenieros industriales de la UPM. Año 1989.
- [3] Tabla 11 de la asignatura de 3º curso "Ingeniería Térmica". Convección flujo interno. Correlación nº 15, régimen turbulento.
- [4] Apuntes de la asignatura de 3º curso "Ingeniería Térmica". Cálculo simplificado de rendimiento de aletas.
- [5] Fundamentos de Termodinámica Técnica. Página 335. 2ª edición. Michael J. Moran, Howard N. Shapiro.
- [6] En busca de la reducción de emisiones: BMW Efficient Dynamics.
www.press.bmwgroup.com/mexico/pressDetail.html?title=en-busca-de-la-reduccion-de-emisiones-bmw-efficientdynamics&outputChannelId=30&id=T0119993ES&left_menu_item=node__5237
- [7] El generador termoeléctrico del BMW serie 5.
www.automocionblog.com/post/10005/el-generador-termoelectrico-del-bmw-serie-5
- [8] Presentación Dr. Boris Mazar, 21 Marzo 2012.
www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f10/mazar.pdf
- [9] Thermoelectric Generator Performance for Passenger Vehicles. Dr. Doug Crane and John LaGrandeur.
http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f10/crane_0.pdf
- [10] Blog de Miguel Artime.
<http://maikelnai.elcomercio.es/2009/02/08/vw-equipara-a-sus-futuros-coches-con-sistemas-de-recuperacion-de-calor/>
- [11] Presentación Gregory P. Meisner. Advanced Thermoelectric Materials and Generator Technology for Automotive Waste Heat at GM
http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/thermoelectrics_app_2011/monday/meisner.pdf
- [12] MIT Technology Review.
www.technologyreview.es/energia/37633/alimentando-su-coche-con-calor-residual/pagina2/
- [13] 2011 DOE Thermoelectrics Applications Workshop.
<http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f13/maranville.pdf>
- [14] www.heat2power.net/en__benchmark.php

- [15] P. Aranguren, D. Astrain, A. Rodríguez, A. Martínez. "Experimental investigation of the applicability of a thermoelectric generator to recover waste heat from a combustion chamber". *Applied Energy* 152 (2015) 121–130.
- [16] Robert J. Stevens, Steven J. Weinstein, Karuna S. Koppula. "Theoretical limits of thermoelectric power generation from exhaust gases". *Applied Energy* 133 (2014) 80–88.
- [17] Changxin Liu, Xinxiang Pan, Xiaofeng Zheng, Yuying Yan, Weizhong. Li. "An experimental study of a novel prototype for two-stage thermoelectric generator from vehicle exhaust". *Journal of the Energy Institute* xxx (2015) 1-11
- [18] Juan Antonio Catalán Solsona. "Materiales termoeléctricos. Aplicaciones para la refrigeración y la generación de electricidad". Trabajo Fin de Grado. Escuela de Ingeniería y Arquitectura.
- [19] www.ling.fju.edu.tw/hearing/historical%20review1821.htm
- [20] *Revista Técnica industrial*. Nº 41. Pág.37.
- [21] www.buscabiografias.com
- [22] Aproximación a los materiales termoeléctricos. Unidad de materiales y tratamiento de superficies. AIMME (Instituto metalmecánico).
- [23] Z. Fan, H.-Q. Wang, y J.-C. Zheng, "Searching for the best thermoelectrics through the optimization of transport distribution function", *J. Appl. Phys.*, vol. 109, n.o 7, pp. 73713, 2011.
- [24] G. Mahan, B. Sales, y J. Sharp, "Thermoelectric Materials: New Approaches to an Old Problem", *Phys. Today*, vol. 50, n.o 3, pp. 42-47, 2008.
- [25] *Fundamentos de Termodinámica Técnica*. 2ª edición. Michael J. Moran, Howard N. Shapiro.
- [26] Alberto Gil Sanjoaquín. "Estudio de nuevos materiales termoeléctricos basados en óxidos cerámicos". Proyecto Fin de Carrera. Escuela de Ingeniería y Arquitectura.
- [27] G. R. Schmidt, "NASA's Program for Radioisotope Power System Research and Development.", *Sol. Syst. Explor. Div. Off. Space Sci.*, 2004.
- [28] David M. Rowe, C.M. Bhandari. "Modern Thermoelectrics". 1983.
- [29] H. Julian Goldsmid. "Introduction to Thermoelectricity (Springer Series in Materials Science 121)". 2010.
- [30] Dusan Slimarik, Adam Polcar, Michal Jukl. "Influence of exhaust gas temperature on treatment of harmful pollutants", Department of Engineering and automobile transport. 2014.