

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF PASSIVE HEAT EXCHANGERS WITH NO MOVING PARTS FOR GEOTHERMAL THERMOELECTRIC GENERATORS

Patricia Alegría Cía^{1,2}, Leyre Catalán Ros^{1,2}, Miguel Araiz Vega^{1,2}, Nerea Ariz¹, Irantzu Erro Iturralde¹ and David Astrain Ulibarrena^{1,2}

1: Universidad Pública de Navarra. Campus Arrosadía s/n, 31006 Pamplona (España); 2: Institute of Smart Cities, España.

Patricia Alegría Cía
patricia.alegría@unavarra.es

.....

Resumen: Los generadores termoeléctricos han mostrado un gran potencial para aprovechar la energía geotérmica en yacimientos de roca seca caliente superficiales debido a su fiabilidad, escalabilidad y mínimo impacto. Sin embargo, para lograr las anteriores ventajas, es de suma importancia un diseño adecuado de los intercambiadores de calor. Es necesario no sólo conseguir bajas resistencias térmicas, sino también evitar las partes móviles, de forma que las ventajas de los módulos termoeléctricos se extrapolen a todo el generador, y se eviten los consumos auxiliares, maximizando así la generación neta. Además, se pretende que los intercambiadores de calor sean lo más compactos posible para reducir su impacto visual.

En este trabajo se presenta el análisis experimental de diferentes intercambiadores de calor que cumplen los anteriores requisitos. Más concretamente, se han estudiado los intercambiadores de calor bifásicos y su combinación con disipadores de aletas en diferentes configuraciones. La metodología seguida combina una parte experimental en el laboratorio, determinando las resistencias térmicas de cada intercambiador en diferentes condiciones, así como simulaciones y experimentos en campo, en el Parque Nacional de Timanfaya, con un generador completo instalado en un sondeo a 460 °C.

Los resultados obtenidos muestran que la combinación de intercambiadores de calor bifásicos con disipadores de aletas es la mejor opción para maximizar la potencia generada, ya que la disipación de calor se realiza correctamente. Para conseguir el requisito de compactidad, esta configuración permite eliminar el disipador y reducir la longitud de los intercambiadores de calor bifásicos, consiguiendo reducir el impacto visual y evitando partes móviles y consumos auxiliares.

Palabras clave: Renovable, geotermia, disipación, bifásico, aletas

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, nos encontramos ante una crisis climática en la que la solución debe llevar implícita un impulso a las energías renovables. De entre todas las energías renovables que se están desarrollando, la geotérmica se está quedando atrás debido a la dificultad para acceder a los recursos geotérmicos [1], así como la necesidad de construir grandes plantas para poder amortizar la inversión que requieren los actuales métodos de utilización de esta energía.

En los últimos años, Catalán et al. [2] han demostrado que los generadores termoeléctricos tienen un gran potencial para aprovechar la energía geotérmica en yacimientos de roca caliente seca poco profundos debido a su fiabilidad, escalabilidad y mínimo impacto. No obstante, para conseguir las anteriores ventajas es de suma importancia un diseño adecuado

de los intercambiadores de calor. Es necesario no sólo conseguir bajas resistencias térmicas, sino también evitar las partes móviles, de forma que las ventajas de los módulos termoeléctricos se extrapolen a todo el generador en sí, y se eviten los consumos auxiliares, maximizando así la generación neta.

En este trabajo se presenta el análisis experimental de diferentes intercambiadores de calor que cumplen los anteriores requisitos. Además, para minimizar su impacto visual, estos deben ser lo más compactos posible. Estos intercambiadores deben ser eficientes, presentando una resistencia térmica baja que permita acercar la temperatura de las caras de los módulos termoeléctricos a las de los focos, factor muy importante en cualquier generador termoeléctrico. Así, en la Sección 2 se explica el funcionamiento de un generador termoeléctrico para geotermia, que ha sido patentado por el grupo de investigación en ingeniería térmica y de fluidos de la Universidad Pública de Navarra. En la Sección 3 se expone el estudio experimental que se ha realizado a diferentes configuraciones de intercambiadores del lado frío, con el objetivo de obtener el más adecuado para la aplicación considerada. La Sección 4 recoge los resultados de dicha experimentación y, finalmente, en la Sección 5 se explican las conclusiones obtenidas de este trabajo.

2. FUNCIONAMIENTO DE UN GENERADOR TERMOELÉCTRICO PARA GEOTERMIA

Un generador termoeléctrico es un dispositivo capaz de transformar el calor directamente en electricidad a través de los módulos termoeléctricos. La eficiencia de estos módulos termoeléctricos depende de la diferencia de temperaturas entre sus caras, por lo tanto, es de gran importancia que su cara caliente esté a una temperatura lo más cercana posible a la del foco de calor geotérmico, y la de su cara fría a la del ambiente. Para conseguir esto, se demostró que los intercambiadores más eficientes en esta aplicación son los que funcionan mediante el cambio de fase [2]. Además, Astrain demostró la importancia de minimizar las resistencias térmicas en los intercambiadores de un generador termoeléctrico, ya que un 10 % menos de resistencia térmica da lugar a un 8 % más de generación [3].

De este modo, en un generador termoeléctrico para geotermia, el intercambiador del lado caliente absorbe el calor geotérmico, transmitiéndolo mediante cambio de fase hasta la cara caliente de los módulos. Estos módulos transforman parte de ese calor en electricidad, y el resto debe ser disipado al ambiente mediante los intercambiadores del lado frío, que también funcionarán mediante cambio de fase. El diseño de un generador de este tipo se puede ver en la Figura 1.

Este trabajo se centra en el estudio de los intercambiadores del lado frío, de modo que se determine la configuración óptima para aprovechar las ventajas de la geotermia en un campo de roca caliente seca mediante un generador termoeléctrico.

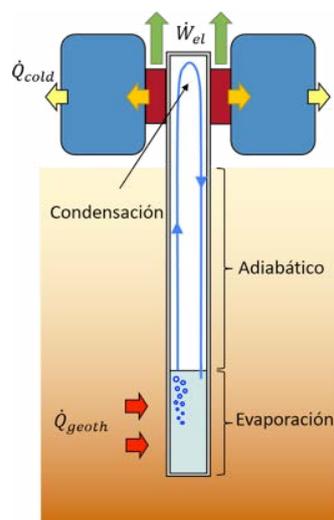


Figura 1. Esquema de un generador termoeléctrico para geotermia.

3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

Para aprovechar al máximo las ventajas de la termoelectricidad, la mejor opción es contar con intercambiadores de calor totalmente pasivos y sin partes móviles, lo que además reducirá al mínimo las necesidades de mantenimiento, así como los ruidos ocasionados. Estos intercambiadores de calor, a su vez, deben ser lo más compactos posible, de modo que el generador termoeléctrico no ocasione un gran impacto visual, como lo hacen las actuales centrales de generación geotérmicas.

El intercambiador de calor pasivo más sencillo consiste en un disipador de aletas, sin embargo, estos cuentan con una eficiencia más limitada que otros sistemas. Catalán determinó que los intercambiadores de calor bifásicos eran más apropiados para la disipación del calor en este tipo de generadores [2]. Por este motivo, los intercambiadores que se van a estudiar constan de heat pipes de cobre sinterizados, que contienen un fluido en su interior y transmiten el calor desde la zona de evaporación hasta la zona de condensación.

Estos heat pipes irán en un bloque de aluminio y se insertarán en ellos aletas de aluminio de 3 mm de espesor, con una separación de 5 mm entre cada una de ellas [4].

Dado que se quiere maximizar el intercambio de calor, se van a estudiar intercambiadores de heat pipes con y sin disipador de aletas. Además, se estudiarán varias longitudes de heat pipes, ya que una mayor área de intercambio provocará una mejor disipación, pero, por otro lado, ocasionará mayor impacto visual al ensamblarlo en el generador. El objetivo es determinar la configuración que tenga una resistencia térmica baja, pero sin comprometer la compacidad del dispositivo.

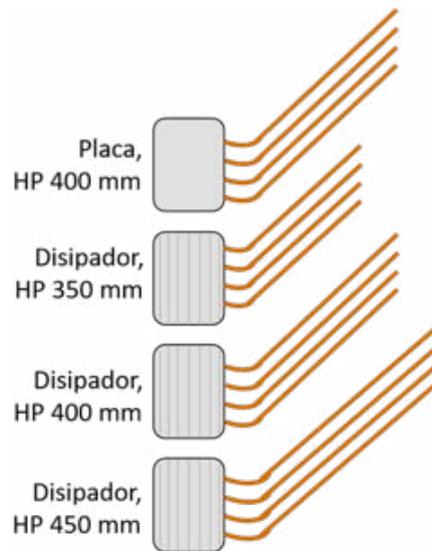


Figura 2. Esquema de los 4 intercambiadores del lado frío.

En la Figura 2 se pueden ver de manera esquematizada los 4 intercambiadores ensayados. La metodología seguida fue la siguiente: Se construyeron los cuatro intercambiadores siguiendo el mismo método, es decir, mecanizando orificios en una placa de aluminio y en la base de tres disipadores de aletas de aluminio. Posteriormente, se insertaron cuatro heat pipes en cada intercambiador y se prensaron para conseguir una superficie totalmente lisa y uniforme. A continuación, se caracterizaron térmicamente en una cámara climática. Para la caracterización térmica se realizó un montaje con un taco de resistencias eléctricas y una sonda de temperatura entre la resistencia y el intercambiador. Se aisló el montaje y se colocó otra sonda midiendo la temperatura ambiente de la cámara climática. Gracias a una fuente de alimentación se hicieron pasar varios flujos de calor conocidos a través de la resistencia eléctrica, y se midieron las temperaturas alcanzadas una vez estabilizado el sistema. La resistencia térmica (R_{th}) de cada intercambiador se calculó mediante la Ecuación 1.

$$R_{th} = (T_c - T_{amb}) / \dot{Q} \quad (1)$$

Donde T_c es la temperatura de la cara interior del intercambiador ($^{\circ}C$), T_{amb} la del ambiente ($^{\circ}C$), y \dot{Q} el flujo de calor de la fuente de alimentación (W).

Tras el primer ensayo de caracterización, se cortaron las aletas de los disipadores, de modo que se pudo comprobar la influencia sobre la resistencia térmica de estas aletas para poder determinar si realmente compensa ponerlas, teniendo en cuenta que eso conlleva un mayor peso, tamaño, precio y dificultad de construcción pensando en una instalación de generadores termoeléctricos a gran escala.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterización en laboratorio

En la Figura 3 se pueden ver los resultados de la caracterización térmica correspondiente a los intercambiadores tanto en el ensayo antes de cortar las aletas (Ensayo 1) como después (Ensayo 2). En primer lugar, se observa la disminución en la resistencia térmica conforme aumenta el flujo de calor en todos los intercambiadores, característica de los intercambiadores de cambio de fase debido a la mejora de sus coeficientes con la temperatura. Además, la resistencia térmica claramente va disminuyendo cuando los heat pipes son más largos debido al aumento en el área de intercambio de calor. Si se compara el ensayo con disipador de aletas respecto al de aletas cortadas, se observa un aumento del 9 % en la resistencia térmica en el intercambiador con los heat pipes más cortos (350 mm), un aumento del 5 % en el de 400 mm y del 8 % en el de 450 mm. Cuando los heat pipes son más cortos, es mayor la influencia que tiene el disipador que en el resto de los casos, ya que cuando mejoramos el intercambio de calor por los heat pipes, el disipador se vuelve menos relevante.

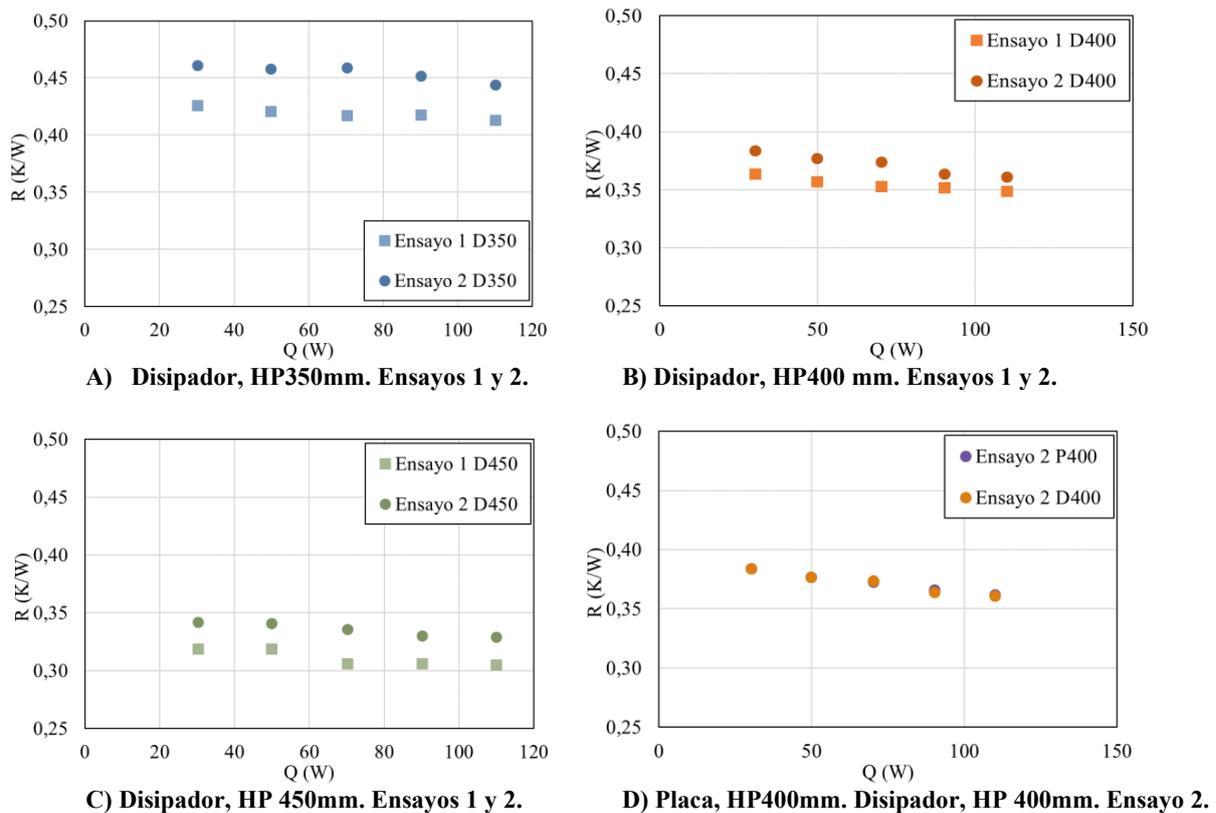


Figura 3. Resultados de la caracterización térmica.

La Figura 3. D compara la resistencia térmica del intercambiador construido directamente con los heat pipes insertados en la placa de aluminio con el de disipador, una vez cortadas las aletas, de modo que se pudo comprobar que no había incertidumbres en la construcción, ya que se observa que la resistencia térmica es idéntica en todos los flujos de calor.

El caso en el que se da la resistencia térmica más baja, como era de esperar, es el que presenta heat pipes más largos y disipador de aletas. Sin embargo, es una mejora media del 12% respecto del de 400 mm con aletas y del 10% sin aletas.

4.2. Simulación de potencia generada

Para determinar cómo afecta la resistencia térmica del lado frío a la potencia total generada por un generador termoeléctrico para geotermia, se simuló mediante un modelo computacional desarrollado basado en el método de las diferencias finitas [5], un generador con 8 módulos termoeléctricos en condiciones de funcionamiento en campo. El resultado de dicha simulación se puede ver en la Tabla 1, con la potencia generada total y por módulo. Aquí, se puede determinar que la influencia que tiene la longitud de los heat pipes sobre la potencia que se consigue generar, que es el dato más relevante para este estudio, es considerable, ya que dicha potencia aumenta hasta un 10%. Sin embargo, el hecho de que el intercambiador

lleve o no un disipador de aletas integrado no afecta tan significativamente a la potencia generada, ya que los aumentos conseguidos para cada longitud de intercambiador son mínimos, siendo del 3% el mayor, en el caso de heat pipes más cortos. Este resultado es coherente con los resultados de las resistencias térmicas obtenidas.

El aumento de la potencia total generada con placa y heat pipes de 450 mm respecto de 400 mm es del 3,1%, que no supone una mejora significativa que justifique aumentar el impacto visual, el precio y la dificultad de construcción, por lo que para una instalación a gran escala convendría utilizar el intercambiador sin disipador de aletas y con heat pipes de 400 mm de longitud, mientras que para una instalación donde únicamente se busque maximizar la potencia generada, la mejor opción sería con disipador y heat pipes de 450 mm.

Configuración intercambiador		Potencia GTEG(W)	Potencia pormódulo (W)
Disipador	HP 350 mm	29,11	3,64
	HP 400 mm	30,75	3,84
	HP 450 mm	31,93	3,99
Placa	HP 350 mm	28,21	3,53
	HP 400 mm	30,31	3,79
	HP 450 mm	31,26	3,91

Tabla 1. Resultados de la simulación de potencia generada.

4.3. Caracterización en campo

En la cámara climática se tenía una velocidad de viento constante e igual a 3,6 km/h. Dados los bajos valores de resistencia térmica, se quiso dar el salto del laboratorio a experimentar en campo para determinar la resistencia térmica del intercambiador más eficiente en función de la velocidad del viento. Se construyó un generador termoeléctrico para geotermia completo, incluyendo como intercambiador del lado frío el de disipador con heat pipes de 450 mm. Los resultados en campo se pueden ver en la Figura 4, donde se representa el valor de la resistencia térmica de dicho intercambiador respecto de la velocidad del viento.

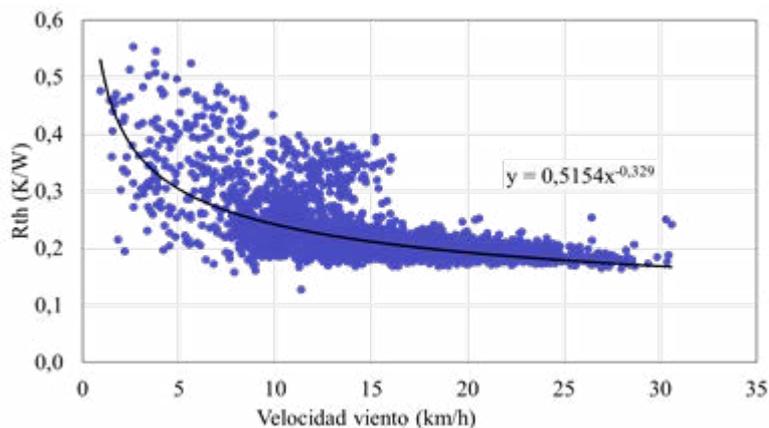


Figura 4. Resistencia térmica en campo en función de la velocidad del viento.

Se ve una clara tendencia de esta resistencia térmica de forma exponencial decreciente, con un valor mínimo de resistencia térmica de 0,18 K/W cuando la velocidad del viento es de 30 km/h. El intercambiador de calor desarrollado es muy eficiente y aprovecha correctamente las condiciones de convección forzada de forma natural presentes en la zona donde fue instalado.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se han comparado diferentes intercambiadores de calor desarrollados para ser ensamblados en el lado frío de generadores termoeléctricos para geotermia. Dado que los campos geotérmicos suelen estar en zonas protegidas o de elevado valor ambiental, se ha dado importancia al respeto al medio ambiente, utilizando intercambiadores de calor pasivos, con agua como fluido de trabajo de manera que fueran inocuos, y teniendo en cuenta que deben ser lo más compactos posible, siempre que tengan una resistencia térmica aceptable.

Se han desarrollado y caracterizado térmicamente seis configuraciones de intercambiador bifásicos con agua como fluido de trabajo con diferente longitud de heat pipes, con y sin dissipador de aletas. Se han obtenido sus resistencias térmicas y posteriormente se ha realizado una simulación computacional para determinar cómo afectan estas resistencias a la potencia que es capaz de generar el dispositivo completo. En dicho estudio se ha determinado que el hecho de incluir o no un dissipador de aletas no afecta prácticamente a la potencia generada, ya que se consigue aumentar menos de un 3%. Sin embargo, la longitud de heat pipes sí es notable en generación, consiguiendo aumentos en potencia de hasta el 10% con 450 mm frente a 350 mm. Además, se caracterizaron térmicamente los intercambiadores de mayor eficiencia en campo para comprobar su funcionamiento en presencia de vientos variables, observando el buen aprovechamiento de la convección forzada, dado que se consiguió reducir su resistencia térmica.

En conclusión, se han desarrollado intercambiadores de calor pasivos bifásicos que son idóneos para un generador termoeléctrico para geotermia ya que evitan consumos auxiliares a la vez que son respetuosos con el medio ambiente. Para evitar el impacto visual se debe primar la compactidad, por lo que la configuración más adecuada sería un intercambiador sin dissipador de aletas y con heat pipes de 400 mm de longitud. Sin embargo, si se prima únicamente la maximización de la potencia generada, sería más adecuada la utilización de un intercambiador con dissipador de aletas y heat pipes de 450 mm, pues es la configuración que menor resistencia térmica presenta.

REFERENCIAS

- [1] K. Li, H. Bian, C. Liu, D. Zhang, Y. Yang, Comparison of geothermal with solar and wind power generation systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 42 (2015) 1464–1474, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.049>.
- [2] L.Catalan, P.Aranguren, M.Araiz, G.Perez, D.Astrain, New opportunities for electricity generation in shallow hot dry rock fields: A study of thermoelectric generators with different heat exchangers, *Energy Conversion and Management* 200 (2019) 112061, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112061>.
- [3] D. Astrain, J.G. Vián, A. Martínez, A. Rodríguez, Study of the influence of heat exchangers' thermal resistances on a thermoelectric generation system, *Energy* 35 (2010) 602–610, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.10.031>.
- [4] A. Casi, M. Araiz, L. Catalán, D. Astrain, Thermoelectric heat recovery in a real industry: From laboratory optimization to reality, *Appl. Therm. Eng.* (2020) <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116275>.
- [5] L.Catalan, M.Araiz, P.Aranguren, D.Astrain, Computational study of geothermal thermoelectric generators with phase change heat exchangers, *Energy Conversion and Management* 221 (2020) <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113120>.