



DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i4.3040

Desarrollo de un microgenerador eléctrico termoacústico, que funciona con el calor residual de una fuente térmica

Christian Ramón Covarrubias Constantino.

Christiancovac@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1085-1303>

Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH)

Neín Farrera Vázquez.

nein.farrera@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-2455-5572>

Universidad Valle de México (UVM)

Hugo Alejandro Guillen Trujillo.

guillenhugo@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5049-6126>

Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH)

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

Resumen

Este trabajo presenta una propuesta de aplicación de un prototipo de microgenerador eléctrico termoacústico, que funciona con el calor residual de una fuente térmica, para iluminación o carga de pequeños dispositivos electrónicos; el sistema transforma la energía térmica en energía mecánica acústica, mediante un gradiente de temperatura (∇T) entre un foco caliente (f_c) y un foco frío (f_f) unidos por una tobera de aluminio produciendo el efecto termoacústico; la acción de un pistón acoplado a un transductor electrodinámico hace posible la generación eléctrica. Este modelo termoacústico lineal de pequeña escala y baja temperatura utiliza materiales estándar para su viabilidad de construcción,

Desarrollo de un microgenerador eléctrico termoacústico, que funciona con el calor residual de una fuente térmica

generando alrededor de 3W de energía eléctrica, demostrando así: su funcionamiento, la física del efecto termoacústico y el potencial para el desarrollo de termogeneradores eléctricos (TEG).

Palabras clave Efecto termoacústico, microgeneración eléctrica, recuperación de calor, intercambiador de calor.

Correspondencia Christiancovac@gmail.com

Artículo recibido: 15 de agosto ía mes 2022. Aceptado para publicación: 15 de septiembre 2022.

Conflictos de Interés: Ninguna que declarar

Todo el contenido de **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, publicados en este sitio están disponibles bajo Licencia [Creative Commons](#)

[Commons](#) 

Como citar Covarrubias Constantino, C. R., Farrera Vázquez, N., & Guillen Trujillo, H. A. (2022). Desarrollo de un microgenerador eléctrico termoacústico, que funciona con el calor residual de una fuente térmica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(4), 5668-5680. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i4.3040

Development of a thermoacoustic electric microgenerator, which works with waste heat from a thermal source

ABSTRACT

This paper presents a proposal for the application of a prototype of thermoacoustic electric microgenerator, which works with the waste heat of a thermal source, for lighting or loading of small electronic devices; the system transforms the thermal energy into acoustic mechanical energy, by means of a temperature gradient (∇T) between a hot spot (fc) and a cold light bulb (ff) joined by an aluminium nozzle producing the thermoacoustic effect; the action of a piston coupled to an electrodynamic transducer makes power generation possible. This small-scale, low-temperature linear thermoacoustic model uses standard materials for its construction feasibility, generating around 3W of electrical energy, thus demonstrating: its operation, the physics of the thermoacoustic effect and the potential for the development of electric thermogenerators (TEG).

Keywords Thermoacoustic effect, electrical microgeneration, heat recovery, heat recovery.

Introducción

Alrededor de 3 mil millones de personas en el mundo dependen de las estufas de leña para uso básico, como la cocción de alimentos, que funcionan con la biomasa como combustible, como la madera, estiércol o carbón [1]. Además, cerca de Mil millones de personas en el mundo no tienen acceso a la electricidad y se estima que más del 20% del consumo energético mundial se generará de las energías renovables, lo que representa el 8% de la población mundial aproximadamente, esto si las tendencias de las políticas públicas continúan de la misma manera [2].

Según la Agencia Internacional de Energía (IEA), más de 2,500 millones de personas dependen de la leña como su principal combustible para calefacción y cocción de alimentos; en México el 25% de la población depende de la leña, y es muy común observar que los campesinos utilicen el fogón de leña a campo abierto para cocinar sus alimentos, debido al difícil acceso del sector rural [3].

La Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI) de 2018, reconoce que 28 millones de personas en el país utilizan leña para sus necesidades básicas, alrededor de 5 millones de personas no cuentan con energía eléctrica y otros 5 millones no tienen acceso adecuado a la energía eléctrica.

Según la encuesta del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Chiapas, alberga alrededor de 6 millones de habitantes, de los cuales el 51% viven en zonas rurales y el 2% de ellos (alrededor de 120 mil habitantes) no cuenta con energía eléctrica o bien tienen una insuficiente disponibilidad de ésta. Según el Consejo Nacional de Población (CONAPO), Chiapas es el estado en el que, más número de personas sufre aislamiento geográfico en el país, con más de 1 millón de personas, las cuales también carecen de alimentos, drenaje y electricidad.

En los últimos años se han desarrollado diversos dispositivos para la generación de energía eléctrica alternativa, en este sentido, a partir del calor residual que emiten los calentadores o las estufas, los generadores TEG pueden funcionar con el calor residual de las estufas ecológicas, las cuales son ampliamente utilizadas en las zonas marginadas de los países en vía de desarrollo, donde no se tiene acceso a la electricidad [4].

La recuperación del calor en las fuentes térmicas de calor residual en las viviendas, se percibe significativamente conveniente para reutilizarla y evitar que se desaproveche, disipándose al medio ambiente sin uso, con ello, poder mejorar el entorno reduciendo las emisiones con un proceso multifísico

Desarrollo de un microgenerador eléctrico termoacústico, que funciona con el calor residual de una fuente térmica

para generar energía eléctrica. La termoacústica es una tecnología emergente de conversión de energía que se puede aplicar para calefacción, refrigeración [5,6] o generación de energía [7,8], que no implica gases dañinos que atenuan el ozono y no utiliza energía eléctrica.

En la búsqueda de aprovechar el calor residual de los sistemas que generan calor, con el fin de rescatar esas emisiones contaminantes y reutilizarlas, los sistemas de Recuperación de Calor Residual (RC) implantados en los sistemas de Combustión Interna, han presentado soluciones prometedoras en el marco de los convertidores de energía térmica. Su auge ha motivado a los fabricantes de automóviles, para su introducción, como las máquinas Stirling [9], las máquinas termoacústicas y los generadores termoeléctricos [10,11]. Los sistemas de RC pueden determinarse por la temperatura de la fuente de calor residual, principalmente dividida en dos categorías: fuentes de calor residual a baja temperatura y fuentes de calor residual a temperatura media y alta.

El micro generador ⁽¹⁾ termoacústico posee ventajas propias, como: seguridad, respeto al medio ambiente, flexibilidad y disponibilidad de componentes [12-13]. Sin olvidar de que es otra tecnología alternativa para coadyuvar necesidades básicas para disponibilidad de energía eléctrica.

Efecto termoacústico

El prototipo de microgenerador eléctrico termoacústico se compone de un recolector de calor externo llamado foco caliente (f_c), producido por una fuente térmica, que mediante un tubo de borosilicato, en donde el aire dentro de tubo es expuesto a temperaturas de más de 100°C, transformandola en energía térmica potencial en un proceso isocórico (isométrico), el cual no realiza trabajo presión-volumen ($\Delta W = P\Delta T$), es decir, el calor transferido al sistema queda a razón de su energía interna (U) y el incremento de energía es proporcional al incremento de la temperatura ($Q = mCv\Delta T$), por esta diferencia de

temperaturas, el aire pasa por un paso tipo tobera de aluminio hacia el foco frío (f_f), forzado por un gradiente de temperatura (∇T) ayudado de un intercambiador de calor tipo carcasa (HEX) que ayuda a facilitar el proceso de enfriamiento, donde el delta de temperaturas tiene un impacto significativo en la presión final del flujo hacia el transductor colocado en el foco frío, el sistema es susceptible a sufrir deterioros, por las condiciones ambientales [14]. En la actualidad existen muy pocas tecnologías disponibles comercialmente que puedan hacer uso de fuentes de calor de sistemas térmicos como lo pueden ser las estufas ecológicas, también, es importante considerar los materiales para lograr

la eficiencia requerida y viabilidad de construcción [15].

Las oscilaciones mecánicas acústicas que ocurren dentro del regenerador, hacen que el fluido experimente un ciclo de calentamiento (compresión, enfriamiento y expansión). La energía térmica potencial, procedente de la fuente externa de calor, que se aprovecha para convertir la energía térmica en energía mecánica acústica y finalmente en energía eléctrica, a través de un transductor electrodinámico. Las temperaturas para el funcionamiento del sistema termoacústico, se pueden obtener de fuentes arbitrarias de calor, como de las emisiones de las estufas cuando se encuentran en actividad.

El fenómeno termoacústico trabaja con temperaturas constantes, y estas se pueden obtener en las áreas de los sistemas térmicos donde los perfiles del flujo térmico son más estables. Éste sistema describe un ciclo termodinámico, con una determinada eficiencia (η_a), una potencia acústica de entrada (W_{ae}) a la salida del generador, al cual, se propone la ecuación (1) [16].

$$W_{as.} = W_{ae} + \eta_a * Q_e \quad (1)$$

El efecto termoacústico se produce, cuando una misma masa de aire caliente comprimida (f_c),

por una diferencia de densidad se transporta naturalmente al foco frío (f_f), y es descomprimida por un diferencial de temperaturas, aumentando así su potencia mecánica hacia el transductor.

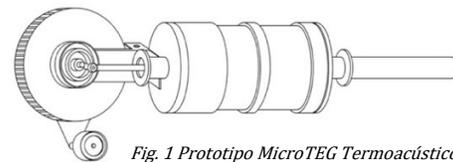


Fig. 1 Prototipo MicroTEG Termoacústico

Nomenclatura

α Velocidad de sonido (ganancia acústica, m/s)

K Conductividad térmica ($W/m \text{ } ^\circ K$)

ρ Densidad (Kg/m^3)

L Longitud de estudio (m)

X Longitud seccional (m)

h Transferencia de calor (convección) ($W/m^2 \text{ } ^\circ K$)

k Transferencia de calor (radiación) ($W/m \text{ } ^\circ K$)

R_c Resistencia convectiva ($^\circ K/W$)

Configuración experimental

Se examinaron diferentes tipos de generadores comerciales, para determinar el transductor electrodinámico más adecuado, además, se realizó un análisis de los sistemas de producción de energía eléctrica a partir de las emisiones de

las fuentes de calor, así como, la definición de los elementos principales que exponen la propuesta de este proyecto.

Se definió la geometría del sistema a partir de materiales disponibles y se realizaron experimentos para cuantificar su generación energética y eficiencia.

El receptor de energía térmica (f_c) instalado con un tubo de borosilicato de 27 mm. de diámetro y 200 mm. de largo, conectado a una tobera de aluminio de 5 cm. de largo y 3 mm. de paso, que a su vez está conectado al tubo de enfriamiento (f_f) inmerso en un disipador tipo carcasa de 250 ml. con refrigerante líquido. (fig 2).

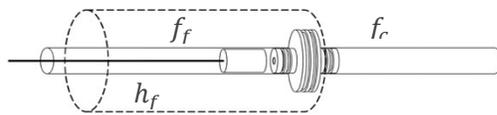


Fig. 2 Diagrama Cualitativo del TEG

El gradiente de temperatura (∇T) tiene un impacto significativo en el flujo de calor y finalmente en la presión final del flujo hacia el transductor, por ésto para el prototipo se utiliza un disipador de calor tipo carcasa de aluminio de 100 mm. de diámetro y 200 mm. de largo, con etilenglicol al 50%. Se utilizó una tobera de aluminio, inmersa en el refrigerante, para

propiciar un delta más amplio en la temperatura del foco frío.

La tobera del generador, discipa y aumenta la presión final del sistema hacía el transductor, con un orificio nueve veces menor que el tubo hidráulico del sistema (fig. 4).

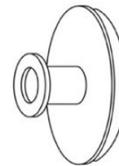


Fig. 3 Tapa aislante

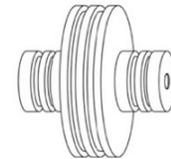


Fig. 4 Tobera-Generador

El aislamiento entre el foco frío y el foco caliente, se establece por una tapa de aluminio de 5 mm. de grosor y la tobera de 50 mm. la cual también une a los dos focos (f_c) y (f_f), funcionando como un brecha de temperaturas, el cual, ayuda al efecto termoacústico (fig. 3).

La conductividad térmica del sistema esta determinada por el coeficiente global de transferencia de calor por conveccion y radiación: $h=50 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ y $k=0.024 \frac{W}{m \cdot K}$ (1) [17][18].

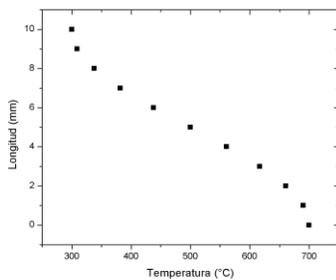
$$R_1 = R_{c-1} = \frac{1}{h_1(A)}; \quad R_{aisl} = \frac{L}{k(A)}$$

$$R_{Total} = R_c + R_{aisl} + R_2 \quad (1)$$

Con ello, se puede llegar a la siguiente fórmula, que describe el flujo de la onda térmica en el sistema (2).

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_T}; \quad \dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_1}{R_{c-1}} \quad (2)$$

Así se tiene que la temperatura de trabajo (T_1) es la que soportará el aislante, es decir, la temperatura con la que deberá enfriar, se obtiene con: $T_1 = T_{\infty 1} - \dot{Q}(R_{c-1})$.



Se puede explicar, la similitud del fenómeno TEG que utilizan toberas y stacks, como paso entre el f_c y f_f , donde el perfil de onda (fig. 5), las condiciones de frontera y las temperaturas se pueden determinar con (3) [19].

$$T(X) = 1000 - \left[Tm1 + Tm2 \cos\left(\frac{\pi X}{L}\right) \right] \quad (3)$$

(fig. 5)

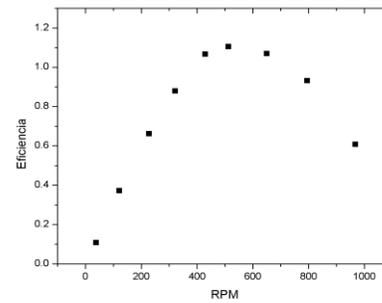


Fig. 7 Gráfico de Eficiencia (%) v RPM.

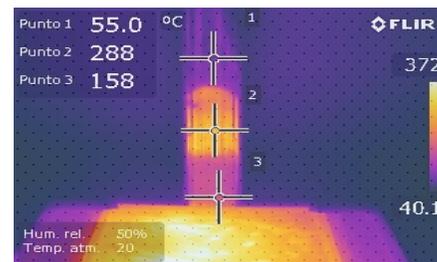


Fig. 6 perfil térmico en chimenea de una estufa

Una opción

de instalación del TEG, es donde se encuentra el calor residual y donde el perfil de calor de la fuente térmica es más estable, por ejemplo: en una estufa, este punto puede ser a 25 cm. en el punto 2 aproximadamente de la chimenea, medida realizada con un termómetro FLIR E-60 (fig. 6).

En la preparación experimental, se sugirió la simulación del sistema, induciendo la temperatura de trabajo, adaptando un motor de escobillas, que mediante un eje se acopló a un torquímetro Futek de 0 a 20 N-m, con margen de 0.01, todo conectado a un monitor Futek IPM650.

La expresión de la potencia acústica promedio en función de la presión del flujo de trabajo (p) y la velocidad (v), se puede concluir si será posible generar energía eléctrica con una diferencia de fase de 90° , entre dos puntos (4) y se considera la siguiente ecuación de estado del gas ideal para el fluido de trabajo (aire), esto proporciona una ecuación adicional para vincular los parámetros físicos del fluido, considerando una presión de 7 Pa. como condición de entrada (f_c) y presión atmosférica (f_t) (4) [20].

$$\rho = \frac{P_a}{R_s(T)}$$

(4)

Con una temperatura específica y utilizando cargas de leds de 2.4 W, para forzar una caída de frecuencia en el torquímetro donde se evaluó el TEG, para medir: RPM, P_m, τ, η . La potencia eléctrica extraída, con una resistencia de carga, se determina con la ecuación (5) [21].

$$W_1 = (W_a - W_m) \frac{R_l}{R_e}$$

(5)

Los experimentos muestran que el sistema difícilmente oscila independientemente, debido a pérdidas de fuerzas mecánicas dentro del sistema, por ello, se coloca un volante con contrapeso [22]. Además, se puede analizar la sensibilidad paramétrica del rendimiento termodinámico y la energía libre de Helmholtz

$F=U-T(S)$, que describe el potencial termodinámico del trabajo útil de un sistema cerrado en condiciones de temperatura y volumen constante, que es la diferencia de la energía interna (U) menos el producto de la temperatura (T) por entropía (S).

Resultados

Estableciendo condiciones de frontera en el sistema y las similitudes en relación a modelos existentes, se obtuvo un modelo conceptual del TEG, con dimensiones y materiales viables y con capacidad de generación eléctrica; se forzó la temperatura en el foco caliente e indujo una temperatura para el funcionamiento del dispositivo; determinando la eficiencia del dispositivo con la relación de la energía eléctrica generada y la cantidad de calor recibido (f_c) [23].

$$\eta_s = \frac{W_{eléctrica}}{Q_{entrada}}$$

La potencia mecánica (W_m) o par (M) del sistema, calculada con la velocidad angular (w), y con la velocidad de salida en un punto elegido a temperatura constante (8).

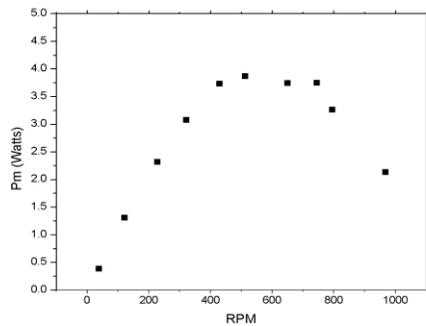


Fig. 8 Gráfico de Potencia mecánica (W) y RPM

$$W = M(Nm) \cdot w(rad/s)$$

$$\frac{2\pi}{60}$$

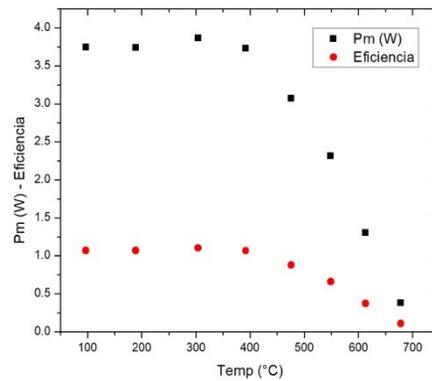


Fig. 10 Gráfico de Potencia mecánica (W) y Temperatura (°C)

con respecto a la temperatura de entrada, se muestra cuando la temperatura oscila los 300°C, después de ésta temperatura las dos variables tienden a descender de manera similar (10).

Conclusiones

En esta propuesta de termogeneración se encontró que, teóricamente el microgenerador eléctrico termoacústico puede generar energía a partir de las emisiones del calor residual de fuentes térmicas, como las estufas de leña, en primera instancia, para su aprovechamiento y solucionar una necesidad básica de energía eléctrica y aportar opciones para suavizar las estadísticas de pobreza energética en poblaciones marginadas, además, se proponen áreas de instalación de las tecnologías TEG, como en las chimeneas convencionales de metal, comúnmente usadas en este tipo de estufas. También se construyó y se dispuso de un prototipo de tecnología termoacústica para

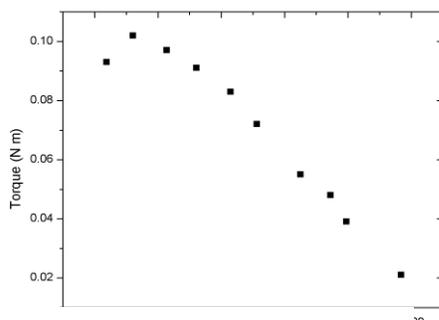


Fig. 9 Gráfico de Torque (N·m) y RPM.

El comportamiento del torque en el sistema cuando se le aplica una carga (Ω) inducida de una conexión leds de 2.4 W, para frenar gradualmente el sistema, ocasionando una disminución de velocidad por cada carga activada al sistema, tal como se muestra en la gráfica (9).

La relación del comportamiento de la potencia mecánica (P_m) y la eficiencia (η),

Desarrollo de un microgenerador eléctrico termoacústico, que funciona con el calor residual de una fuente térmica

microgeneración eléctrica, apartir del calor residual de fuentes térmicas.

Los TEG pueden ser aplicados para distintas tareas como: ventilación de las cámaras de combustión para mejorar su eficiencia, iluminación de pequeños espacios y/o para la carga de dispositivos electrónicos de uso diario. Se seguirá evaluando el dispositivo termoacústico, además, de incursionar en la utilización y evaluación de diferentes tipos de sistemas de termogeneración eléctrica (TEG), que nos sirva para seleccionar la tecnología adecuada en diferentes condiciones y las distintas necesidades de la población.

Las posibles mejoras a futuro de éste sistema, se describen a continuación:

- Se demostró que el modelo es capaz de generar electricidad y en medida que se recupera el calor de la fuente térmica y se es capaz de enfriar el mismo, es posible aumentar la generación eléctrica, es decir, la capacidad de enfriamiento (∇T) del fluido de trabajo, es directamente proporcional a la capacidad de generación, pudiendo hacer un prototipo ampliado proporcional geométrica y térmicamente para generar mayor energía.
- Se pueden mejorar los diferentes elementos del sistema, para lograr menor fricción,

contribuyendo al subsistema rotativo utilizado, el cual es manifiestamente susceptible a ser mejorado.

- El subsistema de enfriamiento, es la parte mas crítica del sistema TEG, pudiéndose utilizar diferentes mecanismos de enfriamiento, es necesario que sea lo suficientemente capaz de enfriar durante el tiempo que se mantiene en funcionamiento, mejorando así, su capacidad para lograr un delta de temperatura mayor y constante, con esto, estimular una mayor eficiencia; las lecturas exponen el uso de gases inertes, como el argón, que puede mejorar la capacidad de disipación de calor en el sistema. Ésta propuesta de un prototipo de microgeneración eléctrica termoacústica, resulta interesante para continuar con estudios y construcción de termogeneradores (TEG) como generadores de energía eléctrica alternativa, apoyados en materiales y tecnologías existentes; finalmente el dispositivo construido resulta ser económico y viable, pero a su vez demuestra una intermitencia en la generación eléctrica, esto derivado de las partes sensibles dentro del sistema termogenerador y en la poca estabilidad en los perfiles de calor de las fuentes térmicas, provocando una problemática para su aprovechamiento total y su utilización en comunidades alejadas.

Agradecimientos

A los doctores que directa o indirectamente contribuyeron en el proyecto. Este trabajo se desarrolló con recursos propios, gracias a la beca del CONACYT.

Referencias

- [1] Anenberg S. Nature/2017/05/22/anenberg-and-henzes-nature-article-on-health-impacts-of-diesel-nox-emissions-featured-internationally/
- [2] Agencia Internacional de la Energía (AIE) y el Banco Mundial, presentado en Lisboa, para los objetivos de desarrollo de la ONU. Mayo 2018. www.efe.com/efe/america/economia/mil-millones-de-personas-en-el-mundo-no-tienen-acceso-a-la-electricidad/20000011-3602676.
- [3] Dan Jorgensen & Fatih Birol_Informe de Investigación 2010_Artículo_Agencia Internacional de Energía. <https://www.iea.org/>
- [4] Yousef S. H. Najjar Musaab M. Kseibi, Thermoelectric stoves for poor deprived regions – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.211>.
- [5] Widyaparaga A, Koshimizu T, Noda E, Sakoda N, Kohno M, Takata Y. The frequency dependent regenerator cold section and hot section positional reversal in a coaxial type thermoacoustic Stirling heat pump. Cryogenics 2011:591–7.
- [6] Xu JY, Yu GY, Zhang LM, Dai W, Luo EC. Theoretical analysis of two coupling modes of a 300-Hz three-stage thermoacoustically driven cryocooler system at liquid nitrogen temperature range. Appl Energy 2017;185:2134–41.
- [7] Bi TJ, Wu ZH, Zhang LM, Yu GY, Luo EC, Dai W. Development of a 5kW traveling wave thermoacoustic electric generator. Appl Energy 2017;185:1355–61.
- [8] Chen G, Tang L, Mace BR. Modelling and analysis of a thermoacoustic-piezoelectric energy harvester. Appl Therm Eng 2019;150:532–44.
- [9] Wail Aladayleh, Ali Alahmer. Recovery of exhaust waste heat for ICE using the beta type Stirling engine. Energy 2015.
- [10] Sahoo D, Kotrba A, Steiner T, Swift G. Waste heat recovery for light-duty truck application using ThermoAcoustic Converter Technology. SAE Int. J. Engines 2017;10(2):196–202. <https://doi.org/10.4271/2017-01-0153>.

- [11] Fritzsche Jörg, Drückhammer Jens, Käppner Christoph, Hassel Egon, Steiner Thomas W. Thermoacoustics as an alternative technology for waste heat recovery in automotive and (Heavy) duty applications. In: 24th Aachen colloquium automobile and engine technology; 2015.
- [12]. Zolpakar NA, Mohd-Ghazali N, El-Fawal MH. Performance analysis of the standing wave thermoacoustic refrigerator: A review. *Renew Sust Energy Rev* 2016; 54: 626–634. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.018>
- [13]. Jin T, Huang JL, Feng Y, et al. Thermoacoustic prime movers and refrigerators: thermally powered engines without moving components. *Energy* 2015; 93: 828–853. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.005>
- [14] Preißinger M, Schwöbel JAH, Klamt A, Brüggemann D. Multi-criteria evaluation of several million working fluids for waste heat recovery by means of organic rankine cycle in passenger cars and heavy-duty trucks. *Appl Energy* 2017;206:887–99.
- [15] Wang C, Li M, Chiu C, Chang T. Kinetic study of solid-state interfacial reactions of p-type(Bi, Sb) 2Te₃ thermoelectric materials with Sn and Sn–Ag–Cu solders. *J Alloy Compd* 2018;767:1133–40
- [16] Nader WB, Chamoun J, Dumand Clé, Optimization of the thermodynamic configurations of a thermoacoustic engine auxiliary power unit for range extended hybrid electric vehicles, *Energy* (2020), doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116952>
- [17] F. Samimi, A. Babapoor, M. Azizi, G. Karimi, Thermal management analysis of a Li-ion battery cell using phase change material loaded with carbon fibers, *Energy*, 96 (2016) 355-371.
- [18] J. Fukai, M. Kanou, Y. Kodama, O. Miyatake, Thermal conductivity enhancement of energy storage media using carbon fibers, *Energy Conversion and Management*, 41 (2000) 1543-1556.
- [19] S. Backhaus, GW. Swift. A thermoacoustic-Stirling heat engine: detailed study. *J Acoust Soc Am*, 107(6), 3148–66, 2000.
- [20] S. Backhaus, GW. Swift, A thermoacoustic Stirling heat engine. *Nature*, 399(6734), 335–8, 1999.
- [21] Yu G, Wang X, Dai W, Luo E. Study on energy conversion characteristics of a high frequency standing-wave thermoacoustic heat engine. *Appl Energy*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.050> .
- [22] Johnson CM, Riley PH, Saha CR. Investigation of thermo-acoustically driven linear alternator. In: U21 energy conference, Birmingham, UK, 2008.

Desarrollo de un microgenerador eléctrico termoacústico, que funciona con el calor residual de una
fuente térmica

[23] Qiu K, Hayden ACS. Integrated thermoelectric and organic Rankine cycles for micro-CHP systems. Appl Energy September 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.0>