

DESARROLLO DE UN TERMOGENERADOR PARA ELECTRIFICACIÓN Y PROVISIÓN DE AGUA CALIENTE A HOGARES RURALES

Luis Juanicó¹, Eduardo Tagliavore², Fabián Rinalde³, Leonardo Ortiz³ y Nicolás Di Lalla⁴

Investigador Conicet^{1,4} - investigador CNEA^{2,3}

Centro Atómico Bariloche^{1,2,3} - Centro Atómico Constituyentes⁴

juanico@cab.cnea.gov.ar

Recibido 15/08/13, aceptado 25/09/13

Resumen: Se presenta un termogenerador portátil para electrificación inicial de hogares rurales trabajando sobre una cocina a leña u fuente térmica variable, basado en módulos *BiTe*. Dado que utiliza un baño de agua como sumidero de calor, se propone aquí un sistema mixto que provee de agua caliente al hogar y a la vez mejora el control térmico del termogenerador.

Palabras claves: termogenerador, electricidad rural, cogeneración, prototipo.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años los termoeléctricos (*TE*) han surgido como nueva opción de electrificación inicial de hogares rurales (Nuwayhid et al, 2003; Nuwayhid et al, 2005) debido a la aparición de módulos *BiTe* de costos moderados. Tellurex ofrece módulos (4,000 USD/kW) y Thermonamic (2,500 USD/kW) que soportan mayores temperaturas que los conocidos Peltier (175°C contra 80°C), lo cual viabiliza su aplicación a fuentes de calor hogareñas. La operación casi continuada de estas fuentes les permite superar el rendimiento de los paneles fotovoltaicos (Juanicó et al, 2009). Sin embargo, siendo una fuente variable no controlada, su uso conlleva un desafío no resuelto para evitar el sobrecalentamiento y daño irreversible de los *TE* (Nuwayhid et al, 2003; Kushch et al, 2001; Juanicó et al, 2012).

El prototipo de Hi-Z (Kushch et al, 2001) dispone dos *TE* enfriados por ventiladores y montados a ambos lados de la chimenea, aprovechando esta fuente de calor residual. Esta solución implica un alto autoconsumo (50%) de la potencia generada pero lo que es peor, no resuelve bien el amplio rango de operación de los gases calientes (150°C a 450°C). Así, se interpone una resistencia térmica entre la chimenea y los *TE* para evitar su degradación durante la condición más exigente (al hornear pan una vez por semana) pero de este modo se penaliza la generación con potencias moderadas, mayoritarias en el ciclo de uso. Por otra parte, considerando las bajas eficiencias de conversión (4%), es imperativo utilizar fuentes residuales o lograr la cogeneración de un subproducto. Se conocen algunos prototipos de “olla de doble fondo” (Nuwayhid et al, 2005). Este diseño pasivo elimina el autoconsumo en ventiladores y provee agua caliente, logrando eficiencias globales del 90%. Sin embargo, debe resolver aún el control de la potencia variable sobre la que funciona. En este trabajo se resuelve este desafío mediante un original “fusible térmico ajustable” de gran sencillez mecánica, plasmado en un prototipo exitoso (Juanicó et al, 2013). Además, sumando un circuito cerrado de refrigeración por convección natural con un tanque superior, se presenta un sistema mixto que mejora el control térmico del termogenerador y a la vez brinda agua caliente.

DESARROLLO DEL TERMOGENERADOR

El primer prototipo fue construido con 9 módulos G1-54-0557 de Tellurex montados en un arreglo cuadrado (0.2mx0.2m) entre dos platos de aluminio (colector y disipador) y ensamblados con 12 tornillos (Figuras 1) utilizados para mantener uniforme la presión de contacto junto el uso de resortes a platillos, los cuales han demostrado ser muy útiles para absorber las dilataciones térmicas (Rinalde, 2011). El plato disipador es utilizado como fondo de la olla superior construida con paredes laterales de chapa de acero. En un segundo prototipo (Rinalde, 2011), sustituimos este ensamblado mecánico (que requiere gran cuidado para evitar pérdidas de agua) por el uso de una olla grande de fundición de aluminio (costo \$300) cuyo fondo es pulido (Figura 2a). Los 9 módulos *TE* se interconectan eléctricamente en 3 líneas paralelas para entregar un voltaje adecuado (15V) para cargar baterías de plomo-ácido. Para lograr cargar una batería (cuya impedancia es función de su carga parcial) con una termopila alimentada con una fuente variable de calor, y por ende tiene una impedancia variable, se ha desarrollado un sistema electrónico del tipo “cargador inteligente”. Este circuito adapta en tiempo real la impedancia del sistema termogenerador para equilibrarla a la impedancia (también variable) de la batería, con el fin de optimizar la potencia entregada y la carga de la batería. Este desarrollo ha sido completado y probado en laboratorio (Figura 2a).

Utilizando una olla abierta se corre el riesgo de perder el refrigerante y dañar los *TE* por sobrecalentamiento. Por otra parte al hervir el agua se penalizaría fuertemente el rendimiento termoeléctrico, proporcional al cuadrado del salto de temperatura en la termopila (Nuwayhid et al, 2003). Por este motivo elegimos un sistema cerrado de convección natural, soldando la tapa de la olla y conectándola por dos mangueras (ver Figura 3a) o por medio de un *heat pipe* (Figura 3b) con un tanque superior. Este tanque se alimenta de la red por un flotante y provee agua caliente al consumo doméstico. Su utilidad es doble: 1) optimizar el rendimiento *TE* al minimizar T_c , maximizando así $(T_h - T_c)$; 2) asegurar el inventario de refrigerante, evitando el sobrecalentamiento de la olla. Por otra parte, como sistema de provisión de agua caliente elimina la necesidad de supervisión del usuario (que debería trasegar este volumen) y lo entrega por gravedad a través de una simple canilla.

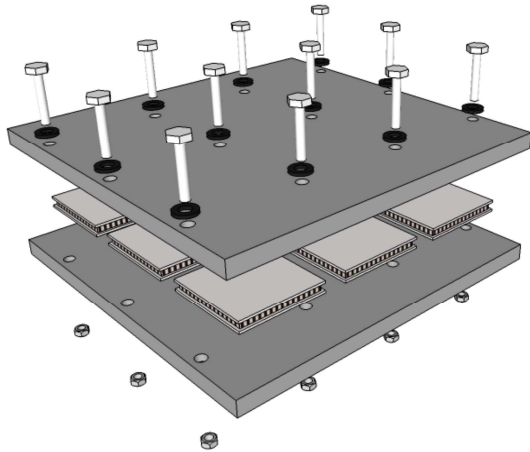


Figura 1a. Vista esquemática de la termopila.



Figura 1b. Vista lateral del prototipo.



Figura 2a. Olla termogeneradora con fusible regulable

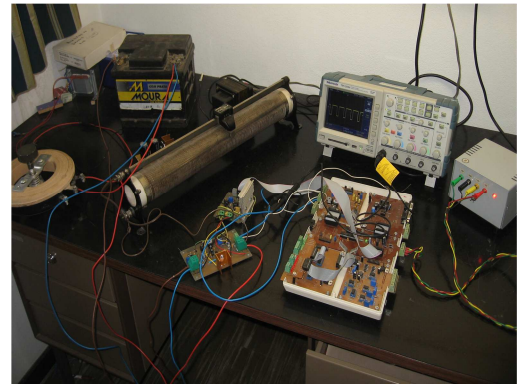


Figura 2b. Montaje de laboratorio de prueba del cargador inteligente de baterías.

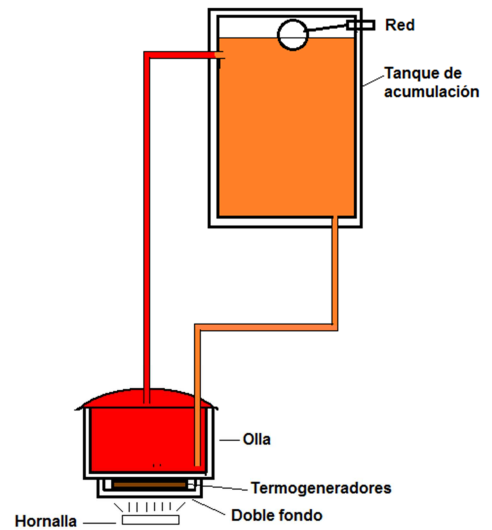


Figura 3a. Esquema olla termogenerador + tanque de agua con refrigeración por convección.

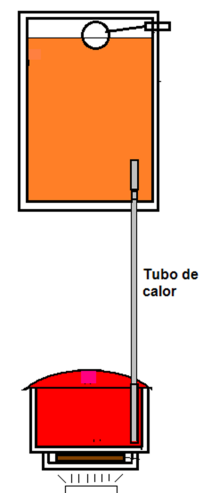


Figura 3b. Esquema olla termogenerador + tanque de agua con refrigeración por heat pipe.

Modelado del fusible térmico regulable

Se usa un modelo unidimensional de resistencias térmicas en serie conectadas entre nodos de temperatura homogénea (Figura 4): 1) la plancha superior de la cocina, T_{top} ; 2) el colector o plato calefactor, T_h ; 3) el fondo de olla, T_c , y 4) el núcleo frío en el seno de la olla, T_w . Los nodos interiores representan ambas caras del TE y los externos las condiciones de contorno. Las resistencias térmicas conectan los nodos entre sí: (1-2) resistencia de contacto con la cocina, R_{top} , (2-3) resistencia interna del TE, R_{TE} , y (3-4) resistencia de convección natural, R_{conv} . El plato calefactor de aluminio tiene una resistencia despreciable, pero lo que consignamos aquí es la interposición de una fina plancha aislante (amianto) como variable para limitar T_h , considerando la temperatura de la plancha superior de la cocina (280°C) frente al máximo soportado por el TE (175°C).

De acuerdo a los datos del fabricante, la resistencia térmica de un TE es 0.6°C/W, de donde el sistema paralelo obtiene $R_{TE} = 0.0666^\circ\text{C/W}$; de aquí la potencia generada (P) se correlaciona con el salto de temperatura en el módulo (ΔT_{TE}), como:

$$P = 5 \cdot 10^{-4} (\text{W}/^\circ\text{C}^2) \Delta T_{TE}^2 \quad (1)$$

La resistencia de convección natural se estima de correlaciones de ingeniería (2-5). El número de Rayleigh (Ra) del flujo se obtiene de las propiedades del fluido: viscosidad cinemática, ν , difusividad térmica, α , compresibilidad, β , y de la longitud característica $L = 0.2\text{m}$, la constante de gravedad (g) y su salto de temperatura, como:

$$Ra = \frac{g \beta (T_c - T_w) L^3}{\alpha \nu} \quad (2)$$

El número de Nusselt del flujo Nu , se aproxima para flujo laminar (ec. 3a) o turbulento (ec. 3b):

$$Nu = 0.54 Ra_L^{\frac{1}{4}} \quad \text{if } 10^4 \leq Ra \leq 10^7 \quad (3a)$$

$$Nu = 0.15 Ra_L^{\frac{1}{3}} \quad \text{if } 10^7 \leq Ra \leq 10^{11} \quad (3b)$$

De aquí, el coeficiente de convección se despeja con la conductividad térmica, k :

$$h = \frac{Nu k}{L} \quad (4)$$

Finalmente la resistencia de convección R_{conv} , se calcula del área transversal de flujo térmico, A :

$$R_{conv} = \frac{1}{h A} \quad (5)$$

El perfil de temperaturas a lo largo del esquema en serie se calcula con ambas condiciones de contorno (T_{top} , T_w) por analogía térmica-eléctrica; cada resistencia y su total ($R_{tot} = R_{top} + R_{TE} + R_{conv}$) se deriva de la potencia calefactora (q) y su salto térmico, como:

$$R_{tot} q = \Delta T_{tot} \quad (6)$$

$$R_{top} q = \Delta T_{top} \quad (7)$$

$$R_{TE} q = \Delta T_{TE} \quad (8)$$

$$R_w q = \Delta T_w \quad (9)$$

Para cada par de temperaturas (T_{top} , T_w) consideradas y una dada R_{top} (0.108°C/W) se puede calcular el régimen estacionario y la potencia generada, como se muestra en Tabla 1 para el caso más exigente ($T_{top}=280^\circ\text{C}$) y donde R_{top} es seleccionado para evitar el sobrecalentamiento de los TE.

$T_w(^{\circ}\text{C})$	$R_{conv}(^{\circ}\text{C/W})$	q (W)	$T_h(^{\circ}\text{C})$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	P (W)
12	0.043	1,230	147	65	30.3
42	0.023	1,200	150	70	29.0
62	0.020	1,120	159	84	25.1
82	0.018	1,030	169	100	21.1
100	-----	975	175	110	19.0

Tabla 1. Parámetros térmicos según T_w , $T_{top}=280^\circ\text{C}$ y $R_{top}=0.108^\circ\text{C/W}$.

Observemos que el penúltimo caso ($T_w=82^\circ\text{C}$) representa la condición en la cual el lado frío alcanza la temperatura de ebullición pero el calor es transferido todavía por convección en una fase, mientras que el último caso representa el caso de transferencia por ebullición nucleada, en la cual la temperatura de pared queda fijada en 110°C (Incropera yDeWitt). Este último caso determina R_{top} e implica una conversión no-óptima para los otros de menor T_{top} . De aquí, podemos explorar que margen podría mejorarse si (idealmente) se pudiera ajustar R_{top} en cada caso como ilustra la Tabla 2, en la cual se obtienen 16W extra (+55%). Por otra parte, este margen podría ser aún mayor cuando la cocina operase a potencias moderadas. La Tabla 3 muestra (para $T_{top}=200^\circ\text{C}$) la comparación de un diseño convencional (fijando R_{top}) y uno que lo ajustase, observándose que se podrían alcanzar notables mejoras en este último.

$T_w(^{\circ}\text{C})$	$R_{top}(^{\circ}\text{C/W})$	P_{ideal} (W)	ΔP (W)	ΔP
12	0.071	45	14.7	48%
42	0.071	45	16.0	55%
62	0.080	34	8.9	36%
82	0.095	24	2.9	14%

Tabla 2. Comparación entre potencia real e ideal generada (variando R_{top}) para $T_{top}=280^\circ\text{C}$.

$T_w(^{\circ}\text{C})$	P_{real} (W)	$R_{top}^{ideal}(^{\circ}\text{C/W})$	P_{ideal} (W)	ΔP (W)	$\Delta P(\%)$
12	14.9	0.017	44.1	29.2	196
42	12.8	0.017	43.9	31.1	244
62	10.1	0.019	34.1	24.0	239
82	7.5	0.0225	24.2	16.7	223
100	5.9	0.025	19.0	13.1	224

Tabla 3. Comparación diseño convencional ($R_{top}=0.108$) e ideal (varía R_{top}^{ideal}) para $T_{top}=200^\circ\text{C}$.

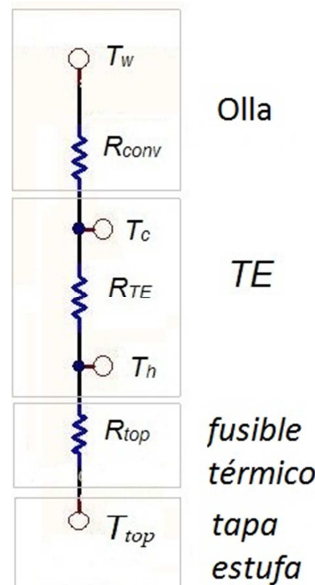


Figura 4. Esquema de resistencias térmicas.

Diseño del fusible térmico ajustable

El análisis previo motiva el desarrollo de un dispositivo que permita regular R_{top} para maximizar la potencia generada en cada condición y aún asegurar la integridad de la termopila. Nuestro diseño consiste en un disipador aleteado refrigerado por ventilador que es interpuesto entre la cocina y el TE. Mientras un disipador convencional regula la resistencia térmica del sumidero de calor y utiliza el ventilador para minimizar ésta, este sistema se utiliza para controlar T_h y la función del ventilador es opuesta, utilizado para “cortar” el flujo de calor cuando hay riesgo de sobrecalentamiento. En los casos de mínima generación se apaga el ventilador y no se penaliza la generación con su autoconsumo, permitiendo que el calor fluya por conducción a través de los canales verticales del fusible térmico mostrado en de Figura 5. En este caso obtenemos la mínima resistencia térmica:

$$R_{top}^{min} = \frac{H}{S k} = 0.017 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (10)$$

donde H y S son la altura y sección transversal de las aletas respectivamente. Después de varios intentos, obtenemos un diseño mostrado en Figura 3, pero es necesario verificar que (consumiendo sólo una potencia razonable en el ventilador) logramos incrementar R_{top} seis veces. En este caso es calculado (mediante las anteriores ecuaciones) que para $R_{top}=0.017^\circ\text{C/W}$ se obtiene un flujo térmico $q_0=1,922\text{W}$ en vez del valor (925W) calculado previamente para $R_{top}=0.108^\circ\text{C/W}$. De allí puede concluirse que un disipador con un equivalente R_{top} sería obtenido si el flujo refrigerante pudiera remover 947W, y ahora verificaremos esta condición calculando el flujo refrigerante dentro de los canales, utilizando la conocida correlación de Dittus-Boelter (Incropera and DeWitt):

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (11)$$

donde Re y Pr son el número de Reynolds ($V D/\nu$) y Prandtl (ν/α), en donde V es la velocidad media del aire y D es el diámetro hidráulico de los canales. Revisando estas ecuaciones para un flujo de 4.7 l/s ($V=40\text{m/s}$) se obtiene $Nu=31.9$ y de aquí $h=152\text{W}/^\circ\text{Cm}^2$. Con este último estimamos la potencia P de enfriamiento, como:

$$P = A_c h \Delta T \quad (12)$$

donde A_c (0.1285m^2) es el área de refrigeración y ΔT puede ser estimado como el promedio de la diferencia de temperaturas entre las aletas calientes y el flujo de aire. De la ecuación anterior y usando un valor semilla de $\Delta T=50^\circ\text{C}$ se obtiene una potencia de enfriamiento de 976W, la cual es suficiente para modificar R_{top} . El último punto es verificar si esta potencia refrigerante puede ser transferida al flujo de aire, considerando su balance de energía:

$$P = \dot{m}' C_p \Delta T \quad (13)$$

donde \dot{m}' es el flujo másico de aire de capacidad calorífica $C_p=1\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ y ΔT es la diferencia de temperatura del flujo de aire a lo largo del disipador. Desde allí ΔT se puede calcular como 207°C . Siendo la temperatura de entrada del aire de 30°C , este incremento implica una temperatura de salida de 237°C , el cual verifica la condición inicialmente propuesta. De aquí podemos concluir que este disipador podría ajustarse a los criterios de diseño propuestos. La potencia del ventilador requerido para esta función se calcula de experimentos en 1.5W, el cual es un valor muy razonable, considerando la mejora que este dispositivo regulador puede proporcionar.

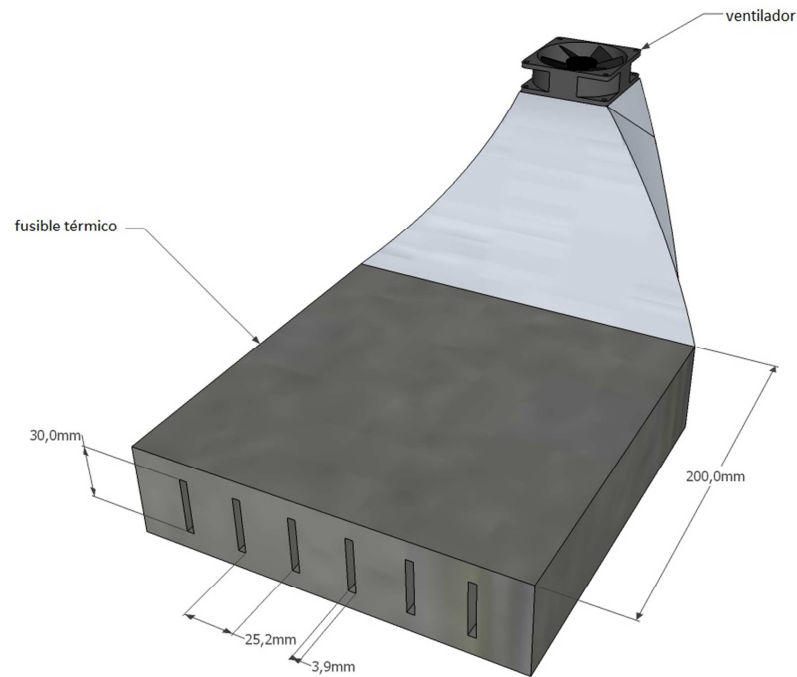


Figura 5. Esquema del fusible térmico.

CONCLUSIONES

Se ha completado el diseño térmico de un original sistema de regulación térmica del termogenerador, el cual viabiliza su uso sobre una fuente de calor altamente variable como una cocina hogareña a leña. Sin requerir complejos actuadores mecánicos (fuera de las posibilidades de dispositivos pequeños de bajo coste) y mediante un pequeño ventilador (tipo fuente de PC) de bajo consumo se puede regular el flujo de calor que recibe el TE para evitar peligrosos sobrecalentamientos. De este modo, se puede optimizar en cada condición de uso y por un amplio margen, el rendimiento del termogenerador.

La adición de un circuito de refrigeración por convección natural, ha permitido automatizar fácilmente el sumidero de calor. Esto permite (junto con el fusible regulable) asegurar la integridad de la unidad sin supervisión del usuario. Más allá de esto, el trabajar con un gran inventario de refrigerante (100 litros contra 5 litros de la olla) permite reducir en gran medida la temperatura del sumidero, y por ende, maximizar la generación termoeléctrica. Por otra parte, este circuito permite una provisión cómoda (por gravedad y en una canilla) de agua caliente en el hogar.

REFERENCIAS

- Incropera F. and DeWitt D. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th edition, Ed. J. Wiley & Sons Inc., ISBN 0-471-76115-X, 2007.
- Juanicó L. y Rinalde F. Comparative analysis of photovoltaic and thermoelectric panels for powering isolated homes. Journal of Renewable and Sustainable Energy 1, 043107, 2009.
- Juanicó L., Rinalde F., Tagliavola E. y Molina M.. Development of a Portable Thermogenerator for Uncontrolled Fire Sources. Intern. Conference on Thermoelectrics ITC 2012, Aalborg, Denmark, 2012.
- Juanicó L., Rinalde F., Tagliavola E. y Molina M.. Development of a Portable Thermogenerator for Uncontrolled Heat Sources. Journal of Electronic Materials, vol. 42 (7) pp.1846-1854, Julio 2013.
- Kushch A., Bass J., Ghamaty S. and Eisner N.. Thermoelectric development at Hi-Z technology. Int. Conf. on Thermoelectrics, pp. 422-430, June 2001, Beijing, China.
- Nuwayhid, R., Rowe, D. and Min G. Low cost stove-top thermoelectric generator for regions with unreliable electricity supply. Renewable Energy vol. 28 (2) 205- 222, 2003.
- Nuwayhid, R. and Hamade, R.. Design and testing of a locally made loop-type thermosyphonic heat sink for stove-top thermoelectric generators. Renewable Energy, vol. 30 (7), 1101-1116. 2005.
- Rinalde F.. Desarrollo de Termogeneradores Avanzados Para la Industria del Gas y el Petróleo. Tesis de Maestría del Instituto Balseiro, 2011.

ABSTRACT

In this paper is presented a new design of portable thermogenerator intended for initial electrification of rural isolated homes. This device was performed by using commercial BiTe thermoelectric modules, and it is designed to work on a domestic wood stove. Regarding this generator uses a water pot as heat sink, is proposed here a new combined system that provides domestic hot water meanwhile it improves the thermal controlling and performance of the thermogenerator.

Keywords: thermoelectric, prototype, rural electrification, cogeneration.