

RECIBIDO EL 26 DE JULIO DE 2021 - ACEPTADO EL 27 DE OCTUBRE DE 2021

ALTERNATIVES OF RESIDUAL RECOVERY, CONTRIBUTION FROM MECHANICAL ENGINEERING

ALTERNATIVAS DE RECUPERACIÓN RESIDUAL, CONTRIBUCIÓN DESDE LA INGENIERÍA MECÁNICA

Jhan Piero Rojas¹

Antuny Pabón²

Sofía Orjuela³

Universidad Francisco de Paula Santander,

Cúcuta, Colombia

RESUMEN

En la actualidad la demanda de energía aumenta de forma progresiva debido al crecimiento económico a nivel global,

dando como resultado un incremento en el consumo de recursos fósiles. Lo anterior, produce un aumento en los precios de los combustibles y preocupación ambiental. A lo largo de los años, los investigadores han propuesto diversos tipos de tecnologías para el aprovechamiento del calor residual de los gases de escape en los motores de combustión interna con el objetivo de mejorar la eficiencia de los procesos de combustión. Este tipo de estrategias son alternativas con un alto potencial para mejorar la eficiencia de los motores y reducir las emisiones

¹ Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia. Correo: jhanpiero Rojas@ufps.edu.co ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2682-9880>

² Facultad de Ciencias Empresariales, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia. Correo: antunypabon@ufps.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1078-2857>

³ Facultad de Ciencias Empresariales, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia. Correo: sofiaorjuela@ufps.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9742-8673>

contaminantes. Entre las principales tecnologías investigadas se encuentran: los turbocompresores, los ciclos orgánicos de Rankine, recirculación de gases de escape y generadores termoeléctricos. Cada una de estas tecnologías presentan ventajas y desventajas particulares que afectan su beneficio económico, ambiental y técnico. La intrusión de este tipo de tecnologías, generalmente produce una contrapresión en el sistema de escape, lo cual ocasiona una reducción en la potencia mecánica del motor. Entre las tecnologías existentes, se destaca los generadores termoeléctricos debido a sus diversas ventajas y capacidad de minimizar la contrapresión en el sistema de gases de escape mediante rediseños de los generadores.

PALABRAS CLAVE

Motor, tecnologías de recuperación, Calor residual.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de las actividades humanas a nivel global ha provocado un aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero. Lo anterior, ha conllevado a graves problemas ambientales como el calentamiento global. En particular, el sector del transporte es uno de los principales contribuyentes de los gases de efecto invernadero. Este sector genera un 14% de las emisiones mundiales de gas de efecto invernadero (Edenhofer, 2015). La producción de este tipo de gases es consecuencia de la quema de combustibles procedentes de materiales fósiles. Los estudios estadísticos muestran que el sector del transporte en los Estados Unidos representa aproximadamente el 29% de las emisiones totales de efecto invernadero (Tian et al., 2021). Dado el aumento en la producción y uso de motores de combustión interna, los

investigadores han enfatizado en la necesidad de mejorar el rendimiento de estas máquinas térmicas.

Los gases de escape en los motores de combustión interna presentan un alto potencial energético. Los estudios muestran que la eficiencia de los motores diésel esta entre 30 – 40% y para los motores de gasolina la eficiencia se encuentra entre 20 – 30%. Por lo tanto, un 60% de la energía del combustible es consumida por el sistema de refrigeración y lubricación del motor, procesos de fricción y desperdiciada por el sistema de escape del motor. Debido a esto, la recuperación del calor residual es una alternativa prometedora para mejorar la eficiencia de los motores de combustión interna. Las investigaciones demuestran que las tecnologías de recuperación presentan el mayor potencial para mejorar el rendimiento de las maquinas térmicas y ahorrar combustible (Plotkin et al., 2013). La comisión europea muestra que para lograr una reducción en las emisiones de CO₂ en necesario el uso combinado de combustibles alternativos y estrategias de recuperación de calor (Grawitz, 2018).

Debido a la importancia de buscar alternativas para mejorar la eficiencia de los motores de combustión interna, en la presente investigación se realiza una revisión de las principales tecnologías utilizadas en la recuperación de calor residual. Estas tecnologías incluyen turbocompresores, ciclos orgánicos de Rankine, recirculación de gases de escape y generadores termoeléctricos.

1. TECNOLOGÍAS DE RECUPERACIÓN EN MOTORES

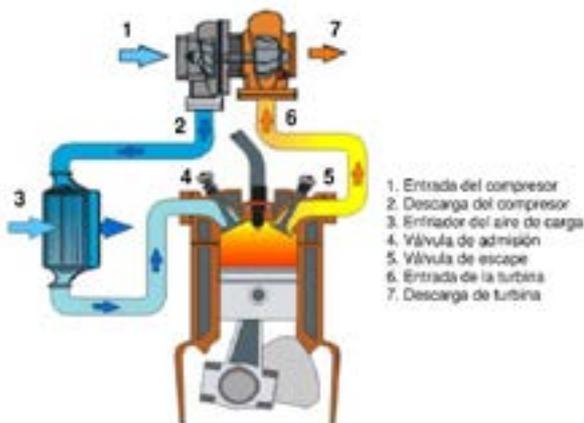
En esta sección del documento se realiza una descripción de las principales tecnologías utilizadas para la recuperación del calor residual de los gases de escape en los motores de combustión interna. En total, se presentan cuatro tipos de tecnologías: turbocompresores,

ciclo orgánico Rankine, recirculación de gases de escape y generadores termoeléctricos.

TURBOCOMPRESORES

Los turbocompresores son sistemas de sobrealimentación impulsados mediante la energía cinética de los gases de escape, los cuales son utilizados para aumentar la potencia del motor por medio de la compresión del aire de admisión. La Figura 1 describe el funcionamiento de un turbocompresor.

Figura 1: Diagrama del sistema turbocompresor. Tomado de: Elaborado por los autores a partir de datos de (Hatami et al., 2014)



A partir del movimiento de los gases de escape se realiza un trabajo mecánico en la turbina por medio de la expansión de los gases. El trabajo mecánico es transferido a un compresor por medio de un eje coaxial. Lo anterior, produce un aumento en la presión del aire de admisión, lo cual implica un aumento en la eficiencia del proceso de aspiración natural del motor.

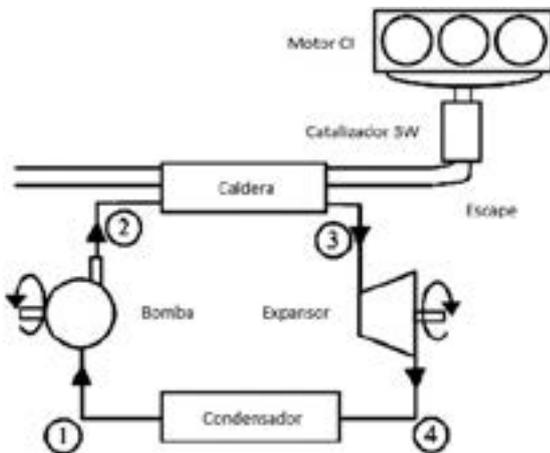
La principal desventaja de los sistemas turbocompresores es la alta caída de presión provocada por la instalación de la

turbina en el sistema de escape del motor. Lo anterior, genera una contrapresión que obstruye la expulsión de los gases en la cámara de combustión. De esta, se produce un trabajo de bombeo negativo que reduce la potencia del motor (Wurm et al., 1984). Adicionalmente, la mayor dificultad de expulsión de los gases quemados implica la presencia de gases residuales, retraso en la combustión, pérdidas de calor en la cámara de combustión y desequilibrio termodinámico en el proceso de combustión (Ismail et al., 2012).

1.1. CICLO ORGÁNICO RANKINE

Los ciclos orgánicos Rankine (ORC, por sus siglas en inglés) funcionan de manera similar al ciclo Rankine convencional. En la Figura 2 se muestra el diagrama de proceso del ciclo orgánico Rankine. La etapa 3 – 4 consiste en la expansión del fluido de trabajo en la turbina para la producción de potencia mecánica. Durante la etapa 4 – 1 se produce la condensación. El fluido es transportado hacia la bomba (etapa 1 – 2), la cual permite incrementar su presión. Finalmente, el fluido es calentado por medio de los gases de escape (etapa 2 – 3), cambiando de fase antes de pasar a la etapa 3 – 4.

Figura 2: Diagrama de proceso del ciclo orgánico Rankine. Tomado de: Elaborado por los autores a partir de datos de (Hatami et al., 2014)



La diferencia del ciclo ORC consiste en el uso de sustancias con puntos de ebullición menor al agua como fluido de trabajo. Lo anterior, permite que este tipo de ciclos opere a bajas temperaturas en comparación con los ciclos Rankine convencionales (Schuster et al., 2009). Adicionalmente, el tipo de fluidos utilizados presentan una menor masa molecular en relación con el agua, lo cual permite una construcción de diseños más compactos, mayores tasas de flujos másico y altas eficiencias en la turbina (Mavrou, Papadopoulos, Seferlis, et al., 2015)(Mavrou, Papadopoulos, Stijepovic, et al., 2015).

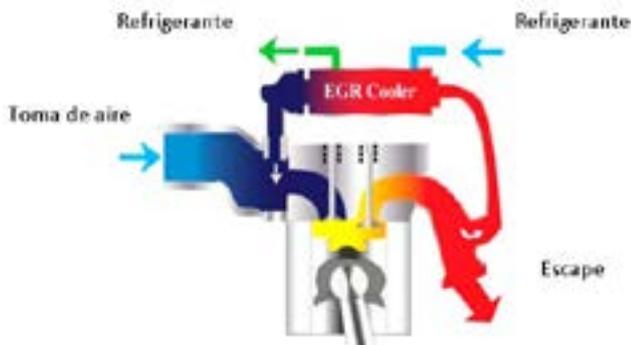
Los ciclos ORC permiten aprovechar las altas temperaturas y velocidad de los gases de escape para una generación adicional de potencia mecánica. De esta forma, se logra mejorar la eficiencia térmica del ciclo de combustión y disminuir parte de las emisiones contaminantes (Trapp & Colonna, 2013) which is cooled from a temperature of approximately 140 °C, and

partly condenses due to the heat transfer to the ORC primary heat exchanger. This study explores various types of ORC power systems for this application. The performance of commercially available ORC units is used as a benchmark and compared to the performance of two types of tailor-designed ORC power plants. The working fluid has a major influence on system performance and other technical and economic factors. The effect of selecting a fluid from the hydrocarbon and refrigerant families are therefore investigated, targeting the maximum net power output. In addition to pure fluids, two-component mixtures are also considered. The use of mixtures as working fluids in subcritical heat-recovery ORC systems allows for a better match of the temperature profiles in the primary heat exchanger and the condenser due to the temperature glide associated with phase-transition, leading to lower irreversibilities within the heat exchanging equipment. In order to further improve the thermal coupling between the cooling heat source and the heating of the working fluid, the supercritical cycle configuration is also studied. The performance of the three categories of systems, depending on working fluid and cycle configuration, i.e., systems based on (i. A pesar de las ventajas mencionadas anteriormente, existe muy poca compensación entre la energía recuperada y la energía perdida debido a la contrapresión en el sistema de escape del motor. Adicionalmente, los ciclos ORC provocan un aumento en el peso del automotor. Otra de las desventajas es su baja eficiencia cuando funciona fuera de las condiciones de diseño (Chintala et al., 2018).

1.2. RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE

Los sistemas de recirculación de gases de escape (EGR, por sus siglas en inglés) producen una redirección de una porción de los gases de escape por medio de una válvula de control (ver Figura 3).

Figura 3: Sistema de recirculación de gases de escape. Tomado de: Elaborado por los autores a partir de datos de (Hatami et al., 2014)



Este tipo de sistemas sustituye parte del oxígeno del aire de admisión por diluyentes como el H_2O y CO_2 . Lo anterior, provoca una reducción en la temperatura del interior de la cámara de combustión, permitiendo una disminución en las emisiones de NO_x . Sin embargo, la recirculación de los gases quemados tiende a incrementar las emisiones de HC, CO y material particulado (Sher, 1998).

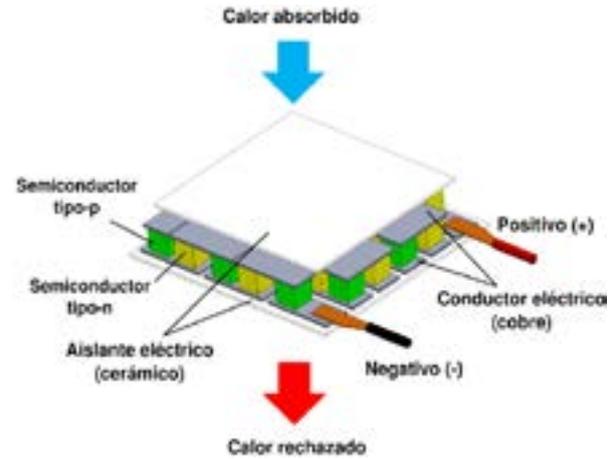
1.3. GENERADORES TERMOELÉCTRICOS

Los generadores termoeléctricos (TEGs) tienen la capacidad de transformar un gradiente de temperatura directamente en electricidad por medio del efecto termoeléctrico Seebeck. Para esto, los TEGs utilizan módulos termoeléctricos

(TEMs), los cuales se muestran en la Figura 4 (Wang et al., 2018).

Figura 4: Módulo termoeléctrico.

Tomado de: Elaborado por los autores.



Los TEMs está formado por semiconductores tipo p y tipo n, conectados térmicamente en paralelo y eléctricamente en serie. En presencia de un gradiente de temperatura, se genera un flujo de electrones libres desde el extremo caliente (fuente de calor) hacia el extremo frío (disipador de calor) en el par termoeléctrico (pareja de material semiconductor tipo p y tipo n) generando un potencial eléctrico.

Entre las ventajas de los TEGs se encuentran la ausencia de partes móviles, escalabilidad, estructura compacta, costo de mantenimiento reducido, funcionamiento silencioso, cero emisiones y alta confiabilidad. Lo anterior, ha motivado el desarrollo de investigaciones para su aplicación en la recuperación energética de los gases de escape.

La principal desventaja del TEG es la contrapresión generada por la caída de presión de los gases de escape en el

intercambiador de calor, lo cual provoca un incremento en las pérdidas hidráulicas en el sistema de escape del motor y una disminución en la eficiencia energética.

3. CONCLUSIONES

La recuperación del calor de los gases de escape de los motores de combustión interna es una alternativa con un alto potencial para mejorar la eficiencia de los procesos de combustión y reducir las emisiones contaminantes. A pesar de la existencia de distintas tecnologías para la recuperación del calor residual de los gases de escape, cada una de estas presenten ventajas y desventajas particulares que afectan su beneficio económico, ambiental y técnico. En general, la recuperación del calor residual del motor es posible mediante la aplicación de procesos térmicos, mecánicos y eléctricos. Esta recuperación implica la reutilización de la energía térmica y/o cinética de los gases de combustión. Entre las principales tecnologías investigadas se encuentran: los turbocompresores, los ciclos orgánicos de Rankine, recirculación de gases de escape y generadores termoeléctricos. Debido a la intrusión de este tipo de tecnologías, generalmente, se produce una contrapresión en el sistema de escape, lo cual ocasiona una reducción en la potencia mecánica del motor. Entre las tecnologías descritas en la presente investigación se destaca el uso de generadores termoeléctricos debido a sus diversas ventajas en comparación con otras tecnologías. Además, de tener la capacidad de minimizar la contrapresión en el sistema de gases de escape mediante cambios en el diseño del TEG.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chintala, V., Kumar, S., & Pandey, J. K. (2018). A technical review on waste heat recovery from compression ignition engines using organic Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 493–509. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.016>
- Edenhofer, O. (2015). *Climate change 2014: mitigation of climate change* (Vol. 3). Cambridge University Press.
- Grawitz, C. (2018). *Horizon 2020-Work Programme for Research & Innovation 2018-2020*.
- Hatami, M., Ganji, D. D., & Gorji-Bandpy, M. (2014). A review of different heat exchangers designs for increasing the diesel exhaust waste heat recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 168–181. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.004>
- Ismail, Y., Durrieu, D., Menegazzi, P., Chesse, P., & Chalet, D. (2012, September 10). Potential of Exhaust Heat Recovery by Turbocharging. *SAE Technical Paper*. <https://doi.org/10.4271/2012-01-1603>
- Mavrou, P., Papadopoulos, A. I., Seferlis, P., Linke, P., & Voutetakis, S. (2015). Selection of working fluid mixtures for flexible Organic Rankine Cycles under operating variability through a systematic nonlinear sensitivity analysis approach. *Applied Thermal Engineering*, 89, 1054–1067. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.017>

- Mavrou, P., Papadopoulos, A. I., Stijepovic, M. Z., Seferlis, P., Linke, P., & Voutetakis, S. (2015). Novel and conventional working fluid mixtures for solar Rankine cycles: Performance assessment and multi-criteria selection. *Applied Thermal Engineering*, *75*, 384–396. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.10.077>
- Plotkin, S., Stephens, T., & McManus, W. (2013). *Vehicle technology deployment pathways: An examination of timing and investment constraints*.
- Schuster, A., Karellas, S., Kakaras, E., & Spliethoff, H. (2009). Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications. *Applied Thermal Engineering*, *29*(8–9), 1809–1817. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.08.016>
- Sher, E. (1998). *Handbook of air pollution from internal combustion engines: pollutant formation and control*. Academic Press.
- Tian, H., Liu, P., & Shu, G. (2021). Challenges and opportunities of Rankine cycle for waste heat recovery from internal combustion engine. *Progress in Energy and Combustion Science*, *84*, 100906. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100906>
- Trapp, C., & Colonna, P. (2013). Efficiency Improvement in Precombustion CO₂ Removal Units With a Waste–Heat Recovery ORC Power Plant. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, *135*(4), 042311. <https://doi.org/10.1115/1.4023121>
- Wang, Y., Li, S., Xie, X., Deng, Y., Liu, X., & Su, C. (2018). Performance evaluation of an automotive thermoelectric generator with inserted fins or dimpled-surface hot heat exchanger. *Applied Energy*, *218*, 391–401. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.176>
- Wurm, J., Kinast, J. A., & Bulicz, T. (1984). *Assessment of Positive Displacement Supercharging and Compounding of Adiabatic Diesel*.