

AVANCES EN LA MODELIZACIÓN DEL TRANSPORTE TÉRMICO Y ELÉCTRICO DE GENERADORES TERMOELÉCTRICOS LONGITUDINALES

MASSAGUER COLOMER, Eduard⁽¹⁾; MASSAGUERCOLOMER, Albert⁽¹⁾

VELAYOS SOLÉ, Joaquim⁽¹⁾; DETELL CARBONELL, Alexandre⁽¹⁾; MONTORO MORENO, Lino⁽¹⁾

eduard.massaguer@udg.edu

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

RESUMEN

Un sistema de recolección de energía termoeléctrica se aprovecha de cualquier diferencia de temperatura entre las superficies interior y exterior para producir electricidad por el efecto Seebeck. A menudo se utilizan como sistemas de recuperación de calor residual de los gases de escape en los motores de combustión interna. Para aumentar la potencia de salida, recolectores de energía a menudo están compuestos de varias matrices de TEG eléctricamente dispuestos en configuración serie-paralelo. La forma en que TEG están conectados fuertemente afecta a las salidas electrotérmicos de cada TEG y toda la cosechadora también. Aunque muchos modelos TE coexisten en la literatura, no existe un modelo colector de energía termoeléctrica en cuenta este efecto. Por lo tanto, el propósito de este trabajo es mejorar la precisión de los modelos longitudinales colector de energía termoeléctrica (LTEH) introduciendo la predicción de los efectos de interconexión. La comparación de los resultados entre los datos teóricos y experimentales muestra una gran precisión y la posibilidad de ser utilizados como una herramienta de simulación.

Palabras clave: Recuperador termoeléctrico, LTEH, modelo computacional.

1. Introducción

Los dispositivos termoeléctricos han ganado importancia en los últimos años como soluciones viables para aplicaciones tales como enfriamiento localizado de componentes electrónicos, la generación de energía a distancia en las estaciones espaciales y satélites, etc. Estos dispositivos de estado sólido durante mucho tiempo han sido conocidos por su fiabilidad en lugar de su eficiencia; no contienen partes móviles, no generan ruido y su rendimiento se basa principalmente en la correcta selección de materiales en función de la temperatura de trabajo.

Como consecuencia, multitud de estudios aplicados a la recuperación energética mediante el efecto termoeléctrico se han llevado a cabo: recuperación de calor residual en los sistemas de escape de automóviles [1-4], la alimentación de dispositivos electrónicos en tuberías de gas [5], el aprovechamiento de la energía calorífica de motores de vehículos de gasolina [6,7], condensadores en sistemas térmicos [8], hornos siderúrgicos [9], incineradoras de desechos [10], sistemas de cogeneración [11,12] entre muchos otros.

La investigación en los últimos años se ha centrado en el desarrollo de estructuras y materiales que tienen una alta eficiencia termoeléctrica. En general, la investigación termoeléctrica se ha desarrollado a través de experimentos que se centran en la búsqueda de nuevos materiales y estructuras con un rendimiento mejorado y modelos analíticos que predicen el comportamiento termoeléctrico para permitir un mejor diseño y optimización de materiales y estructuras. Si bien numerosos estudios han discutido la importancia y la dependencia de los materiales en la mejora de las prestaciones termoeléctricas, una visión general de cómo predecir el desempeño de los diversos materiales y estructuras es aún deficitario.

Basados en el efecto Seebeck, los recuperadores de calor termoeléctricos se componen de múltiples módulos termoeléctricos que pueden producir energía eléctrica a partir de cualquier fuente térmica. Cuando la fuente de calor proviene de un flujo de líquido o gas, la topología más utilizada es la longitudinal LTEH (longitudinal thermo electric energy harvester) [13], en el que los módulos de TEG se colocan a lo largo de la trayectoria del flujo de energía con el fin de convertir la mayor cantidad de energía térmica en energía eléctrica.

A partir de el modelo desarrollado en [14], el objetivo de este trabajo es el desarrollo de un nuevo y mejorado modelo computacional capaz de simular la dinámica electro-térmica de un colector de energía termoeléctrica longitudinal compuesto por un conjunto de módulos TEG (thermo electric generator) interconectados, que, al mismo tiempo, se puede disponer térmica y eléctricamente en diferentes configuraciones serie-paralelo. Teniendo en cuenta que la interconexión de TEG puede producir una caída de la producción de energía de 12% cuando las etapas termoeléctricas están sujetas a diferentes temperaturas [15,16] y que en situaciones prácticas los TEGs se conectan en configuración serie-paralelo, la implementación de estos efectos en un nuevo modelo es obligatorio.

El nuevo modelo incorpora dentro del reciente modelo LTEH desarrollado en la Ref. [17] los efectos de la interconexión eléctrica que ocurren en los sistemas LTEH reales. Finalmente, el modelo se ha analizado y validado con los datos obtenidos a partir de un test experimental.

2. Modelo LTEH

Generalmente, un LTEH es un dispositivo compuesto de muchos TEGs colocados en la dirección del flujo de fluido y que convierte el calor residual de un elemento (es decir, líquido o gas) en electricidad a través del efecto Seebeck. Aunque los LTEHs se pueden diseñar de muchas maneras diferentes, por lo general se componen de las mismas partes básicas: un intercambiador de calor del lado caliente utilizado para capturar e incrementar la extracción de calor de la fuente de calor a los módulos TEG, un intercambiador de calor del lado frío para evacuar y transferir el exceso de calor de el lado exterior de los módulos TEG al aire ambiente, múltiples módulos termoeléctricos que

convierten el calor residual en energía eléctrica útil y un elemento de soporte que une las partes antes mencionadas y comprime los TEGs.

2.1. Descripción del modelo

La Fig. 1 muestra el esquema básico del modelo presentado en este trabajo y que permite la simulación de un LTEH. Se compone de varias etapas ns y filas np . El modelo también permite establecer varios números de capas internas con el fin de adaptar el modelo a la configuración real.

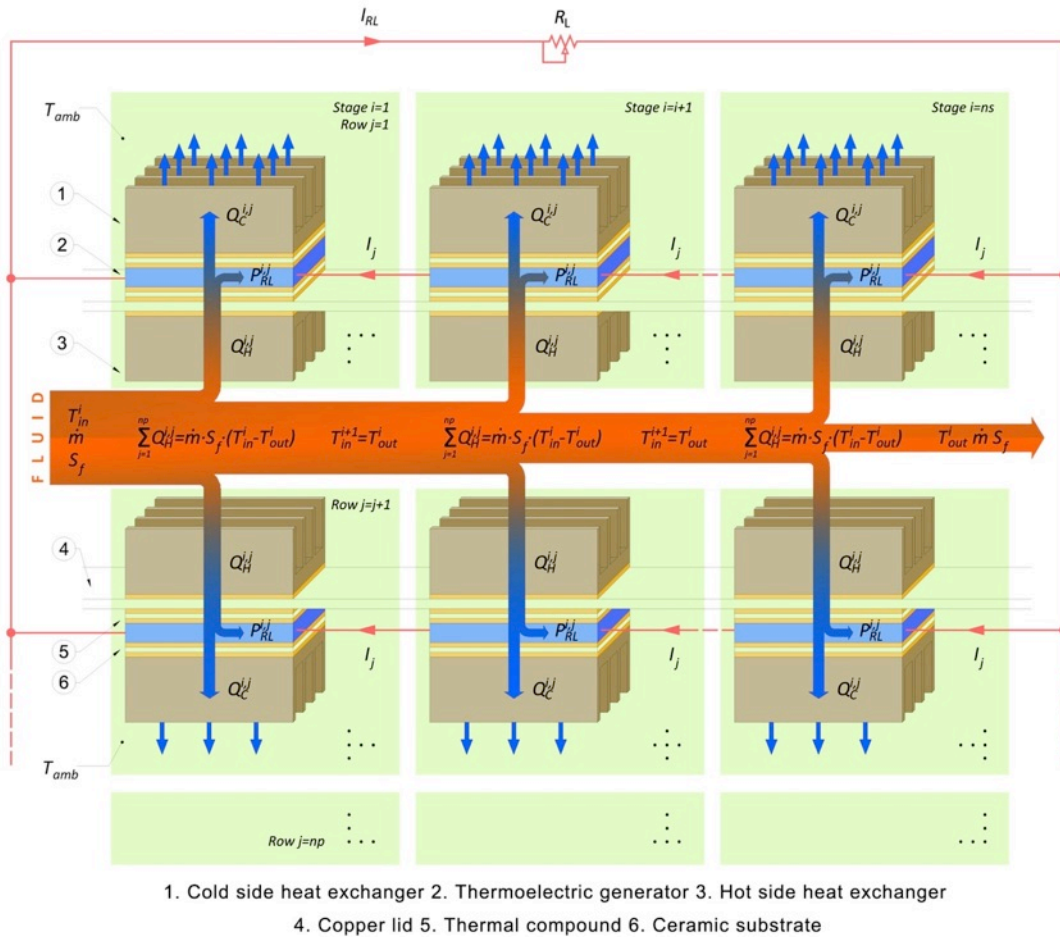


Figura 1. Modelo computacional de un LTEH.

La configuración seleccionada para validar el nuevo modelo se compone de tres etapas y dos filas de TEGs por etapa. Los módulos termoeléctricos se intercalan entre el lado caliente y los disipadores de calor del lado frío. Con el fin de aislar eléctricamente los módulos, se aplica un sustrato cerámico hecho de alúmina (Al_2O_3) en ambos lados del TEG. Además, un compuesto térmico aumenta la conductividad térmica de las interfaces rellenando los huecos microscópicos entre el sustrato cerámico y el intercambiadores de calor, y también entre TEG y el sustrato de cerámico.

El presente modelo, basado en los modelos [14,17], tiene en cuenta la extracción de calor del fluido debido a la generación termoeléctrica, resultando en una reducción de la temperatura y del calor del fluido en cada etapa: $T_{in}^i > T_{in}^{i+1}$ y $P_{RL}^{i,j} > P_{RL}^{i+1,j}$, respectivamente.

Sin embargo, como se ha explicado anteriormente, susodichos modelos no toman en cuenta los efectos de interconexión de la matriz de TEG. Es importante tener en cuenta que cuando los TEGs de una misma rama trabajan a diferente temperatura, se produce una reducción significativamente de el rendimiento esperado de cada TEG [15] y, en consecuencia, una pérdida significativa de exactitud del

modelo. Por lo tanto, el efecto de la interconexión se ha incluido en el nuevo modelo presentado en este documento.

2.2. Modelización

La configuración eléctrica utilizada para llevar a cabo la validación del modelo también se muestra en la Fig. 1. Como puede verse, todos los TEGs están interconectados formando una matriz eléctrica de seis módulos dispuestos en dos filas paralelas, cada una conteniendo tres TEGs en serie. Aunque hay varias maneras de interconectar TEGs, la opción elegida nos permite evaluar el modelo en una combinación serie-paralelo y con una distribución equilibrada de la corriente y el voltaje a través de las ramas.

El modelo de base [17] trata y resuelve cada etapa independientemente de los otros porque considera resistencias independientes conectadas entre TEGs. Sin embargo, cuando los TEGs están interconectados, tanto la transferencia de calor como las ecuaciones eléctricas son dependientes. Es importante tener en cuenta que la corriente que fluye a través I_j una rama j es el mismo que fluye a través de cada TEG en la misma rama, a pesar de que no están funcionando a la misma diferencia de temperatura: $T_{in}^i > T_{in}^{i+1}$. En consecuencia, el sistema de ecuaciones de transferencia de calor y ecuaciones eléctricas debe ser resuelto simultáneamente en cada intervalo de tiempo.

Usando la notación eléctrica, cada TEG puede ser representado como una fuente de tensión y una resistencia eléctrica. La Fig. 2 muestra la red eléctrica modelada, que consta de dos ramas paralelas de tres fuentes de tensión $V_{OC}^{i,j}$ y tres resistencias $R_{pn}^{i,j}$ en serie. A fin de obtener los valores de salida, una resistencia variable R_L se carga al LTEH.

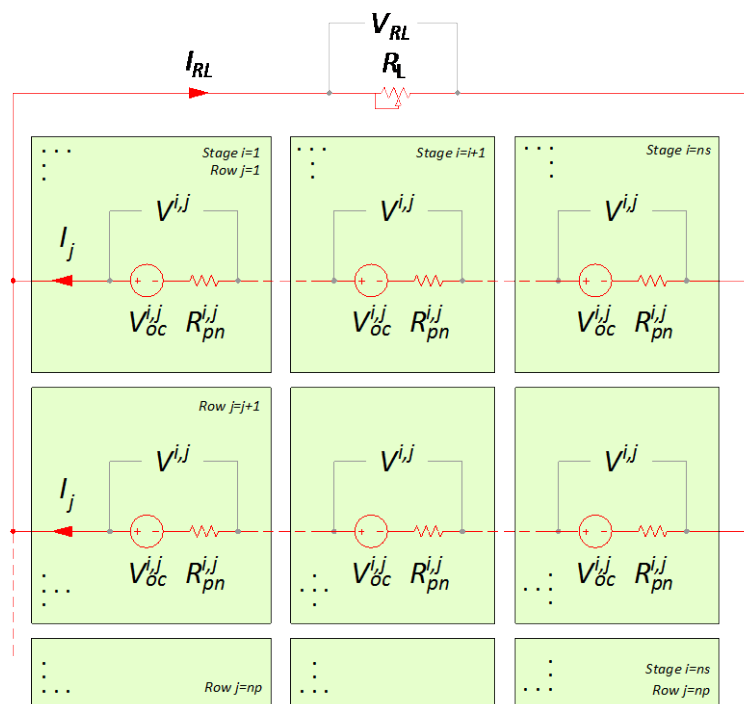


Figura 2. Esquema eléctrico del LTEH.

Las leyes de Kirchhoff gobiernan los parámetros eléctricos del circuito eléctrico. Estas leyes se basan en la conservación de la energía mediante la cual la tensión se define como la energía por unidad de carga. La cantidad total de energía obtenida por unidad de carga debe ser igual a la cantidad de energía perdida por unidad de carga, ya que tanto la energía como la carga se conservan.

El modelado del circuito eléctrico sigue la segunda ley de Kirchhoff, en la que la suma algebraica de los productos de las resistencias de los conductores y las corrientes en una misma malla j es igual a la tensión total disponible en ese bucle.

$$\gamma_j (R_{pn}^j(t) + R_L) - \gamma_{j+1} (R_{pn}^{j+1}(t)) = V_{OC}^j(t) \quad \text{paraj}=1 \quad (1)$$

$$\gamma_j (R_{pn}^j(t) + R_{pn}^{j-1}(t)) - \gamma_{j-1} (R_{pn}^{j-1}(t)) = V_{OC}^j(t) - V_{OC}^{j-1}(t) \quad \text{paraj}=2, \dots, np \quad (2)$$

donde γ_j es la corriente de Kirchoff en la malla j y R_{pn}^j y V_{OC}^j son el sumatorio de resistencias y de voltajes en circuito abierto de los TEGs situados en la misma rama j , respectivamente. Donde R_{pn}^j y V_{OC}^j son:

$$V_{OC}^j = \sum_{i=1}^{ns} (V_{OC}^{i,j}(t)) \quad \text{paraj}=1, \dots, np \quad (3)$$

$$R_{pn}^j = \sum_{i=1}^{ns} (R_{pn}^{i,j}(t)) \quad \text{paraj}=1, \dots, np \quad (4)$$

Una vez las corrientes γ_j se han obtenido, los valores de intensidad de cada rama I_j se calculan de la siguiente manera:

$$I_{RL} = \gamma_j \quad \text{paraj}=1 \quad (5)$$

$$I_j = \gamma_j - \gamma_{j+1} \quad \text{paraj}=1, \dots, np-1 \quad (6)$$

$$I_j = \gamma_j \quad \text{paraj}=np \quad (7)$$

Con el fin de obtener el modelo completo, las ecuaciones eléctricas anteriores se han unido a las de transferencia de calor, explicadas en la Ref. [17]. Teniendo en cuenta las pérdidas de calor debido efecto termoelectrico, el calor extraído de fluido en cada etapa se puede encontrar utilizando la ecuación siguiente:

$$T_{out}^i(t) = T_{in}^i(t) - \left(\frac{\sum_{j=1}^{np} Q_H^{i,j}(t)}{m \cdot S_f} \right) \quad (8)$$

donde m es el caudal masico y S_f el calor específico del fluido, ambos considerados independientes de la temperatura. La calor total extraída del fluido a cada etapa se calcula como:

$$\sum_{j=1}^{np} Q_H^{i,j}(t) = \sum_{j=1}^{np} \alpha_{pn} T_{pn,h}^{i,j} I_j + K_{pn} (T_{pn,h}^{i,j} - T_{pn,c}^{i,j}) - \frac{1}{2} I_j^2 R_{pn}^{i,j} = \sum_{j=1}^{np} h_{hh}^{i,j} A_{hh}^{i,j} (T_{AVG}^i - T_{hh}^{i,j}) \quad (9)$$

donde α_{pn} y K_{pn} son el coeficiente Seebeck y la conductancia térmica del generador termoelectrico, $T_{pn,h}^{i,j}$ y $T_{pn,c}^{i,j}$ son la temperaturas de lado caliente y frío del TEG y $h_{hh}^{i,j}$ and $A_{hh}^{i,j}$ son el coeficiente de convección y el area de intercambio, respectivamente. I_j es el corriente electric que circula a través de los TEGs situados en la rama j . T_{AVG}^i es la temperatura media del fluido en el intercambiador de calor de lado caliente y se utiliza para resolver la distribución de temperatura en cada etapa i .

$$T_{AVG}^i(t) = \frac{T_{in}^i(t) + T_{out}^i(t)}{2} \quad (10)$$

donde T_{in}^i y T_{out}^i son las temperaturas de entrada y salida del fluido en la etapa i , respectivamente. Nótese que T_{AVG}^i es igual para todas la filas j de una misma etapa i .

Por último, la continuidad de temperatura entre etapas debe ser introducida; por lo tanto, la temperatura del fluido de entrada de la siguiente etapa T_{in}^{i+1} será la temperature de salida de la etapa anterior T_{out}^i .

$$T_{in}^{i+1}(t) = T_{out}^i(t) \quad (11)$$

A diferencia de modelo de base [17], que consiste en un bucle iterativo que ejecuta el modelo [14] hasta que T_{AVG}^i converge de forma independiente para cada etapa, el nuevo modelo resuelve simultáneamente el sistema de ecuaciones formadas por todas las ecuaciones anteriores a cada intervalo de tiempo. Esta es la única manera de hacerlo porque todas las variables contenidas en el sistema modelado son recíprocamente dependientes. Esto significa que todos T_{AVG}^i , uno para cada etapa i , tienen que converger al mismo tiempo con el fin de obtener una solución exacta para cada intervalo de tiempo. Se logrará la convergencia cuando

$$|T_{AVG_{k-1}}^i - T_{AVG_k}^i| \& |T_{AVG_{k-1}}^{i+1} - T_{AVG_k}^{i+1}| \dots \& \dots |T_{AVG_{k-1}}^{np} - T_{AVG_k}^{np}| < \varepsilon \quad (12)$$

donde k es el número de iteración y ε es el valor de tolerancia establecido para $1 \times 10^{-4}^\circ\text{C}$. Debe tenerse en cuenta que la ecuación (12) es estrictamente necesaria para obtener una distribución precisa de la temperatura y, en consecuencia, las salidas eléctricas en cada módulo. Una vez que se alcanza la convergencia, todas las salidas térmicas y eléctricas pueden ser extraídas.

El modelo computacional se describe en la Fig. 3. El cuadro de ecuaciones de transferencia de calor contiene las ecuaciones de calor del modelo unidimensional TEG, explicado en [14] y [17]. La siguiente casilla contiene las ecuaciones eléctricas, (1), (2), (3), (4), (5), (6) y (7). El cuadro de ecuaciones de continuidad representan las ecuaciones (8), (9), (10) y (11). Finalmente, los valores de *error* y *tol* son el valor absoluto máximo de la salida de error extraída del método de NR y la tolerancia impuesta en el punto de partida de 1×10^{-4} , respectivamente.

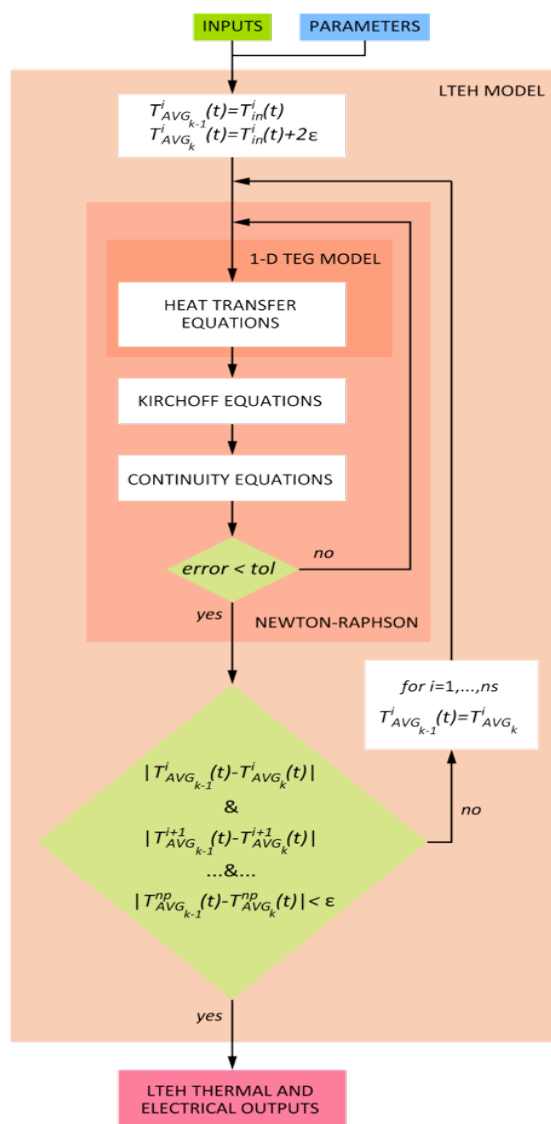


Figure 3. Diagrama de bloques del modelo LTEH.

2.3. Consideraciones

Debido al hecho de que este nuevo modelo se basa en el modelo presentado en [17], los mismos supuestos han sido heredados: se suponen condiciones de contorno adiabáticos en las superficies exteriores de elemento TEG; la conductividad térmica, la resistividad eléctrica y las capacidades caloríficas específicas de los materiales no termoeléctricos se suponen constantes dentro del rango de temperatura de funcionamiento; la fuga de calor a través capa de soldadura y las tiras conductoras se omiten y, finalmente, también se omiten las pérdidas de calor debido a la radiación y la convección transversal a través del área restante y las paredes laterales.

Por otro lado, los parámetros termoeléctricos se han considerado dependientes de la temperatura con el fin de mejorar la precisión del nuevo modelo. Los valores del coeficiente Seebeck α , resistividad eléctrica σ y la conductividad térmica λ pueden expresarse matemáticamente mediante ecuaciones polinómicas. Estas ecuaciones, que se muestran en la Tabla 1. Todos los coeficientes se extraen de hoja de datos del fabricante y pueden calcularse como en función de la temperatura media entre el lado caliente y frío de cada TEG, $T = (T_{pn,h}^{i,j} + T_{pn,c}^{i,j})/2$.

Tabla 1. Parámetros termoeléctricos.

Parámetro	Valor	Unidad	Fuente
α_n	$-394.05 + 3.08T - 1.26e^{-2}T^2 + 2.07e^{-5}T^3 - 1.15e^{-8}T^4$	$\mu\text{V/K}$	Fabricante
α_p	$143.29 - 1.62T + 9.91e^{-3}T^2 - 1.81e^{-5}T^3 + 1.01e^{-8}T^4$	$\mu\text{V/K}$	Fabricante
λ_n	$14.2 - 0.10T + 3.14e^{-4}T^2 - 4.23e^{-7}T^3 + 2.15e^{-10}T^4$	W/mK	Fabricante
λ_p	$-65.8 + 0.64T - 2.20e^{-3}T^2 + 3.26e^{-6}T^3 - 1.74e^{-9}T^4$	W/mK	Fabricante
σ_n	$-1.01e^{-5} + 5.63e^{-8}T - 9.78e^{-11}T^2 + 2.88e^{-13}T^3 - 1.65e^{-16}T^4$	Ωm	Fabricante
σ_p	$-6.26e^{-5} + 4.40e^{-7}T - 9.68e^{-10}T^2 + 1.12e^{-12}T^3 - 5.40e^{-16}T^4$	Ωm	Fabricante

3. Experimento

La Fig. 4 muestra el esquema del experimento. Está formado por un sistema de agua de bucle cerrado que suministra agua caliente a diferentes temperaturas. La fuente de calor es un acumulador eléctrico que puede producir agua caliente hasta 80 ° C. Una bomba de recirculación de agua caliente se mueve a través del bucle, recoge el calor en el acumulador y la intercambia a través del sistema LTEH. La plataforma experimental nos ha permitido obtener datos reales aptos para ser comparados con los resultados de simulación mediante el establecimiento de transitorios térmicos y eléctricos de diferentes magnitudes. La configuración y las propiedades de los materiales utilizados en el equipo experimental son el mismo utilizado en las simulaciones.

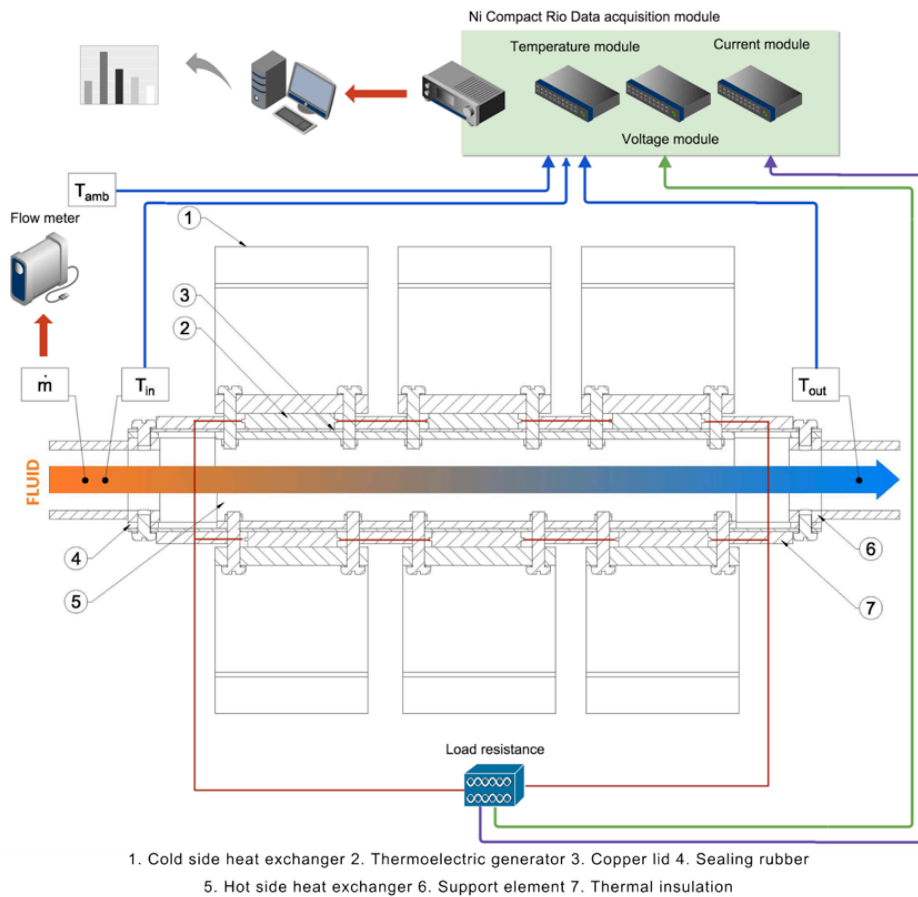


Figura 4. Sección transversal del LTEH experimental con los módulos de adquisición de datos.

Con el fin de validar el modelo en virtud de la dinámica térmica y eléctrica, se establecieron tres pasos de temperatura de 50 °C, 65 °C y 80 °C. La temperatura ambiente era de 29 °C mientras que la tasa de flujo de masa del fluido \dot{m} era de 54 kg / h. En el primer paso, el acumulador eléctrico se encendió y la bomba empezó a mover fluido a través del circuito de agua. Cuando la temperatura alcanzó 50 °C, T_{in} se mantuvo mientras que la resistencia de carga cambió progresivamente de circuito abierto a 100 Ω . El mismo proceso se repitió para dos temperaturas de entrada adicionales de 65 °C y 80 °C.

Para obtener los datos necesarios para la validación del modelo, se utilizó un equipo de adquisición de datos National Instruments Compact Rio compuesto de sensores de temperatura, voltaje y intensidad. Por un lado, las temperaturas T_{amb} , T_{in} y T_{out} se midieron mediante tres sensores de temperatura colocados, como se muestra en la Fig. 4, en el exterior, entrada y salida del sistema LTEH. Por otra parte, se midieron las tensiones $V^{l,j}$ y V_{RL} y las corrientes I_j y I_{RL} . Además, se utilizó un medidor de flujo ultrasónico para medir el caudal másico del fluido.

Finalmente, las propiedades de los materiales utilizados en el experimento se tabulan en la Tabla 1. Los parámetros se determinaron ya sea de acuerdo con la medición directa, a partir de datos del fabricante o de la literatura existente.

Tabla 2. Propiedades de los materiales.

Parametro	Valor	Unidad	Fuente	Parametro	Valor	Unidad	Fuente
T_{amb}	29	°C	Medido	A_{cl}	8.41×10^{-4}	m ²	Medido
np	2	-	Experimento	A_{ch}	8.41×10^{-4}	m ²	Medido
ns	3	-	Experimento	λ_{tg1}	2.5	W/mK	Fabricante
m	54	kg/h	Medido	λ_{ce}	36	W/mK	[17]
S_f	4180	J/kgK	Estimado	λ_{tg2}	2.5	W/mK	Fabricante
ρ_n	7700	kg/m ³	[17]	λ_{cl}	380	W/mK	Estimado
ρ_p	7700	kg/m ³	[17]	λ_{tg3}	2.5	W/mK	Estimado
e_n	2.54×10^{-3}	m	Fabricante	ρ_{hh}	2700	kg/m ³	Estimado
e_p	2.54×10^{-3}	m	Fabricante	ρ_{tg1}	2040	kg/m ³	Fabricante
A_n	2.3×10^{-6}	m ²	Fabricante	ρ_{ce}	3975	kg/m ³	[17]
A_p	2.3×10^{-6}	m ²	Fabricante	ρ_{tg2}	2040	kg/m ³	Fabricante
S_n	200	J/kgK	[17]	ρ_{cl}	8930	kg/m ³	Estimado
S_p	200	J/kgK	[17]	ρ_{tg3}	2040	kg/m ³	Fabricante
N	98	-	Fabricante	ρ_{ch}	2700	kg/m ³	Estimado
e_{tg1}	1×10^{-4}	m	Medido	S_{hp}	883	J/kgK	Estimado
e_{cl}	2×10^{-3}	m	Medido	S_{tg1}	200	J/kgK	Fabricante
e_{tg2}	1×10^{-4}	m	Medido	S_{ce}	765	J/kgK	[17]
e_{ce}	2.54×10^{-4}	m	Medido	S_{tg2}	200	J/kgK	Fabricante
e_{tg3}	1×10^{-4}	m	Medido	S_{cl}	385	J/kgK	Estimado
A_{hh}	1.5×10^{-3}	m ²	Medido	S_{tg3}	200	J/kgK	Fabricante
A_{tg1}	8.41×10^{-4}	m ²	Medido	S_{ch}	883	J/kgK	Estimado
A_{ce}	8.41×10^{-4}	m ²	Medido	h_{ch}	200	W/m ² K	Fabricante
A_{tg2}	8.41×10^{-4}	m ²	Medido	h_{hh}	5000	W/m ² K	Estimado

4. Resultados y discusión

Con base en las pruebas experimentales y las simulaciones de Matlab, los resultados y la discusión sobre su comparación se presentan en esta sección. Con el fin de comprobar si el modelo se comporta adecuadamente y de acuerdo con el equipo experimental, ambos valores se representan gráficamente en la misma gráfica.

La variación del rendimiento con resistencia de carga se muestra en la Fig. 5. Se seleccionan tres condiciones diferentes de temperatura correspondientes a los pasos de temperatura descritos en la sección anterior. El sistema ha sido llevado a las mismas temperaturas de estado estable de [17].

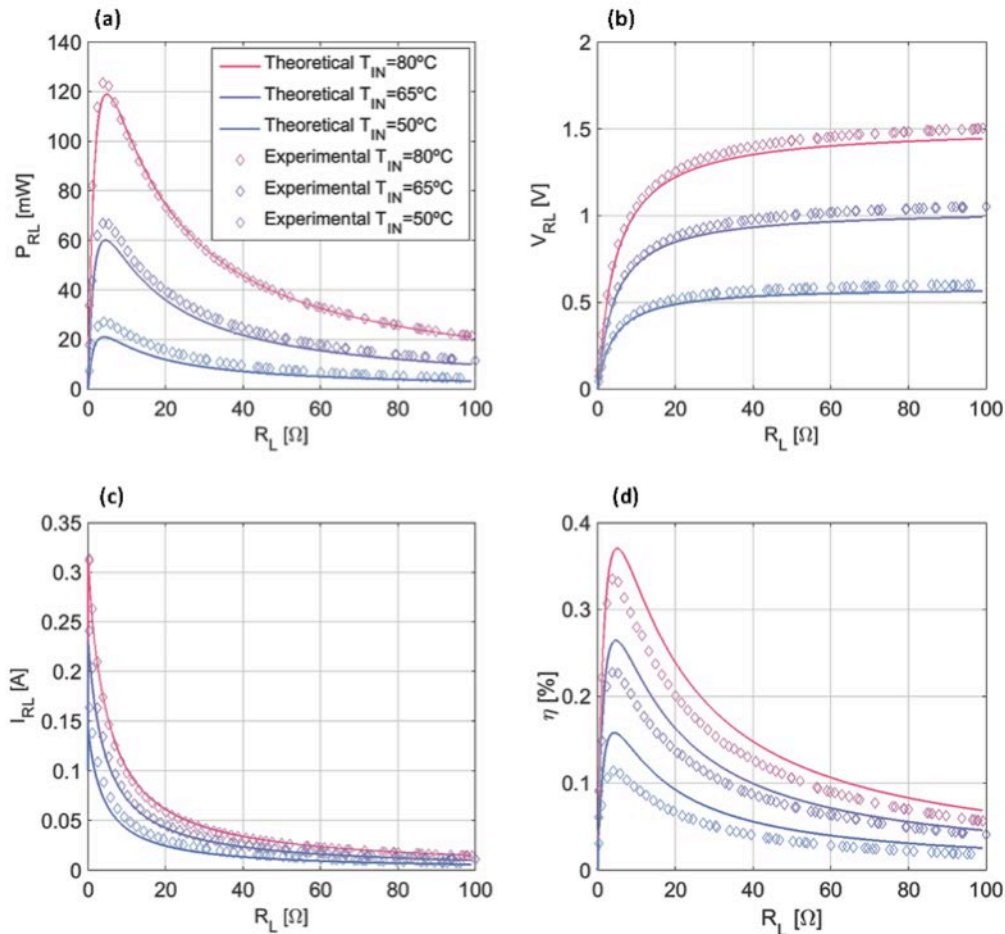


Figura 5. Correlación de comportamientos experimentales y simulados del LTEH a diferentes resistencias de carga y temperaturas. (a) de potencia de salida eléctrica, (b) la tensión de circuito cerrado, (c) Corriente de carga y (d) Eficiencia.

Como se puede apreciar en la Fig. 5, los resultados de la simulación muestran una buena concordancia con los resultados experimentales y un seguimiento preciso de los efectos acoplados electro-térmicos que ocurren en el LTEH. La salida eléctrica está estrechamente vinculada al comportamiento térmico y al valor de resistencia de carga. La resistencia de carga eléctrica que produce la potencia eléctrica máxima varía con el flujo de calor suministrado. La potencia generada aumenta hasta un valor máximo, pero luego disminuye para alcanzar un estado de equilibrio. Las resistencias eléctricas en los puntos máximos de potencia son 4,80 Ω (119 mW), 4,50 Ω (60.1mW) y 4,10 Ω (20.9mW) para las temperaturas de 80 °C, 65 °C y 50 °C, respectivamente.

5. Conclusiones

Este trabajo proporciona un nuevo modelo de LTEH que tiene en cuenta la pérdida de potencia que se produce cuando la matriz TEG está interconectado en configuración serie-paralelo y a la vez está sometida a un desequilibrio de temperatura por etapa. El modelo presentado es capaz de hacer frente a las dinámicas térmicas y eléctricas. Los resultados de la simulación del modelo matemático se han verificado con los datos experimentales y demuestran su consistencia. Por lo tanto, este nuevo modelo se puede utilizar en el diseño y la optimización de recuperadores termoeléctricos.

Una comparación entre un LTEH con resistencias independientes cargadas a cada TEG y entre un LTEH formado por una matriz de TEGs cargada a una resistencia de carga única, muestra que este

efecto tiene un impacto importante sobre el rendimiento de un LTEH. No tener en cuenta los efectos de interconexión y desajuste temperatura conducen a una sobreestimación de la producción de potencia total en grandes LTEHs.

Bajo diseñados condiciones de trabajo, una potencia máxima de 119 mW se generó y la máxima eficiencia fue de 0,37%. Los errores RMSE en cuanto a energía eléctrica generada y la eficiencia del sistema son 0,91 mW y $3.9 \times 10^{-5}\%$, respectivamente. Además, los errores NRMSE son 0,75% y 0,52%, respectivamente.

6. 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. A los autores les gustaría agradecer a la Asociación de Ingenieros Industriales de Catalunya (AEIC) por su financiación parcial.

7. Referencias

- [1] N.D. Love, J.P. Szybist, C.S. Sluder, Effect of heat exchanger material and fouling on thermoelectric exhaust heat recovery, *Appl. Energy*. 89 (2012) 322–328. doi:10.1016/j.apenergy.2011.07.042.
- [2] K.M. Saqr, M.K. Mansour, M.N. Musa, Thermal design of automobile exhaust based thermoelectric generators: Objectives and challenges, *Int. J. Automot. Technol.* 9 (2008) 155–160. doi:10.1007/s12239-008-0020-y.
- [3] M. a. Karri, E.F. Thacher, B.T. Helenbrook, Exhaust energy conversion by thermoelectric generator: Two case studies, *Energy Convers. Manag.* 52 (2011) 1596–1611. doi:10.1016/j.enconman.2010.10.013.
- [4] Y. Wang, C. Dai, S. Wang, Theoretical analysis of a thermoelectric generator using exhaust gas of vehicles as heat source, *Appl. Energy*. 112 (2013) 1171–1180. doi:10.1016/j.apenergy.2013.01.018.
- [5] H. Xiao, K. Qiu, X. Gou, Q. Ou, A flameless catalytic combustion-based thermoelectric generator for powering electronic instruments on gas pipelines, *Appl. Energy*. 112 (2013) 1161–1165. doi:10.1016/j.apenergy.2013.01.078.
- [6] K. Ikoma, M. Munekiyo, K. Furuya, M. Kobayashi, T. Izumi, K. Shinohara, Thermoelectric module and generator for gasoline engine vehicles, *Seventeenth Int. Conf. Thermoelectr. Proc. ICT98 (Cat. No.98TH8365)*. (1998) 464–467. doi:10.1109/ICT.1998.740419.
- [7] Y.Y. Hsiao, W.C. Chang, S.L. Chen, A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine, *Energy*. 35 (2010) 1447–1454. doi:10.1016/j.energy.2009.11.030.
- [8] A. Goudarzi, A. Mozaffari, P. Samadian, A. Rezaia, L. a. Rosendahl, Intelligent design of waste heat recovery systems using thermoelectric generators and optimization tools, *Meccanica*. 49 (2014) 1211–1223. doi:10.1007/s11012-014-9878-0.
- [9] F. Meng, L. Chen, F. Sun, B. Yang, Thermoelectric power generation driven by blast furnace slag flushing water, *Energy*. 66 (2014) 965–972. doi:10.1016/j.energy.2014.02.018.
- [10] N.R. Kristiansen, G.J. Snyder, H.K. Nielsen, L. Rosendahl, Waste Heat Recovery from a Marine Waste Incinerator Using a Thermoelectric Generator, *J. Electron. Mater.* 41 (2012) 1024–1029. doi:10.1007/s11664-012-2009-6.

- [11] X.F. Zheng, Y.Y. Yan, K. Simpson, A potential candidate for the sustainable and reliable domestic energy generation–Thermoelectric cogeneration system, *Appl. Therm. Eng.* 53 (2013) 305–311. doi:10.1016/j.applthermaleng.2012.03.020.
- [12] M.P. Codecasa, C. Fanciulli, R. Gaddi, F. Gomez-Paz, F. Passaretti, Update on the Design and Development of a TEG Cogenerator Device Integrated into Self-Standing Gas Heaters, *J. Electron. Mater.* 42 (2013) 2243–2248. doi:10.1007/s11664-013-2598-8.
- [13] S. Kumar, S.D. Heister, X. Xu, J.R. Salvador, G.P. Meisner, Thermoelectric Generators for Automotive Waste Heat Recovery Systems Part II: Parametric Evaluation and Topological Studies, *J. Electron. Mater.* 42 (2013) 944–955. doi:10.1007/s11664-013-2472-8.
- [14] 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. doi:10.1016/j.apenergy.2014.08.010.
- [15] A. Montecucco, J. Siviter, A.R. Knox, The effect of temperature mismatch on thermoelectric generators electrically connected in series and parallel, *Appl. Energy.* 123 (2014) 47–54. doi:10.1016/j.apenergy.2014.02.030.
- [16] G. Liang, J. Zhou, X. Huang, Analytical model of parallel thermoelectric generator, *Appl. Energy.* 88 (2011) 5193–5199. doi:10.1016/j.apenergy.2011.07.041.
- [17] 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. doi:10.1016/j.apenergy.2014.12.005.