

ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE UN GENERADOR TERMOELÉCTRICO DE ESTRUCTURA ANULAR PARA LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA CONTENIDA EN FLUIDOS

MASSAGUER COLOMER, Albert⁽¹⁾; MASSAGUER COLOMER, Eduard⁽¹⁾; COMAMALA LAGUNA, Martí⁽¹⁾; MONTORO MORENO, Lino⁽¹⁾; RICART FERRER, Josep⁽²⁾

albert.massaguer@udg.edu

⁽¹⁾Universidad de Girona, Escuela Politécnica Superior, Departamento de Ingeniería Mecánica y de la Construcción Industrial.

⁽²⁾COMEXI Group Industries, S.A.U, Departamento de Producto.

RESUMEN

Los dispositivos termoelectricos se utilizan actualmente en aplicaciones que van desde sensores de termopar a generadores de energía, hasta acondicionadores de aire portátiles y refrigeradores. Con la demanda cada vez mayor de consumo de energía en todo el mundo y la necesidad de reducción de las emisiones de CO₂, la conversión de energía termoelectrica ha estado recibiendo gran atención como un posible candidato para la recuperación de calor residual, así como la capacidad de generación a partir de fuentes renovables. Hasta ahora, se ha puesto mucho énfasis en que la eficiencia en la conversión de la energía termoelectrica dependía básicamente del rendimiento de los materiales y dispositivos termoelectricos, sin embargo, aspectos como la geometría de los elementos P y N también afectan a la calidad de la energía producida. Prueba de ello son la poca variedad de módulos no planos o la gran cantidad de investigaciones centradas en la búsqueda de materiales con figuras de mérito mayor.

En la conducción de fluidos, una de las geometrías más habituales es la tubular. Si lo que se desea es transferir energía a este fluido o a la inversa, el uso de módulos termoelectricos planos con semiconductores habituales no resulta eficiente, aún incluso si se opta por hacer una modificación en la tubería y transformarla a rectangular.

En este documento, se investiga el uso de semiconductores con estructura anular para la recuperación energética de fluidos en conductos tubulares. Se analiza la transferencia de calor en los materiales y dispositivos termoelectricos, tanto fonones como electrones, con herramientas de simulación basadas en elementos finitos y se comparan los resultados obtenidos con los proporcionados en la teoría.

Palabras clave: termoelectricidad, semiconductores anulares, recuperación energética.

1. Introducción

En la actualidad, solo una tercera parte de la energía primaria que se requiere es finalmente utilizada. La energía restante es desechada en forma de calor, una calor que habitualmente es difícil de aprovechar y que empobrece el rendimiento de muchas aplicaciones como vehículos de combustión, electrónica o hornos industriales.

En los motores de combustión de automóviles, por ejemplo, más del 50% de la energía del combustible se pierde como calor residual. Los generadores termoeléctricos (TEG) tienen el potencial de recuperar parte de este calor residual cuando se instalan en el tubo de escape del y de este modo aumentar la eficiencia del vehículo.[1,2] En los últimos años se han realizado varios proyectos de investigación demostrando la integración de TEG en los coches, el uso de los humos de escape caliente como fuente de calor en el lado caliente y un sistema de refrigeración a base de líquido en el lado frío.

La mayoría de los generadores utilizados en estos proyectos se basan en módulos que usan la disposición plana convencional de p y n pellets.[3,4] Para minimizar la caída de temperatura entre el gas de escape y el material termoeléctrico (TE) dentro del módulo, es necesario un buen contacto entre el tubo de escape y el módulo de TE, un requisito que no es fácil de satisfacer cuando el tubo es cilíndrico. Normalmente se requiere una presión muy elevada de los módulos contra el tubo que conduce el gas, que a su vez hace que todo el diseño del generador sea muy pesado. Además, la distribución de temperatura de su cuerpo se convierte fácilmente en no uniforme de manera que si se produce una diferencia de temperatura entre las uniones de semiconductores de tipo p y tipo n , la resistencia interna entre las uniones en el módulo TE varía. Esta variación de la resistencia interna hace que la totalidad de la resistencia interna del módulo termoeléctrico aumente, de manera que el rendimiento TE del módulo empeora. Este problema se produce no sólo en el mismo módulo, sino también entre diferentes módulos cuando se interconectan formando una matriz como en los recuperadores termoeléctricos longitudinales (LTEH).[5,6]

Asimismo, en los módulos convencionales la temperatura de funcionamiento es relativamente baja debido a que existe una soldadura de bajo punto de fusión entre el electrodo de conducción los semiconductores. Por tanto, es imposible mejorar completamente el rendimiento de los módulos TE.

Igualmente, el costo de producción de módulos TE convencionales es alto debido a la complejidad de las estructuras de unión de los semiconductores y el gran número de piezas que se requieren. Además, un módulo TE convencional carece de fiabilidad debido a que su funcionamiento se detiene cuando alguno de las muchas uniones p y n está desconectada, ya que las uniones están conectados en serie.

Existe la necesidad, pues, de un modulo TE que supere estas deficiencias. D.M. Rowe propuso un diseño basado en anillos de material termoeléctrico que conectados consecutivamente a lo largo del tubo permitirían un mejor aprovechamiento de la energía térmica en conductos tubulares.[7]

El tipo de módulo tubular como el que se describe en este trabajo puede ser especialmente ventajoso en comparación con diseños planos cuando la fuente de calor y el disipador comprenden fluidos o gases. Estos pueden ser fácilmente guiados directamente a través del módulo o alrededor de su superficie, permitiendo así un buen contacto térmico sin la aplicación de fuerzas externas. Por otra parte, y en contraste con los diseños convencionales, las tensiones mecánicas debido a la expansión térmica pueden ser fácilmente transferidas a los puentes metálicos tubulares. Aquí, actúan como esfuerzos a tracción y compresión por lo que pueden ser absorbidos sin refuerzos adicionales, con el consiguiente ahorro de peso. Otro aspecto muy importante de este diseño es su compacidad, la potencia eléctrica generada por unidad de volumen es mucho mayor que en el caso de módulos TE planos.

A pesar de todo esto, la geometría de los anillos semiconductores no se ha estudiado en detenimiento y se cree que juega un papel importante en el rendimiento del dispositivo.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es estudiar la influencia de la geometría de los semiconductores anulares y analizar que geometría es la mejor para conseguir la máxima conversión eléctrica.

El dispositivo tubular se introducirá en un software de elementos finitos, en este caso *ANSYS*, usando las herramientas de termoelectricidad. Se variaran diferentes medidas, tanto el grosor como la altura del perfil del anillo, como también la temperatura de trabajo del conjunto.

3. Modelo físico

El modelo físico planteado por D.M. Rowe compuesto por termoelementos de forma anular se muestra en la Figura 1. En este diseño; los semiconductores en forma de anillo de material termoeléctrico *p* y *n* están dispuestas alternativamente a lo largo del eje del tubo con aislante en el medio para prevenir cortocircuitos. Estos semiconductores están alternativamente conectados por tubos cortos metálicos, que actúan como conductores eléctricos, tanto en el diámetro interior como en el exterior de los anillos.

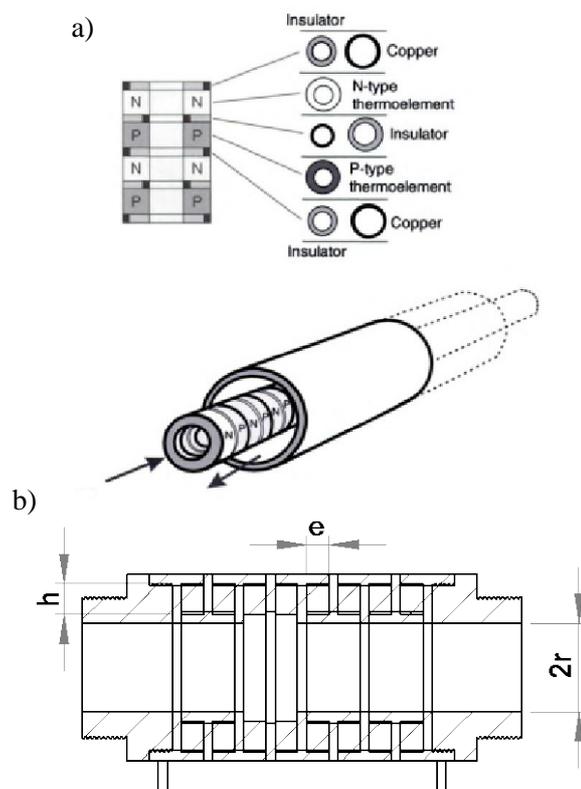


Figura 1: a) Módulo termoelectrico de estructura anular. b) Sección del módulo simulado.

Aunque el dispositivo puede trabajar de forma inversa, para el estudio se ha considerado que el fluido caliente circula por el interior de los materiales semiconductores, con radio r , y el fluido frío por la camisa exterior. La sección de cada anillo semiconductor es de altura h y espesor e . Estas medidas son las que se estudiarían para conseguir la máxima conversión eléctrica.

4. Modelo numérico

El modelo mostrado en la Figura 1b) se introdujo en el software multifísico *ANSYS*. Las dimensiones y temperaturas implementadas para el dispositivo son las que se muestran en la Tabla 1.

Valores de las variables simuladas para el dispositivo.

h [mm]	e [mm]	T [K]	r [mm]
1, 2, 5, 10 y 15	1, 2, 5, 10 y 15	323.15, 373.15, 423.15, 473.15 y 523.15	2.5, 5, 7.5, 10 y 15

Los materiales de los semiconductores p y n considerados en este estudio son aleaciones de Bi_2Te_3 y el material de los cilindros conectores es cobre.

5. Resultados

Una vez definido el modelo a simular, se han realizado cuatro análisis donde se presenta la potencia eléctrica generada en función de las cuatro variables definidas en la Tabla 1.

En el primer estudio, Figura 2, donde se analiza cual es la potencia eléctrica que se genera cuando se incrementa la altura de los materiales semiconductores, puede verse como ésta disminuye. Esto es debido a que un aumento en el recorrido de los electrones ofrece una mayor resistencia eléctrica y por tanto una disminución del corriente.

Asimismo, estas pérdidas en el transporte disminuyen cuando el espesor del pellet aumenta, básicamente por el hecho que una mayor sección de un conductor permite un mayor flujo de electrones y también porque el material termoeléctrico es capaz de aumentar el número de *heatcarriers* ya que la superficie caliente ha aumentado. Este hecho también explica porque cuando se aumenta el radio interno de los pellets la potencia eléctrica también aumenta.

Del mismo modo, si la temperatura del fluido interior es más alta también mejora la cantidad de generación eléctrica, debido a que el gradiente de temperatura es mayor.

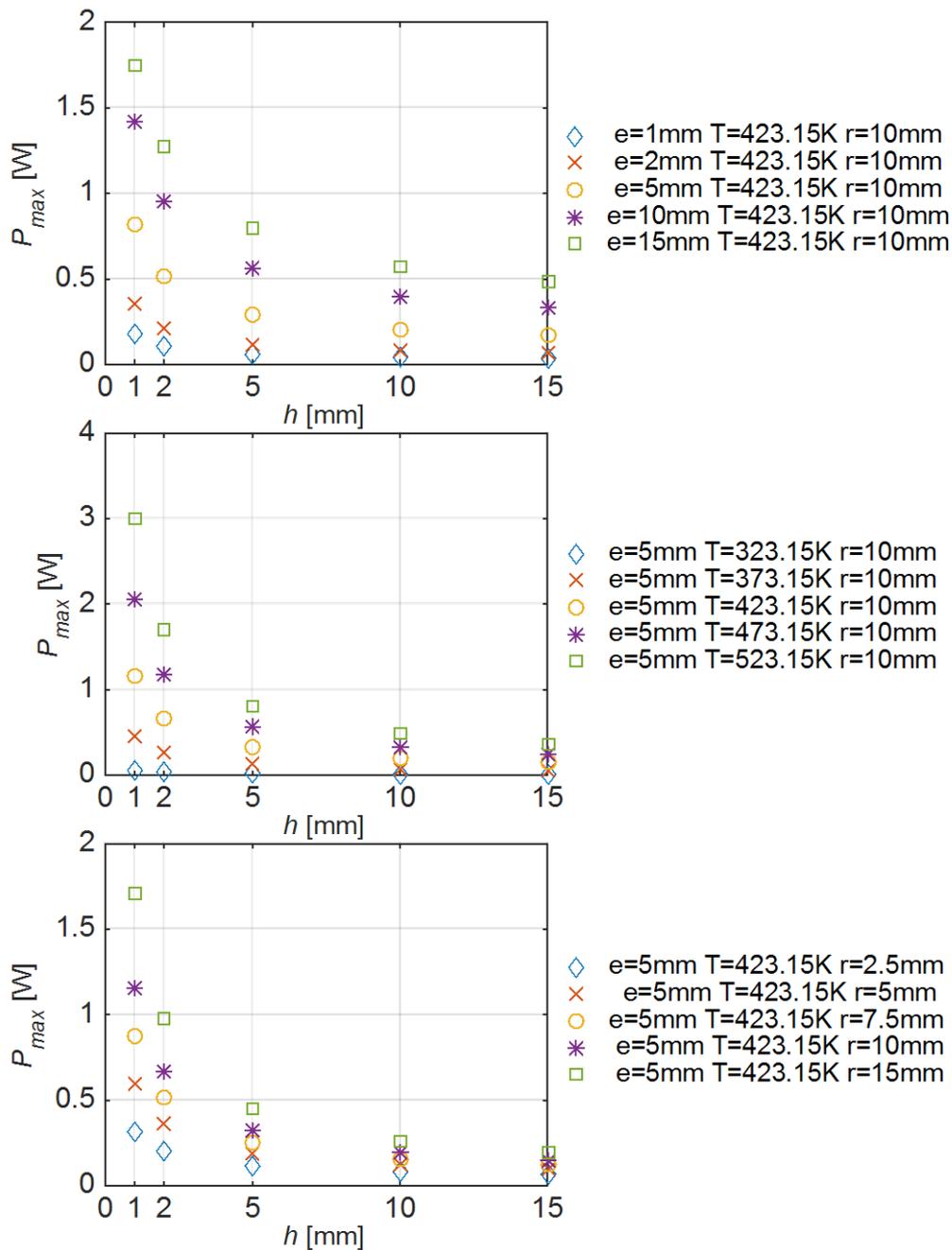


Figura 2: Análisis de la potencia eléctrica máxima P_{max} en función de la altura h de los pellets.

En el segundo estudio, Figura 3, se analiza la potencia eléctrica generada cuando se modifica el espesor de los semiconductores. Como se ha dicho anteriormente, el aumento de esta variable favorece al movimiento de electrones, lo que es favorable a la generación eléctrica.

Este aumento ocurre cuando la altura del pellet disminuye, el gradiente de temperatura aumenta o el radio también aumenta. Sin embargo, la evolución de la potencia en ambos casos tiende a un límite superior, un fenómeno diferente al primer análisis donde una disminución de la altura tendía a incrementar exponencialmente el valor de P .

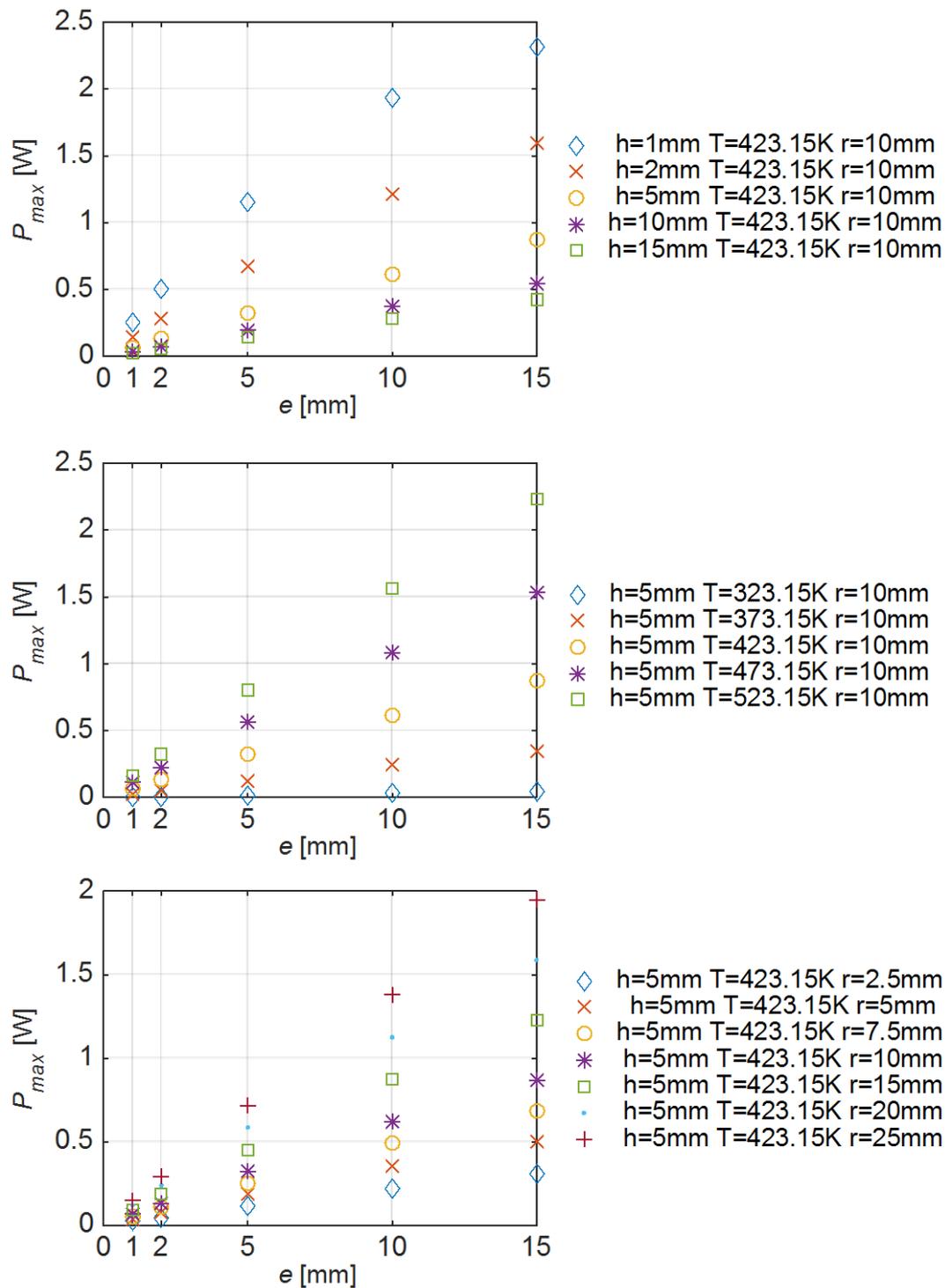


Figura 3: Análisis de la potencia eléctrica máxima P_{max} en función del grosor e de los pellets.

Analizando la evolución de la potencia eléctrica en función de la temperatura del fluido interior es fácilmente apreciable que esta aumenta cuando mayor energía se introduce en el dispositivo.

Por otra parte, cabría esperar que con el aumento de la altura de los pellets, la potencia fuera superior ya que la transferencia por conducción beneficiaría un aumento del gradiente de temperatura en sus caras, pero no es así. Se ve como la disminución del grosor de dichos elementos beneficia una mayor producción de energía eléctrica, explicado por la disminución de la resistencia eléctrica del material.

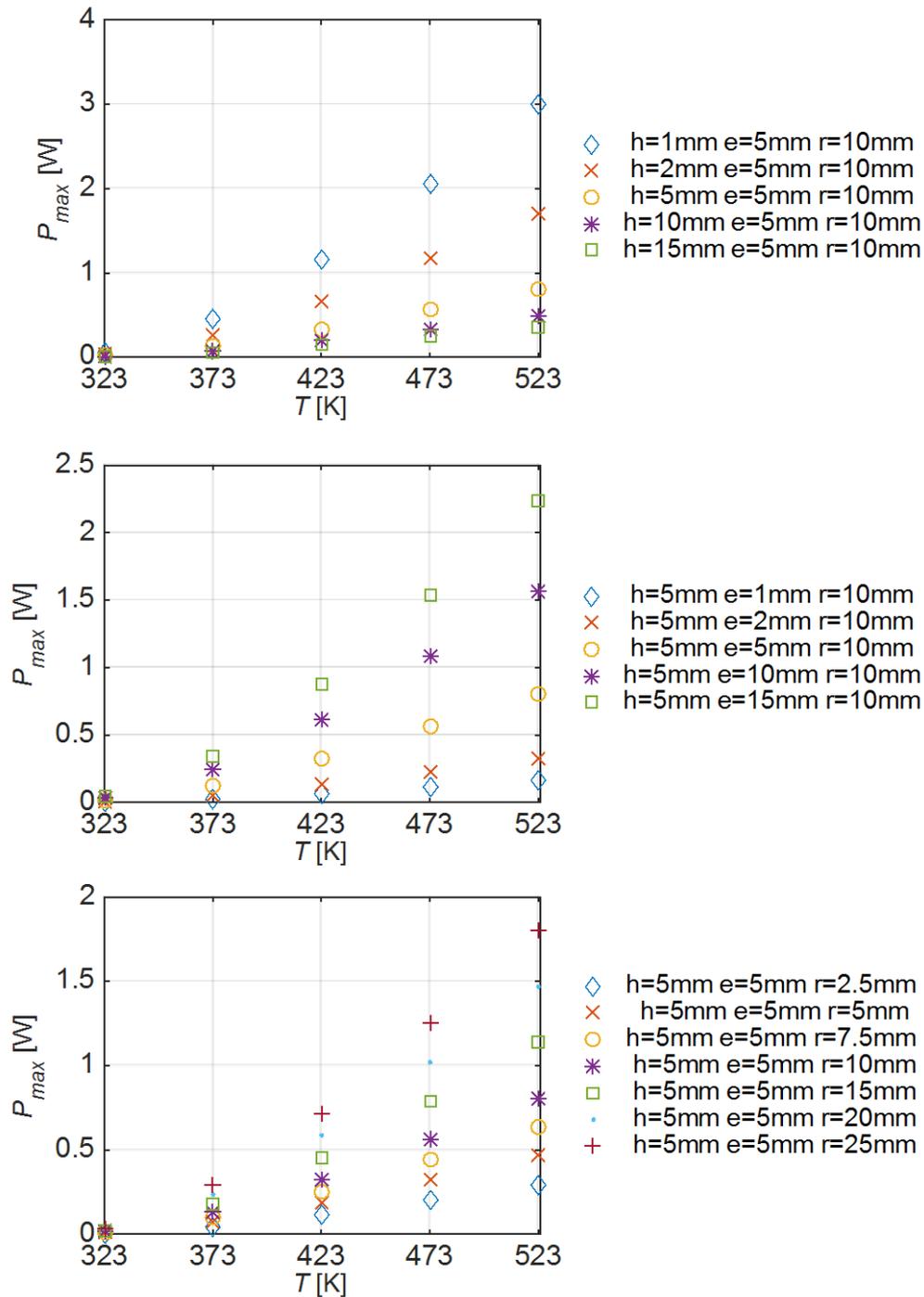


Figura 4: Análisis de la potencia eléctrica máxima P_{max} en función de la temperatura T del fluido interior.

Finalmente, si se hace un análisis de la potencia eléctrica cuando se aumenta el radio interior de los semiconductores, puede apreciarse como el aumento de P es importante. Además su evolución no hace sospechar de un límite próximo.

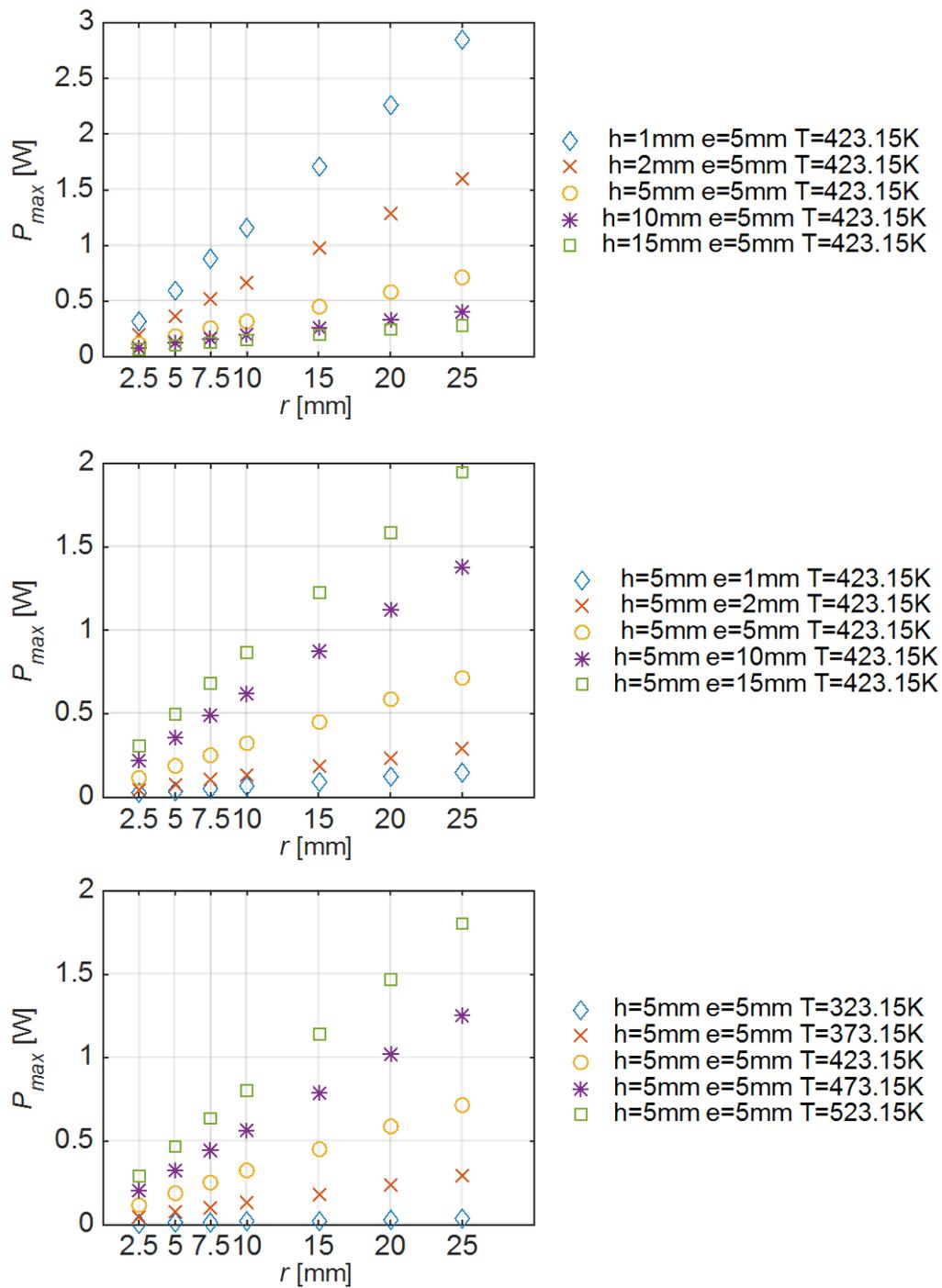


Figura 5: Análisis de la potencia eléctrica máxima P_{max} en función del radio interior r de los pellets.

6. Conclusiones y consideraciones finales

Analizando los resultados de este estudio podemos afirmar que existen cuatro parámetros importantes en el diseño de recuperadores de calor termoeléctricos de geometría tubular. El primero de ellos es la temperatura, la cual evidencia la cantidad de energía que entra en el sistema. A mayor energía, mayor generación a igualdad de temperatura en la cara fría, ya que aumenta el gradiente de temperatura.

Otra variable importante es la altura de los pellets. Con este estudio se ha podido constatar que la altura debe ser lo mas pequeña posible, con el fin de disminuir las pérdidas por efecto Joule.

Del mismo modo, se desea que el grosor de los semiconductores sea lo mas grande posible ya que así se favorece el paso de electrones.

Finalmente, el aumento del radio de los pellets incrementa favorablemente la producción eléctrica ya que la superficie de contacto con los focos frío y caliente aumentan y por lo tanto el movimiento de electrones es mayor.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Generalitat de Catalunya en la Ayuda Nov2014-SGR-36 y el MICINN-FEDER en la Ayuda No. FIS-2012-31307. Los autores les gustaría agradecer también a la Asociación de Ingenieros Industriales de Catalunya (AEIC) por su financiación parcial.

8. Referencias

- YANG, J. STABLER, F.R. *Automotive applications of thermoelectric materials*. Journal of Electron Mater, 2009, vol. 38, pp. 1245.
- SALZGEBER, K. PRENNINGER, P. GRYSTSIV, A. ROGL, P. BAUER, E. *Skutterudites: Thermoelectric Materials for Automotive Applications?*. Journal of Electron Mater, 2010, vol. 39, pp. 2074.
- CRANE, D.T. LAGRANDEUR, J.W. *Progress Report on BSST-Led US Department of Energy Automotive Waste Heat Recovery Program*. Journal of Electron Mater, 2010, vol. 39, pp. 2142.
- ESPINOSA, N. LAZARD, M., AIXALA, L. SCHERRER, H. *Modeling a Thermoelectric Generator Applied to Diesel Automotive Heat Recovery*. Journal of Electron Mater, 2010, vol. 39, pp. 1446.
- E. Massaguer, A. Massaguer, L. Montoro, J.R. Gonzalez, *Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of thermoelectric generators*, Appl. Energy. 134 (2014) 65–74.
- E. Massaguer, A. Massaguer, L. Montoro, J.R. Gonzalez, *Modeling analysis of longitudinal thermoelectric energy harvester in low temperature waste heat recovery applications*, Appl. Energy. 140 (2015) 184–195.
- MIN, G. ROWE, D.M. *Ring-Structured Thermoelectric Module*. Semiconductor Science and Technology, 2007, vol. 22, pp. 880.