

TERMOGENERADORES PARA ELECTRIFICACIÓN DE HOGARES RURALES AISLADOS

Juanicó L.¹, Rinalde F.¹, Tagliavore E.¹, Gortari S¹ y Molina M.²

¹ Centro Atómico Bariloche (CONICET y CNEA) - ² Instituto Ingeniería Eléctrica, Univ. Nac. San Juan
Tel. 02944-445100 – Fax 02944-445299, e-mail: juanico@cab.cnea.gov.ar

RESUMEN: Se presenta el diseño termo-hidráulico y mecánico, construcción y testeo de un prototipo compacto orientado a satisfacer la demanda de electrificación inicial de hogares rurales aislados. Su construcción y caracterización experimental permitió demostrar su factibilidad técnica. Se obtienen eficiencias en cogeneración del 90%; siendo muy baja la eficiencia termoeléctrica (4%), este esquema de cogeneración (calentando agua para consumo hogareño) podría ser una nueva opción interesante para resolver la demanda insatisfecha de electrificación de pobladores rurales, competitiva con paneles fotovoltaicos.

Palabras clave: Termoelectricidad, Desarrollo de Prototipos, Electrificación rural aislada

INTRODUCCIÓN

Termoelectricidad

La generación de electricidad mediante la aplicación de calor en una unión bimetálica fue observada por primera vez en 1821 por Seebeck, de quien este efecto toma su nombre. Si una unión es calentada, los electrones incrementarán su energía respecto a los de la unión fría creando una situación de desequilibrio y los electrones de la unión caliente fluirán hacia la fría. El aporte de energía térmica continua nos asegura que la velocidad de transferencia de electrones de la parte caliente a la fría va a ser mayor que la inversa, con una continua transmisión de calor y diferencia de potencial (Rowe y Min, 1996).

Un dispositivo termoeléctrico clásico está basado en dos materiales semiconductores, un semiconductor n y otro p, unidos en ambos extremos por un conductor eléctrico. A este conjunto se lo denomina termopar o termoelemento. Si se somete la unión n-p a una fuente de calor, manteniéndose ambos extremos a diferentes temperaturas, se produce una pequeña fuerza electromotriz que genera una corriente eléctrica en el circuito, manifestándose el efecto Seebeck. Las dimensiones de un termoelemento son muy pequeñas (mm) al igual que la potencia que puede generar, por lo que se configura un gran número de ellos y se colocan en serie eléctricamente y en paralelo térmicamente, obteniéndose así un módulo termoeléctrico de aplicación real.

Módulos termoeléctricos comerciales

La Figura 1 muestra un módulo termoeléctrico comercial. Los nuevos módulos generadores pueden soportar temperaturas de hasta 400C, manufacturados por Tellurex (USA) y Siachin (China). Su mayor costo es compensado por un incremento dramático en la potencia generada, proporcional al cuadrado del salto de temperatura. Su coste actual varía de 2 a 10 USD/W.

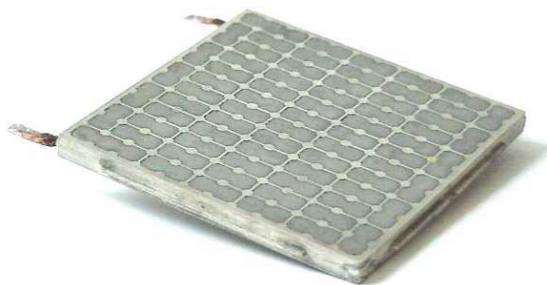


Figura 1. Módulo termoeléctrico 20W (L = 7cm).

Aplicaciones de los termogeneradores

Los generadores termoeléctricos actuales se utilizan comercialmente en aplicaciones remotas no supervisadas asociadas a gasoductos y oleoductos, para protección catódica y alimentación de sensores de sistemas SCADA. Estos equipos generan electricidad en base a la combustión de gas (natural, de boca de pozo o licuado) mediante un quemador. Global Thermoelectric es una empresa canadiense que nace con este producto en 1975, la cual conserva al presente una posición monopólica en este mercado “cautivo” vendiendo equipos termogeneradores a precios superlativos (100 USD/W), y por esto,

vedados para los usos sociales. Sin embargo en los últimos años ha retomado el impulso por la termoelectricidad, apareciendo varios fabricantes de módulos Peltier (utilizados habitualmente por la industria de la electrónica de potencia como refrigeradores compactos) que los ofrecen también para generación eléctrica a temperaturas relativamente altas, lo cual permite su uso en aplicaciones hogareñas, asociados a una fuente térmica variable no controlada, como ser una estufa o cocina a leña. Varios autores han desarrollado investigaciones en este sentido, al presente sólo hasta el nivel de prototipos. En los últimos años Rowe (1996) y otros autores (Nuwayhid, 2003; Min, 1992) han propuesto prototipos voluminosos y con una fuente fría compleja (ciclo de refrigeración en vacío con un fluido de bajo punto de ebullición), no asequibles al uso doméstico. Mastbergen et al. (2005) han propuesto en cambio utilizar disipadores convencionales de la industria electrónica con un pequeño ventilador (tipo *cooler* de computadoras personales) asociado. Sin embargo, el elevado autoconsumo observado en estos ventiladores y la bajísima eficiencia inherente a ella, vuelven prohibitivo, a nuestro juicio, su uso para electrificación inicial de hogares rurales. En este caso la leña podría volverse un insumo crítico, y siendo estimulado su consumo de esta manera, podría ser un elemento coadyuvante en la desertificación de zonas áridas (Juanicó, 2009; Tagliavore et al., 2010). Sobre este análisis, se eligió un diseño alternativo, presentado en este trabajo. Consiste éste en una olla “de doble fondo” en la cual se insertan los módulos termoelectricos, refrigerados por la convección natural de agua en circuito abierto. La posibilidad de cogeneración explícita (calentar agua) permite así asociar su uso al de la cocina hogareña; se aumenta la eficiencia (en cogeneración) y se limitaría la desertificación.

DESARROLLO PROTOTIPO

En la Figura 2 se observa el despiece de la termopila en donde se disponen 12 tornillos para ejercer la presión necesaria en forma uniformemente distribuida sobre el arreglo de los 9 módulos termoelectricos. En la Figura 3 se muestra el prototipo ensamblado (como transparencia) en donde se acoplan la termopila y el reservorio de agua (sumidero de calor).

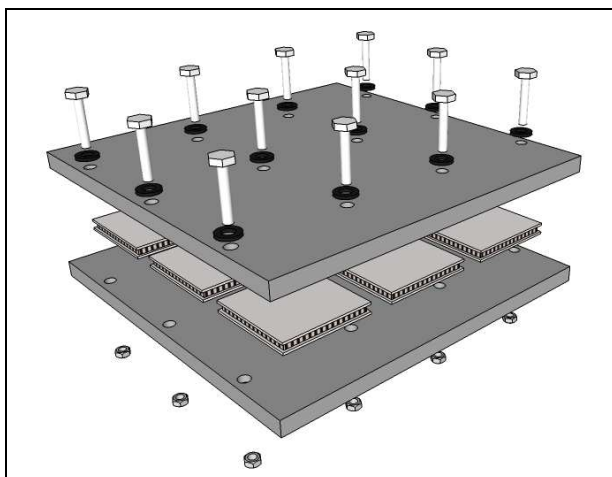


Figura 2. Vista de croquis del despiece del doble fondo.

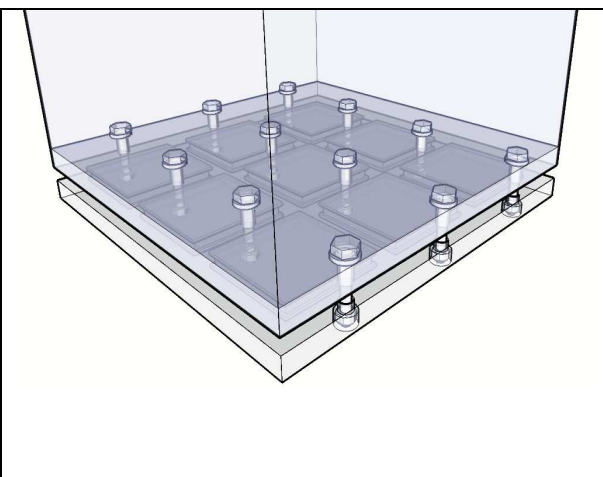


Figura 3. Vista de croquis del conjunto ensamblado.

Diseño termo-hidráulico

Para estimar las resistencias térmicas equivalentes del sistema en operación estacionaria comenzaremos por el cálculo del intercambiador de calor aluminio-agua. Siendo la interface de contacto plana y considerando su superficie de contacto ($A_c = 0,04m^2$, para una olla de sección cuadrada de 20cm de lado) para la cual se estima que deberá conducir una potencia térmica de 1.500W, siendo entonces el flujo térmico de $37.500 W/m^2$. Estimaremos la resistencia térmica del intercambiador de calor aluminio-agua a diferentes temperaturas de trabajo del transitorio inicial de operación según se vaya calentando el agua desde los primeros instantes (12C) hasta que hierva (100C), momento en el cual se establece un régimen estacionario de ebullición (consideraremos también la posibilidad de que se produzca ebullición nucleada sub-enfriada a partir de este instante). Para estimar la resistencia térmica utilizaremos correlaciones de convección natural para una placa plana horizontal calefaccionada desde el piso. Las correlaciones habituales para la mayoría de los cálculos de ingeniería son de la forma:

$$Nu = h L / k \quad (1)$$

Donde Nu es el número de Nusselt, h es el coeficiente de convección, k es la conductividad térmica del fluido y L es la longitud característica. El Nu se calcula según correlaciones para régimen laminar (2) o para régimen turbulento (3) en función del Rayleigh, Ra , como:

$$Nu = 0.54 Ra^{1/4} \quad (si \ 10^4 < Ra < 10^7) \quad (2)$$

$$Nu = 0.15 Ra^{1/3} \quad (si \ 10^7 < Ra < 10^{11}) \quad (3)$$

Los números de Rayleigh y Nusselt serán función de la temperatura media entre el agua y la placa; siendo que la olla se va calentando durante el transitorio inicial, es conveniente calcular estos parámetros para distintas condiciones, como se muestra en la Tabla 1, junto con las temperaturas de ambos lados de la termopila (T. Caliente, T. Fría) calculadas en base a los parámetros térmicos de los módulos utilizados. Para estos primeros cálculos iniciales asumiremos que el flujo térmico que atraviesa los módulos termoeléctricos se encuentra fijado al valor que optimiza su funcionamiento (1.500W), es decir que maximiza la potencia generada, obteniendo siempre un salto de 100C en la termopila. El último punto de la tabla corresponde al caso de ebullición nucleada en pileta, en el cual la temperatura de la olla se fija prácticamente en 110C debido al aumento notable del coeficiente de convección para esta última condición.

T. Agua [°C]	Ra	Nu	h [W/m ² C]	R. Térmica recipiente [°C/W]	T. Fría [°C]	T. Cal [°C]
12	2,25E+09	1,97E+02	580	0,043	77	177
42	1,12E+10	3,36E+02	1.065	0,023	77	177
62	1,70E+10	3,86E+02	1.265	0,020	92	192
82	2,28E+10	4,25E+02	1.427	0,018	108	208
100	-	-	-	-	110	210

Tabla 1: Resistencia térmica y temperaturas para distintas condiciones

T. Agua [°C]	P. Suministrada [W]	Δt módulos [°C]	P. Generada [W]	T. Caliente [°C]
12	1201	80	32,0	144
42	1172	78	30,5	148
62	1100	73	26,8	157
82	1018	68	23,0	168
100	880	58	16,8	168

Tabla 2: Resultados para una resistencia térmica adicional (0,15C/W)

Se observa de la Tabla 1 que la temperatura del lado caliente supera los 175 C (máximo tolerable según el modelo de termopila comercial utilizada), debido a la suposición inicial de que se establecerá una potencia térmica de 1.500W en todos los casos. Esta hipótesis no es correcta dado que la fuente térmica disponible (cocina a leña) es una fuente de calor variable y que más bien se asemeja a una fuente de temperatura constante, que a una fuente de flujo constante. De nuestros propios ensayos en cocinas a leña hogareñas podemos establecer conservativamente un valor máximo en la tapa de la cocina en 300C. Empleando un modelo térmico de resistencias en serie similar al utilizado en el prototipo anterior, podemos calcular en función de la temperatura del reservorio agua, los parámetros de funcionamiento de la termopila, asumiendo una resistencia de contacto entre el captador de calor de aluminio y la superficie de la cocina de 0,15 C/W. Recalculando con este valor la resistencia total equivalente del sistema para cada condición del agua, determinamos la potencia térmica conducida, el salto térmico en la termopila y la potencia eléctrica generada, como se muestra en la Tabla 2. Se observa aquí que la potencia generada disminuye apreciablemente a medida que el sumidero de calor (reservorio de agua) incrementa su temperatura. La temperatura del lado caliente de la termopila no supera nunca el máximo tolerable; siendo ésta una condición favorable, pero otra parte no estamos aprovechando al máximo la generación posible en el arreglo de módulos empleados (45W).

Construcción del prototipo

La construcción de este prototipo se divide en dos partes, en primer lugar la fabricación y el ensamble de la termopila, y en segundo lugar la fabricación del recipiente superior (sumidero de calor). La base inferior del recipiente será la propia placa fría de la termopila, asegurando de esta manera un buen contacto térmico con el fluido refrigerante. Las uniones de ambas partes se realizan con silicona para alta temperatura, lo que permite sellar el recipiente. A una altura de 10cm por encima de la termopila, se coloca una llave de purga que permitirá vaciar el recipiente.

Para la construcción de la termopila se utilizaron dos placas de aluminio de 9 milímetros de espesor, lo cual permite contar con una placa conductora que homogenice cualquier tipo de anisotropías en la distribución espacial del flujo de calor, y también provea adecuada rigidez mecánica. Intentando disminuir la resistencia de contacto entre las placas y los módulos termoeléctricos se procedió a pulir las placas con una lijadora orbital, hasta lograr una superficie espejada. En la Figura 4 se observa el prototipo ensamblado y en la Figura 5 se muestra en detalle la placa del lado caliente.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Teniendo en cuenta que este prototipo no puede soportar potencias térmicas que generen sobre-temperaturas en la termopila, se utilizará un controlador PID de temperatura que, en conjunto con un relé de estado sólido, controlen la potencia

suministrada en cada instante de forma de no superar nunca los 175C de temperatura sobre el lado caliente de la termopila. En la Figura 6 se observa una foto del aparato experimental.



Figura 4: Prototipo construido de termogenerador.

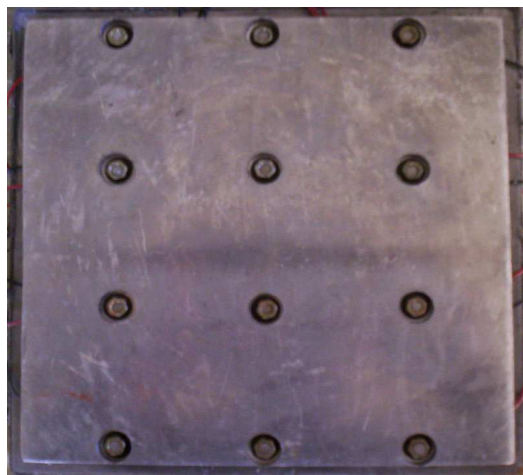


Figura 5: Detalle parte inferior placa caliente.

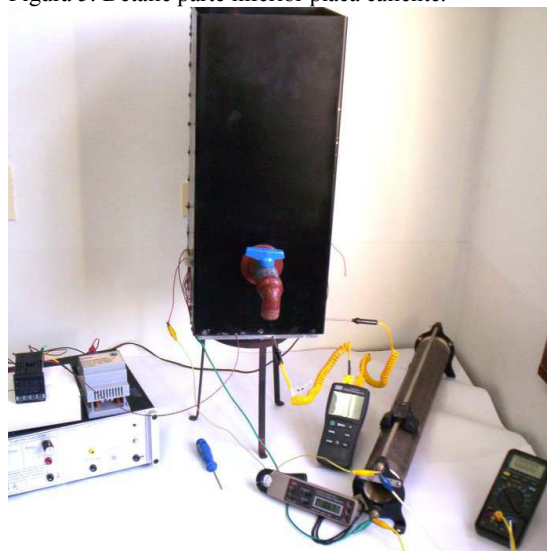


Figura 6. Aparato experimental.

En la Figura 7 se grafica la evolución temporal de las tres temperaturas características del sistema (lados caliente y frío de termopila y temperatura agua) sujeto al calentamiento variable provisto por la resistencia calefactora controlada por el PID. Si bien el objetivo del estudio térmico de este prototipo no incluye el modelado de su evolución temporal, podemos establecer una analogía con el modelo de capacitancias térmicas concentradas. A grandes rasgos y en forma cualitativa, la evolución experimental considerada puede estudiarse como la suma de tres distintas etapas a considerar:

- 1) Observamos una primera etapa (los primeros 15 minutos), en la cual se produce un rápido incremento en la temperatura del lado caliente del captador de calor de la termopila, mientras que la temperatura del lado frío y el agua prácticamente no varían. Este proceso se puede explicar muy fácilmente siguiendo el mismo modelo de capacitancias concentradas; en efecto la importante inercia térmica del captador de aluminio del lado caliente permite absorber El flujo de calor recibido sin prácticamente traspasar calor al resto del sistema.
- 2) Se observa una segunda etapa de transición (hasta los 42.5 minutos) en la cual se suaviza el fenómeno anterior y por otro lado la temperatura del lado frío y del agua comienzan a incrementarse progresivamente, mientras que el lado caliente disminuye su tasa de calentamiento.
- 3) Luego de los 42.5 minutos la temperatura del lado caliente de la termopila se mantiene constante en 175C y por lo tanto en el modelo térmico del sistema se puede desacoplar este nodo de capacitancia concentrada. En esta tercera etapa (hasta los 90 minutos), la dinámica térmica del sistema se puede representar por un conjunto de dos ecuaciones acopladas que modelan la evolución temporal de los nodos correspondientes al lado frío de la termopila y al reservorio del agua. Al final de esta etapa (t

= 90min) desaparece también el efecto de la inercia térmica del lado frío y el proceso transitorio se aproxima a un proceso cuasi-estático en el cual vale el modelo de resistencias térmicas en serie. En este caso el modelo cuasi-estático emplea una única ecuación que representa el balance de energía para el nodo del reservorio de agua. Luego de los 90 minutos se observó en el experimento la presencia de ebullición nucleada sub-enfriada en el fondo de la olla. En la Figura 8 se observa una fotografía termométrica del prototipo obtenida con una cámara Flir300. Se observa un gradiente muy suave de temperaturas dentro de la olla refrigerante, lo cual se explica y concuerda con nuestra hipótesis de que la transferencia se efectúa predominantemente por el mecanismo de convección natural.

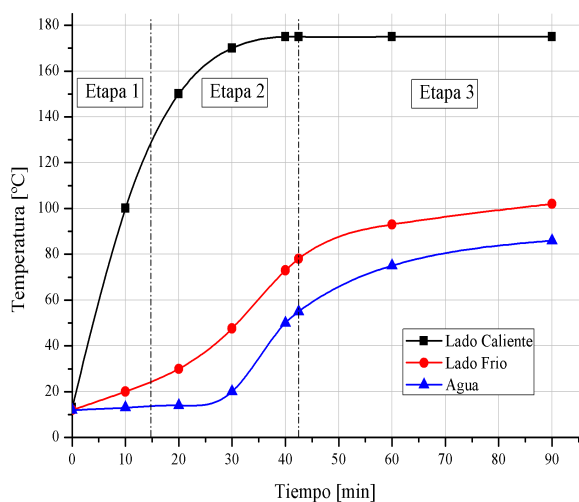


Figura 7. Evolución temporal térmica del sistema.

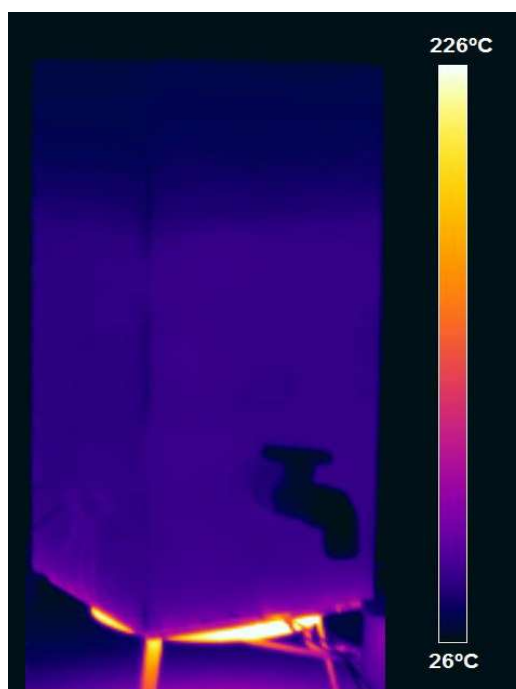


Figura 8. Termometría infrarroja del experimento.

CONCLUSIONES

Se diseñó térmica y mecánicamente un prototipo original de termogenerador, diseñado especialmente para su uso en hogares rurales dispersos. El mismo fue construido y caracterizado experimentalmente, demostrando un buen acuerdo cualitativo con el modelo térmico empleado de resistencias térmicas en serie (Rinalde, 2011). Siendo éste muy sencillo, permite diseñar adecuadamente térmicamente los subsistemas en juego en este prototipo.

El modelo térmico demostró que el empleo de un intercambiador de calor tipo placa plana (fondo de la olla) imponía una resistencia térmica de transferencia al agua muy elevada, y por ende una potencia generada reducida. Por ejemplo, para una temperatura del refrigerante de 12C, la temperatura del lado frío de la termopila ascendería a 77C si se estableciese el flujo de calor óptimo. Una alternativa tradicional para reducir este salto térmico consiste en disponer de superficies aleteadas, pero esta alternativa no es aquí conveniente dado el uso (tipo olla) que se pretende establecer para el sumidero de calor, a menos que se limite su uso estrictamente al calentamiento de agua, y no se utilice el mismo, por ejemplo para a la cocción de alimentos. Se considera que este punto deberá ser estudiado en mayor profundidad en el futuro, a través de la interacción y uso en condiciones reales por parte de pobladores rurales.

Siendo un trabajo altamente innovativo, esta línea de investigación deberá ser estudiada en mayor profundidad en trabajos futuros, incluyendo por ejemplo mediciones de campo en condiciones de uso reales. No obstante lo anterior, la extrema sencillez conceptual y la robustez mecánica del prototipo desarrollado, permitiría abrigar buenas expectativas respecto a su real implementación práctica, sobre todo en hogares rurales de climas fríos donde el recurso solar es escaso y en cambio el uso de estufas hogareñas es por demás generalizado e intensivo.

REFERENCIAS

Rowe, D. y Min, G. Design Theory of Thermoelectric Modules for Electrical Power Generation. IEE Proceedings: Science, Measurement and Technology, Vol. 143, 6, 1996, 351-356.

- Nuwayhid, R. Y., Rowe, D. M., Min, G., Low Cost Stove-Top Thermoelectric Generator for Regions with Unreliable Electricity Supply. *Renewable Energy*, Vol. 28, 2003, 205-222.
- Min, G., Rowe, D. Optimization of Thermoelectric Module Geometry for 'Waste Heat' Electric Power Generation. *Journal of Power Sources*, Vol. 38, 1992, 253-259.
- Juanicó, L. y Rinalde, G. Comparative analysis of photovoltaic and thermoelectric panels for powering isolated homes. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 1, 043107, 2009.
- Juanicó y Rinalde. Análisis comparativo de Paneles Termoeléctricos y Fotovoltaicos para electrificación de hogares aislados. *Revista Interciencia* vol 35(2), pp.140-143, 2010.
- Mastbergen, D, Willson B. y Joshi S. 2005. Producing Light from Stoves using a Thermoelectric Generator. Report of the Engines and Energy Conversion Lab., Dep. of Mechanical Engineering, Colorado State University. (<http://www.vrac.iastate.edu/ethos/files/ethos2005/pdf/mastbergen.pdf>).
- Tagliavore, E. Molina, M., Juanicó, L., Rinalde G. y Gortari, S. Design of Improved Controller for Thermoelectric Generator used in Distributed Generation. *Int. Journal of Hydrogen Energy*, ISSN 0360-3199, 2010.
- Rinalde, Fabián. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería del Instituto Balseiro “Desarrollo de Termogeneradores Avanzados”, aprobada el 20 mayo de 2011. Director. Dr. L. Juanicó.

ABSTRACT

The thermal-hydraulic and mechanic designs of a thermogenerator prototype for isolated rural households is presented. This development is devoted to satisfy the initial electrical demand in rural homes. Besides, the construction and experimental testing of prototype has showed the feasibility of this novel concept. The cogeneration scheme adopted has allowed to get efficiencies higher as 90%, a successfully goal regarding the very low levels of present thermoelectric modules, about 4%. In this sense, the design proposed could be a new interesting choice for rural homes, even competitive against PV panels.

Keywords: thermoelectricity, thermogenerator, thermoelectric modules, prototypes.