



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DISEÑO DE UN GENERADOR TERMOELÉCTRICO DE BAJA  
TEMPERATURA BASADO EN ENERGY HARVESTING**

**TESIS**

Que para obtener el grado de:

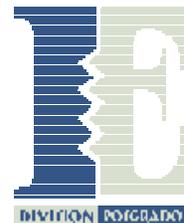
**DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

Presenta:

Carlos Alberto Ugalde Caballero

Director de Tesis:

Dr. Juan Anzures Marín



Morelia, Michoacán

Agosto de 2012

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, porque siempre he contado con su apoyo. Muchas gracias.

A mi asesor, el Doctor Juan Anzures Marín, por su apoyo, comentarios, extremada paciencia y su amistad.

Al doctor Gerardo Barrera Cardiel, por permitirme llevar a cabo la experimentación en su laboratorio, sus observaciones e ideas.

## RESUMEN

En este trabajo se describen los antecedentes, el diseño, construcción y pruebas realizada a un recolector de micro energía térmica capaz de alimentar dispositivos electrónicos comerciales de muy bajo consumo a partir de gradientes de temperatura pequeños, generados por la captación de energía solar.

Se propone y demuestra el empleo de módulos Peltier operando como generadores de energía, el diseño de un convertidor para generar niveles de voltaje adecuados para dispositivos comerciales y el uso de supercapacitores como almacén de energía, a partir de una carga muy exigente. Se caracterizó el sistema completo, estableciendo su eficiencia y potencia máxima generables a diferentes gradiente de temperatura, así como los resultados de pruebas con la construcción de un captador termo solar. Se propone y analiza una alternativa para mejorar el flujo de calor y elevar tanto la energía generada como la eficiencia a través del enfriamiento evaporativo por adsorción.

Las aportaciones de esta investigación son las siguientes:

1. Se propone y demuestra la ventaja de utilizar módulos Peltier en lugar de generadores termoeléctricos comerciales para temperaturas y gradientes de bajo nivel.
2. Se demuestra que es posible alimentar una carga sin baterías a partir de energía térmica.
3. Se establecieron los parámetros más importantes en la selección de los módulos Peltier a partir de sus parámetros generales, sin necesidad de contar con datos como la construcción interna y materiales, de igual manera se demuestra que el área superficial del transductor no es determinante en la generación de energía.
4. Se logró generar mayor cantidad de energía que la reportada en las referencias encontradas para gradientes de temperatura menores a 10 °C.
5. Se propone un método de enfriamiento por evaporación impulsado por la propia energía térmica, que proporciona tanto almacenamiento de calor durante el día como operación nocturna, que es un periodo más largo que el diurno.

## ABSTRACT

This thesis describes the background, the design, construction and testing of a thermal micro energy harvester capable of supplying power to very low power commercial electronic devices from small temperature differences, generated from a solar collector.

The characterization of Peltier modules as energy generators is proposed and demonstrated, and also are the design of a power converter for powering commercial devices and the use of supercapacitors as energy storage for feeding a very demanding load. The complete system was characterized, establishing its efficiency and maximum generated power from different temperature gradients, and the results of testing with a thermal solar collector and an alternative to improve the heat flow for increasing the generated energy and efficiency through adsorptive evaporative cooling.

The original contributions related to this work are as following:

1. The advantage of employing Peltier modules instead of commercial thermoelectric generators for low level temperature gradients is proposed and demonstrated.
2. The feasibility of powering a load without using batteries from thermal energy is demonstrated.
3. The most important parameters on selecting the most appropriate Peltier module for power generation from general parameters are established, even with scarce technical data, such as the materials employed on the internal construction of the module. Also, it is demonstrated that the surface area is not a determinant parameter for power generation on a Peltier module.
4. Higher generated energy levels were achieved for gradients under 10 °C than the state of the art results reported on references.
5. A cooling method from thermal solar and adsorptive evaporation cooling is proposed, that would provide both heat storage and night time operation, which is longer than the day time period.

## LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

CA	Corriente Alterna
CD	Corriente directa
CNA	Comisión Nacional del Agua
EH	Recolección de energía ( <i>Energy Harvesting</i> )
ESR	Resistencia Serie Equivalente ( <i>Equivalent Serial Resistance</i> )
GSM	Móviles de sistema global ( <i>Global System Mobile</i> )
	Seguimiento del punto máximo de potencia ( <i>Maximum Power</i>
MPPT	<i>Point Tracking</i> )
PV	Fotovoltaico ( <i>Photo Voltaic</i> )
RMS	Raíz cuadrática media ( <i>Root Mean Square</i> )
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
T <sub>c</sub>	Temperatura de la cara fría
TEC	Enfriador termoelectrico ( <i>Thermo Electric Cooler</i> )
TEG	Generador termoelectrico ( <i>Thermo Electric Generator</i> )
T <sub>h</sub>	Temperatura de la cara caliente
ULP	Ultra baja potencia (Ultra Low Power)
$\Delta T$	Gradiente de temperatura ( <i>Delta T</i> )

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Modos ij 31 y 33 para un transductor piezoeléctrico.	19
Figura 2.2. Modelo capacitivo de un transductor piezoeléctrico.	20
Figura 2.3. Modelo eléctrico de transductor piezoeléctrico, rectificador de onda completa y carga.	22
Figura 2.4. Esquema de un generador electrostático.	24
Figura 2.5. Comparativo de densidades de energía y potencia entre baterías y supercapacitores.	36
Figura 3.1. Normales climatológicas en el periodo de 1981 a 2000 para la Ciudad de Morelia.	47
Figura 3.2. Eficiencia cuántica del transductor XOB17-04X3	51
Figura 3.3. Esquema interno del convertidor LTC3108	61
Figura 3.4. Orden de aparición de los voltajes en el convertidor LTC3108.	63
Figura 3.5. Corriente de salida y eficiencia contra voltaje de entrada con transformador 1:100.	64
Figura 4.1. Capacidad energética contra corriente consumida y temperatura en una batería de litio SAFT LS33600.	71
Figura 4.2. Horas de vida útil y caída del voltaje de celda a diferentes corrientes de consumo para una batería de litio LS33600.	72
Figura 4.3. pantalla del programa analizador de datos de consumo del registrador de datos	74
Figura 4.4. Consumo de corriente del perfil de activación de sensores.	75
Figura 4.5. Consumo de corriente del perfil de envío de datos por el canal GSM	76
Figura 4.6. pico de corriente al inicio de la transmisión GSM.	77
Figura 4.7. Perfil de consumo de la ventana de comunicaciones y pico de corriente inicial.	77
Figura 4.8. Arreglo para la caracterización de transductores expuestos a energía solar.	81
Figura 4.9. Comportamiento de los tres módulos en el arreglo experimental.	82
Figura 4.10. comportamiento de los tres módulos expuestos a radiación solar.	83

Figura 4.11. Placas huecas empleadas para la caracterización de los módulos.	85
Figura 4.12. Esquema general del arreglo experimental para caracterizar los módulos Peltier.	85
Fig. 4.13. Equivalente eléctrico de la salida de un generador termoeléctrico.	86
Figura 4.14. Respuesta estable típica de las temperaturas en los lados frío y caliente de los módulos caracterizados.	87
Figura 4.15. coeficiente de variación para las lecturas tomadas en la caracterización de los módulos.	88
Figura 4.16. Coeficiente Seebeck de los diferentes módulos.	89
Figura 4.17. Respuesta en corriente de los módulos caracterizados.	90
Figura 4.18. Resistencia interna de los módulos caracterizados.	90
Figura 4.19. Potencia generada por los módulos caracterizados.	91
Figura 4.20. Variación del coeficiente $\alpha$ a diferentes temperaturas en el lado frío, con un diferencial constante de 20 °C.	95
Figura 4.21. Eficiencia del convertidor con diferentes relaciones de transformación. (a): 1:20, (b):1:50 y (c): 1:100	96
Figura 4.22. Pantalla de simulación en LTSPICE IV del convertidor.	101
Figura 4.23. Circuito impreso diseñado.	102
Figura 4.24. Circuito terminado.	104
Figura 4.25. Resistencia de entrada del convertidor con el módulo RC12-4.	105
Figura 4.26. Resistencia de entrada del convertidor con el módulo RC6-6.	106
Figura 4.27. Comportamiento del convertidor con módulo RC12-4 y gradiente de 20 °C.	107
Figura 4.28. Comportamiento del convertidor con módulo RC6-6 y gradiente de 20 °C.	107
Figura 4.29. Comparativo de potencias y eficiencias para ambos módulos a diferentes voltajes de salida.	111
Figura 4.30. Eficiencia del convertidor con relación 1:50 según hoja de datos.	112
Figura 4.31. Colector solar para prueba del convertidor.	116
Figura 4.32. Modelo térmico del transductor termoeléctrico con el colector solar.	117
Figura 4.33. Isotermas de adsorción de la zeolita (adsorción vs presión de vapor y	124

temperatura).

Figura 4.34. Ciclo ideal de la refrigeración por adsorción. 125

Figura 4.35. Diagrama de isósteras del par zeolita-agua. 128

Figura 4.36. Sistema cerrado de refrigeración por adsorción. 129

Figura 4.37. Enfriamiento alcanzado con una temperatura ambiente promedio de 26.75 °C. 132

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Algunas fuentes de energía y densidades de potencia generables.	5
Tabla 2.1. Densidad de potencia volumétrica de diversos transductores	12
Tabla 2.2. Transductores y tiempos disponibles para coleccionar energía	16
Tabla 2.3. Comparativo de densidades de energía y potencia de diferentes medios de almacenamiento	36
Tabla 2.4. Comparativo de características físicas y eléctricas de medios de almacenamiento.	37
Tabla 2.5. Comparativo de convertidores comerciales para recolección de energía.	41
Tabla 3.1. Radiación y horas de sol en la ciudad de Morelia según Collares-Pereira y CNA-SMN	46
Tabla 3.2. Irradiancia horaria promedio para el mes de Diciembre en la Ciudad de Morelia.	47
Tabla 3.3: Características del transductor fotovoltaico utilizado.	50
Tabla 3.4. Características de los módulos Peltier utilizados	54
Tabla 3.5. Consumos promedio del registrador de datos de acuerdo a la información del fabricante.	66
Tabla 4.1. Comparación de consumo energético del registrador de datos.	78
Tabla 4.2. Módulos utilizados para la prueba con radiación solar.	79
Tabla 4.3. Características técnicas de los transductores caracterizados bajo condiciones controladas.	84
Tabla 4.4. Tabla 4.4. Coeficiente Seebeck promedio de los diferentes módulos a partir de un $\Delta T$ de 10 °C.	89
Tabla 4.5. Resistencia interna promedio de los módulos caracterizados.	91
Tabla 4.6. Figura de mérito Z para cada módulo.	92
Tabla 4.7. Características de transformadores para el convertidor de potencia.	97
Tabla 4.8. Voltajes y eficiencias esperados para las diferentes relaciones de transformación.	98
Tabla 4.9. Comparativo de eficiencias y potencia del convertidor.	111

Tabla 4.10. Coeficientes de ajuste para el ajuste a curva de la eficiencia y potencia del convertidor para el módulo RC12-4.	113
Tabla 4.11. Coeficientes de ajuste para el ajuste a curva de la eficiencia y potencia del convertidor para el módulo RC6-6.	113
Tabla 4.12. valores del capacitor de salida (COUT) necesarios para cada perfil de consumo del registrador de datos.	115

## ÍNDICE

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Abstract	iii
Lista de símbolos y abreviaturas	iv
Lista de figuras	v
Lista de tablas	viii
Índice	x
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Motivación y problemática	2
1.2. Justificación y estado del arte	5
1.3. Objetivos	7
1.3.1. Objetivo general e hipótesis	7
1.3.2. Objetivos específicos	7
1.4. Aportaciones	8
1.5. Descripción de capítulos	8
1.6. Publicaciones	9
<b>CAPÍTULO 2. CONCEPTOS BÁSICOS</b>	<b>10</b>
2.1. Recolección o cosecha de energía (Recolección de energía)	10
2.2. Fuentes de energía y transductores	16
2.2.1. Vibracional	16
2.2.2. Fotovoltáica	26
2.2.3. Termoeléctrica	29
2.2.4. Otras fuentes	30
2.3. Almacenamiento de energía	31
2.3.1. Baterías	32

2.3.2. Supercapacitores	34
2.4. Acondicionamiento de potencia	37
2.5. Conclusiones del capítulo	42
<b>CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL SISTEMA</b>	43
3.1. Calor y energía solar térmica	43
3.2. Transductores termoeléctricos y fotovoltaicos	50
3.3. Selección de supercapacitores	55
3.4. Convertidor de potencia	60
3.5. Carga de prueba	65
3.6. Conclusiones del capítulo	67
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>	68
4.1. Irradiancia medida y conversión a temperatura	68
4.2. Análisis de consumo de la carga	68
4.3. Caracterización de transductores	79
4.4. Diseño del convertidor	96
4.5. Resultados	101
4.6. Microcontrolador	119
4.7. Enfriamiento evaporativo y almacenamiento de energía térmica	122
4.8. Conclusiones del capítulo	132
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJO FUTURO</b>	134
5.1. Conclusiones generales	134
5.2. Propuestas y trabajo futuro	139
<b>REFERENCIAS</b>	140

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

Actualmente y en un futuro a corto plazo, se observa y proyecta una gran demanda de dispositivos autónomos, especialmente de redes inalámbricas de sensores, orientadas a adquirir información sobre el estado de estructuras, vehículos, cultivos, sistemas de seguridad perimétrica, etc; a distancia y con poca o ninguna intervención humana. Estas redes consisten básicamente de sensores autónomos, también llamados nodos. Dos o mas nodos forman una red, donde cada nodo puede o no estar interconectado inalámbricamente con todos los demás a través de enlaces de radio de baja potencia, asegurando así la comunicación y transporte de información sin necesidad de cableado. Además de estas redes, existen otros equipos que requiere de operación autónoma y/o presentan alta movilidad, entre ellos se encuentran:

- Marcapasos y dispositivos de electrónica médica implantable (body area networks).
- Teléfonos celulares y equipo móvil de comunicaciones.
- Localizadores y navegadores GPS.
- Rastreadores de fauna silvestre.
- Estaciones meteorológicas remotas.
- Medidores de agua y gas.
- Registradores de datos (dataloggers).

Para proporcionar energía eléctrica a estos equipos, no es práctico cablear algún tipo de bus de alimentación de CA ó CD, pues su instalación puede llevarse a cabo a varios metros de distancia del usuario (desde unos cuantos metros hasta varios kilómetros), en ocasiones en lugares de difícil acceso (por ejemplo alrededor del fuselaje de un avión, en la estructura metálica de un puente o en un bosque remoto) y su número puede llegar a ser muy alto, desde decenas hasta cientos para el caso de las redes de sensores; si el dispositivo presenta alta movilidad, como es el caso de rastreadores de fauna o telefonía celular, el cableado

simplemente es una opción que se da por descartada. Idealmente, tales dispositivos deberían funcionar en forma completamente autónoma, tanto en el suministro y administración de la energía que requieren para operar, como en sus funciones operativas, de forma que no fuera necesaria la manipulación ni asistencia del usuario humano. Actualmente, la autonomía energética se logra en cierta medida mediante baterías primarias de alta energía o bien, baterías secundarias que requieren recargas sucesivas.

De manera similar a la “ley de Moore”, aproximadamente cada 18 meses se incrementa la eficiencia de los sistemas digitales y se reduce su tamaño y consumo de energía a la mitad [Raju, 2008]. Esto se traduce en un costo menor y una oferta continua y creciente de funciones y complejidad de los equipos, que se logran a expensas de consumos de energía cada vez más elevados. Las baterías, cuya tecnología proporciona energía limitada, no se han podido mantener a la par de la creciente reducción en tamaño y costo de los dispositivos electrónicos, pues su capacidad apenas se dobla aproximadamente cada 10 años. Su peso y volumen evita reducir aún más el tamaño de los dispositivos y representan, en muchas ocasiones, la mayor parte del costo, volumen y peso del equipo, que puede verse incrementado con sucesivas recargas y/o reemplazo periódico, que oscilan entre los 3 y los 18 meses [Shukla et al, 2000].

### **1.1.1. Motivación y problemática**

Independientemente del desarrollo tecnológico existente para reducir su tamaño e incrementar la densidad de energía, el principal inconveniente de las baterías es su enorme impacto ambiental una vez que termina su vida útil. De acuerdo a un estudio realizado por el Instituto Nacional de Ecología [Castro & Arias, 2000], se calcula que en los últimos 43 años, en el territorio nacional mexicano se han liberado al ambiente aproximadamente 635 mil toneladas de baterías, las cuales contienen elementos que pueden representar un riesgo: aproximadamente 189,382 toneladas de materiales tóxicos para el periodo comprendido entre 1960 y 2003, entre ellos mercurio, litio y cadmio. Es importante señalar que en este estudio no se consideraron las baterías que ya vienen incluidas en los equipos, ni las de tipo botón (como las utilizadas en relojes de pulsera digitales) que contienen mercurio y litio. Tampoco se ha estimado el impacto por la disposición de baterías de litio-ion, que se encuentran hoy en día en

prácticamente cualquier equipo portátil, ya que el estudio no ha sido actualizado. Aunque se considera que una batería recargable puede sustituir a unas 300 baterías no recargables, desafortunadamente su tecnología se basa en elementos que son altamente contaminantes, como el cadmio, el hidróxido de potasio y el litio, de manera que llegado el término de su vida útil, siguen representando un gran problema ecológico, aún cuando éste es menor al de las baterías primarias [Uniross, 2007]. Como se ha mencionado, la funcionalidad y consumo de energía en equipos portátiles altamente integrados presenta una tendencia cada vez mas creciente. Esto se traduce en mayor demanda por baterías, mayores densidades de energía y por lo tanto, mayores índices de contaminación, en especial si deben ser reemplazadas continuamente. Contar con alternativas al uso de baterías es determinante para reducir el impacto ambiental futuro.

Ante el panorama anterior, se han propuesto algunas opciones sustentables que permitan suministrar energía por más tiempo y con un menor impacto ambiental a estos dispositivos autónomos. Idealmente, la opción seleccionada debería otorgar una operación prácticamente infinita, de forma que no fuese necesario monitorear o reemplazar constantemente la batería del dispositivo ni desecharla al término de su vida útil. Entre estas propuestas se ha desarrollado el concepto de “Energy Harvesting” ó EH (cosecha o recolección de energía, en inglés), que en forma general significa adquirir energía del medio que rodea a un equipo autónomo y convertirla en energía eléctrica. Esta energía disponible se considera prácticamente infinita y representa un cambio en el paradigma de consumo de energía para dispositivos autónomos, ya que, dependiendo de las condiciones del medio y de operación, el objetivo no necesariamente es consumir la mínima cantidad posible como ocurre con las baterías, sino consumirla y/o almacenarla a un ritmo acorde a la disponibilidad de la misma. En ocasiones se utiliza el término “micro recolección de energía” para diferenciarlo de las aplicaciones a nivel “macro”, como son las instalaciones solares ó eólicas que producen energía en el orden de los cientos o miles de Watts; sin embargo, de manera general, en la mayoría de las referencias, el término se aplica a energizar dispositivos electrónicos de bajo consumo, tal como indican [Eggborn, 2005], [Kompis, 2008], [Das, 2011] y [Harb, 2011], entre otros.

Por otro lado, aún si se utilizan baterías como fuentes energéticas, estimar la duración exacta y real de las mismas es una tarea complicada, puesto que la velocidad de descarga de las baterías dependerá de las variaciones del ambiente como temperatura y humedad, así como de las condiciones de operación; por ejemplo, en el caso de un nodo de red inalámbrica, el consumo puede variar como consecuencia de interferencias en la comunicación, fallo de hardware, época del año, etc. Estas variaciones se traducen al final en mayores consumos de energía y la necesidad de un reemplazo y/o supervisión de baterías más frecuente, haciendo que el costo de mantenimiento se eleve incluso por encima del valor de adquisición del nodo o equipo en algunos casos [Kompis, 2008] . Para aplicaciones como los rastreadores de fauna, medidores de flujo de gas y agua sepultados bajo tierra o marcapasos dentro del cuerpo de un paciente, este reemplazo puede llegar a ser prohibitivo económica y/o operativamente e incluso imposible. Ofrecer una alternativa energética para esta problemática es la principal motivación para la investigación y desarrollo de sistemas basados en la recolección de energía.

Existen diversas fuentes energéticas a partir de las cuales obtener energía bajo el concepto de recolección, tales como:

- Diferencia de presiones
- Radiación
- Diferencia de temperaturas
- Ruido acústico
- Radio frecuencia
- Viento
- Vibraciones
- Fuentes biológicas (bacterias, procesamiento de biomasa, etc.)

Estas fuentes pueden provenir del medio ambiente natural, como en el caso de la radiación solar o puede ser de origen industrial e incluso doméstico. Una característica común es que su disponibilidad es aleatoria y discontinua, con niveles de potencia muy reducidos, del orden de los  $\mu\text{W}$  o de unos cuantos  $\text{mW}$  en el mejor de los casos; por ello, cuando la energía se encuentra presente, es necesario almacenarla para poderla utilizar en periodos en los que no se encuentra disponible, permitiendo la operación continua del equipo a alimentar.

## 1.2. Justificación y estado del arte

Algunos autores como [Farmer, 2007], [Penella & Gasulla, 2007], [Raju, 2008], [Harb, 2011] ó [Kheng & Kumar, 2011], han establecido comparativos en cuanto a la cantidad de energía generable a partir de diversas fuentes y a través de transductores apropiados, correspondientes a diversas pruebas experimentales, así como de la recopilación de información técnica de algunos transductores y otros autores. La tabla 1.1 muestra un comparativo generalizado, fundamentalmente basada en el trabajo de [Raju, 2008].

**Tabla 1. 1. Algunas fuentes de energía y densidades de potencia generables**

<b>FUENTE DE ENERGÍA</b>	<b>DENSIDAD DE POTENCIA GENERABLE</b>
<b><i>VIBRACIÓN/MOVIMIENTO (piezoeléctrico)</i></b>	
Humano	4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Industrial	100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
<b><i>DIFERENCIA DE TEMPERATURA</i></b>	
Humano	25 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Industrial	1 a 10 $\text{mW}/\text{cm}^2$
<b><i>ENERGÍA RADIANTE</i></b>	
Bajo techo	10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Al aire libre	100 $\text{mW}/\text{cm}^2$
<b><i>RF</i></b>	
GSM	0.1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Wi-Fi	1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

A pesar de las baja densidad de potencia, la generación a partir de vibraciones mecánicas es un tema ampliamente reportado en la bibliografía sobre el tema, como es el caso de [Schenck, 1999], [Ottman, 2002] y [Roundy et. al, 2008], ya que existe un marcado interés en desarrollar aplicaciones con estas fuentes, fundamentalmente para aplicaciones militares. Por otro lado, las mayores densidades energéticas, asociadas con el empleo de transductores fotovoltaicos, según puede observarse en la tabla 1.1, corresponden a la energía radiante, donde existen diversos trabajos exitosos reportados, como el caso de [Musiani et al, 2007] ó [Park & Chou, 2006], entre otros, donde claramente, al ser la fuente de la cual es posible obtener la mayor cantidad de energía eléctrica, se presentan mayores avances y aplicaciones; además de la alta

compatibilidad con la tecnología electrónica existente,. Es importante resaltar que, para situaciones de energía radiante bajo techo, la potencia generable se reduce drásticamente, al punto que se presentan pocos trabajos relativos al tema debido a la dificultad técnica existente, tal como resaltan [Kheng & Kumar, 2011].

Respecto a la generación a partir de gradientes de temperatura, se encontró relativamente poca información al inicio de la investigación. Antes del año 2007, los trabajos reportados como [Lawrence & Snyder, 2002], [Watkins et al, 2005], [Eisenhut & Bitschi, 2006 ] y [Leonov et al, 2007], presentan exclusivamente resultados del análisis, modelado y experimentación centrados en los materiales y geometría de módulos termoeléctricos, con el objetivo de incrementar tanto la potencia generada como la eficiencia de la conversión térmica a eléctrica. En este periodo no se encontraron trabajos que incluyeran etapas de acoplamiento de los niveles de voltaje y corriente generados con dispositivos termoeléctricos a valores suficientes para operar circuitería comercial, debido a los muy bajos voltajes generados, por lo que no se encontraron aplicaciones. A partir de 2007, se encontraron algunos trabajos orientados al aprovechamiento de bajos gradientes de temperatura para implantes y sistemas biomédicos como el caso de [Mateu et al, 2007], que lograron operar con gradientes por arriba de 6 °C, requiriendo un voltaje mínimo de 300 mV, produciendo un voltaje de salida de 3.7 V y una potencia máxima de hasta 42 mW. [Dalola & Ferrari et. al, 2009], en cambio, apenas logran generar 1.4 mW con un gradiente de 13 °C. Incluso en publicaciones más recientes como en [Carmo et al, 2010], con un gradiente de 10 °C, únicamente se generaron 20  $\mu$ Watts. [Kheng & Kumar, 2011], de igual modo, con el mismo gradiente generaron 621  $\mu$ W en total. En todos estos casos, el almacén de energía principal empleado fueron baterías electroquímicas. Otras fuentes como [Amataya & Ram, 2010], [Hsu et al, 2011] , [Singh et al, 2011], [Champier et al, 2009] y [Lu & Yang 2010 ], concentran sus esfuerzos en generar gradientes de temperatura por encima de los 20 °C, utilizando concentradores solares, calefactores a gas o estufas de leña para sustituir o complementar paneles fotovoltaicos para mayores consumos de potencia; para el mismo gradiente de temperatura de 10 °C, reportan potencias generadas en el orden de 30 mW a 70 mW, aunque estos niveles son alcanzados con arreglos de transductores y/o utilizando medios de ventilación forzada.

Claramente, en especial para los casos de baja temperatura, parece existir una disparidad entre los resultados, pues aún con el mismo gradiente de temperatura, la energía generada es muy diferente. Determinar la causa de estas disparidades fue una de las razones por las que se decidió trabajar con esta fuente energética. Otra razón es que la energía térmica se encuentra ampliamente disponible a partir de fenómenos como la radiación solar, quema de combustibles, medio ambiente e incluso los organismos vivos y existe interés en obtener energía a partir de gradientes pequeños. Por otro lado, es posible almacenarla de forma simple y económica [Ercan, 2006]. Adicionalmente, los módulos termoelectricos ofrecen una alta confiabilidad, tamaño reducido, salida directamente en corriente directa y no cuentan con partes móviles, por lo que no presentan desgaste por uso, haciendo que su tiempo de vida útil sea prácticamente infinito, por ello son más adecuados para aplicaciones reales. En aquellos trabajos donde se reportan aplicaciones, por lo general los autores eligen dispositivos que se adecúan a los niveles de voltaje y potencia generados. Para aplicaciones prácticas, debería ser posible ofrecer diferentes valores de voltaje y potencia suficiente para alimentarlos y operarlos adecuadamente.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Diseñar y construir un sistema basado en recolección de energía a partir de pequeños gradientes de temperatura, capaz de alimentar circuitería comercial diversa y que no utilice baterías como almacén de energía.

#### **Hipótesis**

Debe ser posible alimentar dispositivos electrónicos de bajo consumo a partir de gradientes de temperatura reducidos y sin utilizar baterías como almacén de energía.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Diseñar un sistema capaz de operar con gradientes menores a los 10 °C.

- Determinar las razones por las que, con el mismo gradiente de temperatura ,los resultados en cuanto a potencia generada reportados en las referencias son diferentes y una vez determinado, aplicar los métodos o materiales que permitan generar mayor cantidad de potencia.
- Utilizar radiación solar como fuente de energía térmica.
- Mantener un balance adecuado costo/beneficio en el diseño del sistema.

#### **1.4. Aportaciones**

Las aportaciones planteadas son las siguientes:

- Ofrecer una alternativa dentro del tema de recolección de energía para aplicaciones reales y a bajos gradientes de temperatura.
- Establecer las condiciones mediante las cuales sea posible alimentar circuitos electrónicos comerciales de bajo consumo sin utilizar baterías.
- Determinar la metodología de diseño que derive en una mayor y más eficiente conversión de energía termoeléctrica.

#### **1.5. Descripción de capítulos**

El capítulo uno presenta una visión general del trabajo y contiene los antecedentes, motivación, justificación, estado del arte, aportaciones y objetivos planteados. En el capítulo dos, se describen los términos y conocimientos básicos relativos a la recolección de energía, además de las diversas fuentes que pueden utilizarse así como los transductores asociados. De igual modo, se analizan los diferentes medios de almacenamiento y acondicionamiento de potencia. En el capítulo tres, se detallan los puntos más sobresalientes a considerar en el diseño del sistema de recolección de energía así como los fundamentos para ello. El capítulo cuatro presenta los resultados de las pruebas experimentales y tratamiento de la información, tanto en forma tabular como textual y gráfica. En el capítulo cinco presenta las conclusiones generales, al igual que las propuestas para trabajo futuro susceptible de ser desarrollado sobre el tema de recolección de energía.

## 1.6. Publicaciones

- J. Anzúrez, C. Ugalde e I. Lázaro. “Energy Harvesting: Análisis general y estado actual”. décima Reunión de Otoño de Potencia, Electrónica y Computación ROPEC 2008. Morelia, Michoacán, 3 - 5 de Diciembre de 2008.
- Carlos Ugalde, Juan Anzures, Isidro I. Lázaro “Thermoelectric coolers as alternative transducers for solar recolección de energía” 2010 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference. DOI0.1109/CERMA.2010.127.
- Carlos Alberto Ugalde Caballero, Juan Anzures Marín. “Recolector de micro energía térmica de baja temperatura” . Revista DYNA Ingeniería e Industria. Aceptado el 10-07-2012. No. De art: 5006. Pendiente de publicación. Factor de impacto JCR 2011: 0.171. [www.revistadyna.com/doc/rev/articulos\\_en\\_cartera\\_para\\_autores.pdf](http://www.revistadyna.com/doc/rev/articulos_en_cartera_para_autores.pdf)

# CAPÍTULO 2

## CONCEPTOS BÁSICOS

### 2.1. Recolección o cosecha de energía (Recolección de energía)

Históricamente, las primeras aplicaciones sobre recolección de energía pueden considerarse a nivel “macro” y fueron constituídas por molinos de viento, sistemas solares pasivos para control climático en edificaciones o ruedas de paletas impulsadas por el movimiento de un río. Las aplicaciones como paneles solares, aerogeneradores y otros semejantes son representativas de este nivel macro en el mundo moderno, que ofrecen ventajas como: larga duración, independencia de la red de suministro eléctrico y mínimo impacto ambiental.

El concepto, siguiendo a los desarrollos tecnológicos, ha pasado a un nivel “micro”, donde se pretende, como se ha mencionado en la introducción, ofrecer alternativas a la alimentación con baterías para equipos autónomos de bajo consumo, idealmente reemplazándolas o al menos reduciendo su uso. El reto actual y futuro descansa en una gama de tecnologías a una escala extremadamente pequeña tanto en tamaño físico como en consumo y niveles de energía, a los que se les denomina como de ultra bajo consumo de potencia ó ULP (Ultra Low Power).

Un sistema de recolección de energía consta de seis partes principales.

1. Una **fuentes de energía** “permanente” alrededor del equipo que se desea alimentar capaz de proporcionar, mientras está presente, la energía suficiente para operar el equipo y compensar pérdidas en el mismo.
2. Un **transductor** que convierta eficientemente la energía del ambiente en energía eléctrica. Típicamente estos transductores proporcionan niveles de potencia extremadamente bajos, del orden de  $\mu\text{W}$  a  $\text{mW}$ . La eficiencia actual de los transductores disponibles es baja, de alrededor de 0.1 a 15% dependiendo de la fuente de energía [Harb, 2011].

3. **Acondicionamiento de potencia.** Éste puede consistir en regulación, atenuación, amplificación, filtrado o rectificación, entre otros, ya sea en conjunto o por separado, para acoplar la energía convertida por el transductor a la circuitería de control y supervisión, a la carga y al almacén de energía con la mayor eficiencia posible.
4. Un **almacén de energía** que permita compensar los tiempos en los que ésta no está disponible o es demasiado baja para ser utilizada, idealmente debería tener cero pérdidas por fugas y su impedancia debería ser adecuada para transferir la mayor cantidad de potencia a la carga.
5. Un **sistema de supervisión y/o control** que monitorea la disponibilidad de energía y el consumo de la carga, permitiendo la recarga del almacén si es factible, así como restringir el consumo excesivo de la energía disponible.
6. **Circuitería y algoritmos de control y administración de energía de alta eficiencia,** ya que, como se ha mencionado, la energía disponible es muy pequeña, por lo que las pérdidas deben minimizarse. La tecnología CMOS actual representa pérdidas porque, aunque requieren poca corriente para operar (del orden de los  $\mu\text{A}$  o  $\text{nA}$ ), sus relativamente altas capacitancias de compuerta deben primero ser cargadas. Para algunos casos, toda la energía disponible puede perderse en este proceso.
7. **Una carga o consumidor de energía capaz de soportar la operación discontinua,** sin que esto comprometa su desempeño.

Las cargas para aplicaciones de recolección de energía son típicamente discontinuas y pueden o no involucrar equipo de comunicación y medición, cuya función es recopilar y enviar datos, aunque también pueden existir aplicaciones con procesamiento local. Están diseñadas para operar en tiempos muy cortos y el resto del tiempo entran a un modo de bajo consumo (espera o standby), con la finalidad de ahorrar energía. Debido a que la potencia promedio consumida por un nodo de red inalámbrica se estima de forma general en  $100 \mu\text{W}$  [Kompis, 2008], [Ramadass & Chandrakasan, 2011], [Kheng & Kumar, 2011], [Watkins et al, 2005], [Leonov et al, 2007] y [Harb, 2011], este valor se utiliza como referencia de la capacidad de

generación de un sistema de recolección de energía. Entre otros equipos, además de las redes inalámbricas, los principios de recolección de energía encuentran aplicación en:

- Implantes médicos, con consumos típicos de  $10 \mu\text{W}$ , donde se han logrado hasta 15,000 horas de operación a baterías (casi 2 años), al término de los cuales se requiere cirugía para insertar otro dispositivo [Raju, 2008].
- Manos libres y comunicaciones bluetooth.
- Relojes de pulsera.
- Redes corporales (Body Networks), que consisten en dispositivos inalámbricos con alcance de menos de un metro, fundamentalmente para aplicaciones ambulatorias y monitoreo de signos vitales [Leonov et al, 2007].
- Medidores AMR (Automatic Meter Reading) para gas y agua. Actualmente su consumo es tan reducido, que se espera una operación de al menos 20 años sin requerir mantenimiento.

La tabla 1.1. muestra la densidad de potencia por unidad de área para algunas fuentes de energía. Otros autores como [Ragunathan et al, 2005], como muestra la tabla 2.1, reportan la densidad de energía por unidad de volumen.

**Tabla 2.1. Densidad de potencia volumétrica de diversos transductores**

<b>Tecnología</b>	<b>Densidad de potencia</b>
Celdas solares (a medido día, al aire libre)	$15 \text{ mW/cm}^3$
Piezoeléctrico (insertos en zapatos)	$330 \mu\text{W/cm}^3$
Vibración (pequeño horno de microondas)	$116 \mu\text{W/cm}^3$
Termoeléctrico ( $\Delta T$ de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ )	$40 \mu\text{W/cm}^3$
Ruido acústico (100 dB)	$960 \text{ nW/cm}^3$

Estas formas de reportar densidades de energía en ocasiones causan confusión, sin embargo, el enfoque dependerá del transductor a utilizar, ya que para los transductores fotovoltaicos, por ejemplo, cuyo espesor puede ser de unas cuantas milésimas de mm (paneles planos), la densidad expresada por unidad de superficie será mas adecuada, mientras que para los transductores piezoeléctricos, que tienden a ser mas voluminosos y pueden convertir

vibraciones mecánicas provenientes de distintas direcciones, expresar la densidad en términos de volumen sería mas apropiado. En general, según se desprende de la información recabada, a excepción de las celdas solares que por ser una tecnología mas desarrollada cuenta con estándares más definidos, para el resto de los transductores, los datos técnicos en cuanto a generación de potencia varían dependiendo del fabricante, el cual publica sus propias especificaciones bajo condiciones de prueba muy diferentes, de ahí que es necesario caracterizar, la mayor parte de las veces, este tipo de transductores a fin de obtener datos reales de su operación bajo condiciones de interés específicas.

Para definir plenamente un sistema basado en recolección de energía, es necesario conocer fundamentalmente:

1. Las necesidades de consumo de energía de la carga.
2. La fuente o fuentes de energía disponible (s) en el medio alrededor de la carga.
3. La capacidad de generación de energía de cada una de estas fuentes.
4. La eficiencia del transductor en la conversión de energía.

El ambiente que rodea a un equipo puede contener diferentes fuentes potenciales de energía, sin embargo sólo aquellas que sean capaces de proporcionar una cantidad mayor a la mínima energía necesaria para que el equipo opere normalmente serán adecuadas. Si la energía es igual a la necesaria para operar el equipo, tampoco sería adecuada, ya que no habría energía suficiente que pueda ser almacenada y que compense las variaciones que se producen naturalmente, además de las pérdidas que pudieran existir, según se ha indicado anteriormente. La ecuación de equilibrio energético general está dada por la ecuación (2.1).

$$E_{TOTAL} = E_{PROM} + E_{ALMACEN} + E_{PERDIDAS} \quad (2.1)$$

Donde:

$E_{TOTAL}$  es la energía total necesaria para operar el sistema, considerada en un periodo determinado,  $E_{PROM}$  es la energía promedio consumida por la carga en el periodo de tiempo considerado,  $E_{ALMACEN}$  es la energía necesaria para cargar el almacén de energía en el tiempo considerado y  $E_{PERDIDAS}$  representa las pérdidas energéticas debidas a fugas, acoples de impedancia, etc.

La energía ( $E$ ), en Joules, se define, en forma general, de acuerdo a la ecuación (2.2).

$$E = \int P(t)dt \quad (2.2)$$

Donde  $P$  es la potencia en Watts. En otras palabras, la energía es el área bajo la curva de la potencia consumida o generada por unidad de tiempo. Es muy importante recalcar en este punto que la energía consumida por la carga normalmente es extraída del almacén, inclusive cuando la energía ambiental existente fuese suficiente para alimentar la carga directamente. Para asegurar la operación del sistema, debe cumplirse que la energía almacenada sea suficiente para compensar las fugas y el consumo instantáneo de la carga, por lo que todo el tiempo debe cumplirse la condición de la ecuación (2.3).

$$B_o + \eta \int_0^T [P_s(t) - P_c(t)] dt - \int_0^T P_{fuga} dt > 0 \quad (2.3)$$

Donde  $B_o$  es el nivel inicial del almacen de energía,  $P_s$  es la potencia colectada,  $P_c$  es la potencia consumida y  $P_{fuga}$  es la potencia representativa de las fugas en el sistema y  $\eta$  es la eficiencia total del almacén de energía.

Es claro que mientras mayor sea el periodo de consumo de potencia, la energía necesaria será mayor, por ello es importante definir también el ciclo de trabajo de la carga ( $dc$ ), el cual especifica, dentro de un periodo de tiempo determinado, el consumo promedio instantáneo de la carga. El ciclo de trabajo está dado por la ecuación (2.4).

$$dc = \frac{t}{T} \times 100 \quad (2.4)$$

Donde:

$T$  = Periodo total de tiempo considerado para el análisis de consumo de energía

$t$  = Duración del máximo consumo

Esta definición es muy importante debido a que las cargas asociadas con aplicaciones para recolección de energía típicamente operan con ciclos de trabajo muy pequeños (muchas veces menores al 1%) respecto al periodo  $T$  considerado, ya que la mayor parte del tiempo se encuentran en un modo de bajo consumo (sleep o standby) con la finalidad de ahorrar energía.

Los mayores valores de potencia consumida ocurren en espacios de tiempo cortos  $t$  dentro de periodos  $T$  normalmente largos. Por ejemplo, si un registrador de datos requiere de un tiempo  $t$  medido en micro o milisegundos para leer y guardar un registro en memoria cada  $T$  minutos típicamente, más del 90% el dispositivo permanecerá consumiendo poca energía. Por otro lado, a diferencia de las aplicaciones convencionales y debido a los bajos niveles de energía disponibles, el hecho de que exista un consumo de energía diferente de cero, por muy pequeño que sea, es un aspecto muy importante de considerar. Supongamos que el consumo en modo de bajo consumo de un datalogger es, en promedio, de  $100 \mu\text{W}$  instantáneos. Esto significa que durante 24 horas consumirá el equivalente a  $2400 \mu\text{Wh}$  ( $2.4 \text{ mWh}$ ) aún si no está programado para llevar a cabo alguna otra operación. Si el equipo de este ejemplo fuera alimentado a través de energía solar, el transductor debería recabar, durante un periodo de 5 horas (horas de disponibilidad solar promedio en el caso de México), esta misma cantidad de energía únicamente para asegurar la operación mínima del equipo, suponiendo que toda la potencia es transferida hacia el almacén de energía y no hay pérdidas. A esta operación básica habrá que agregar la energía consumida durante el registro de datos, envío de información vía radio, etc. Para [Harb, 2011], el ciclo de trabajo para algunas fuentes para recolección de energía, depende fundamentalmente del periodo de tiempo en el que hay oportunidad de coleccionar y almacenar la energía disponible. La tabla 2.2 muestra un comparativo de éste tiempo, relativo a la densidad de potencia y voltajes generados.

Para cualquier aplicación, siempre será necesario analizar primero el sitio donde se pretende realizar la instalación del equipo, determinar los horarios de disponibilidad de la energía a partir de información preferentemente estadística en periodos cortos y largos si es posible e identificar potenciales fallas en el suministro. También será necesario conocer el ciclo de trabajo de la carga para cada operación (arranque/despertar, picos de consumo, comportamiento promedio, etc). Con todos estos datos podrá hacerse una aproximación al tiempo máximo de autonomía y dimensionar así el almacén de energía y las estrategias de operación.

**Tabla 2.2: Transductores y tiempos disponibles para coleccionar energía**

Tecnología	Voltaje	Densidad de potencia	Tiempo disponible para coleccionar y almacenar energía
Impacto directo (piezoeléctrico)	Alto	Alta	Bajo
Vibración (piezoeléctrico)	Alto	Alta	Medio
Vibración (electromagnético)	Bajo	Media	Medio
Solar (una sola celda)	Bajo	Muy Alta	Variable
Termoeléctrico	Muy Bajo	Alta	Alto
RF	Medio/bajo	Baja	Alto
Inducción (de la línea de potencia)	bajo	Media	Alto

## 2.2. Fuentes de energía y transductores

Para extraer energía de una fuente en particular, actualmente se depende del transductor utilizado para llevar a cabo la conversión a electricidad. En los siguientes párrafos se describen las fuentes energéticas más representativas del tema de acuerdo a la información consultada.

### 2.2.1. Vibracional

Las vibraciones mecánicas son de gran interés para muchos investigadores, en especial cuando los transductores utilizados son del tipo piezoeléctrico. Esta línea de investigación, de acuerdo a la información consultada, es impulsada sobre todo para aplicaciones militares y se encuentra ampliamente reportada, siendo, quizá, la más representativa relacionada con el concepto de recolección de energía. Estas vibraciones pueden provenir de diversos orígenes, como la vibración parásita de maquinaria industrial, tráfico vehicular, tráfico peatonal, movimiento del cuerpo, flujo de fluidos como vapor y agua, etc. Los aspectos más importantes a considerar son la frecuencia de oscilación y la amplitud de la misma (expresada como aceleración en  $m/s^2$  ó en g, que es una medida que toma como referencia la aceleración de la gravedad, donde  $1g = 9.8 m/s^2$ ). Estos valores típicamente se reportan como valores RMS. Las vibraciones de estructuras como puentes y edificios, también se han planteado como fuentes posibles de vibración, aunque su amplitud tan reducida dificulta su empleo.

La generación por vibraciones presenta diversos resultados, por ejemplo [Sodano & Inman, 2004] estiman que se deberían poder generar de  $50\mu W$  a  $1 mW$  a niveles de vibración tan

bajos como  $0.75 \text{ mm/s}^2$  (aproximadamente  $0.075\text{g}$ ) con una frecuencia de  $60 \text{ Hz}$ ; en la práctica, se han obtenido resultados menores debido principalmente a que el transductor debe resonar mecánicamente con la fuente de vibración; en la práctica esto ha resultado muy difícil lograr, debido a la forma en la que se acopla el transductor con la fuente y a las posibles variaciones en las direcciones de la vibración.

Por otro lado, el potencial estimado de generación de energía por vibraciones generadas en un edificio típico (tráfico, aire acondicionado, tuberías, pequeños electrodomésticos) proviene de vibraciones típicamente con aceleraciones de  $2.2 \text{ m/s}^2$  ( $0.23 \text{ g}$ ) a una frecuencia de  $60 \text{ Hz}$  de acuerdo a [Roundy et al, 2008], ya que muchos equipos se vuelven mecánicamente resonantes a la frecuencia de la alimentación eléctrica de CA [Adaptivenergy, 2009].

Respecto a los vehículos automotores, [Adaptivenergy, 2009] ha estimado que en el exterior de los vehículos la vibración es más alta que en el interior y se centra alrededor de los  $10 \text{ Hz}$  a  $15 \text{ Hz}$ , con aceleraciones de alrededor de  $0.1 \text{ g}$  (rms). La vibración interna cambia mucho en su frecuencia debido a los materiales de alfombras, tableros y otros aditamentos diseñados precisamente para disminuir las vibraciones hacia el pasajero y otorgarle más confort, pero consideran que oscila entre los  $0.02$  y los  $0.025 \text{ g}$  (rms) de amplitud.

Adaptar generadores por vibración al movimiento del cuerpo humano también ha despertado el interés de los investigadores, como el caso de [Mathew, 2004], donde se construyeron insertos para zapatos capaces de generar  $8.4 \text{ mW}$  bajo condiciones de caminado normal. De acuerdo a [Riemer & Shapiro, 2011], un trabajo desarrollado por el *Massachusetts Institute of Technology* en 1995 determinó que la capacidad del ser humano para generar energía útil es menor a  $100 \text{ Watts}$ , pudiendo obtenerse hasta  $67 \text{ Watts}$  en una persona promedio de  $68 \text{ Kg}$  a paso ligero, levantando el pie  $5 \text{ cm}$  del suelo. Debido a que los seres humanos pasamos mucho tiempo caminando, esta puede ser una excelente opción para generar energía. [Eggborn, 2005] indica que con  $52 \text{ Kg}$  de peso, una persona pequeña puede generar hasta  $5 \text{ W}$  útiles, a la misma frecuencia de  $2$  pasos/segundo. La implementación de esta modalidad no ha sido sencilla, pues es necesario lograr portabilidad, independencia y sobre todo, no interferir con los movimientos normales del cuerpo.

Además del movimiento de los miembros del cuerpo, otros enfoques incluyen la potencia utilizada para ventilación pulmonar (estimada entre 0.1 en reposo y 40 W con alta agitación), de acuerdo a [Eggborn, 2005]. Es importante aclarar que tanto en este como en todos los movimientos relacionados con la fisiología humana, solo una parte de la energía generada puede utilizarse para generar energía útil; por ejemplo, en este último caso se considera que solo es posible derivar 5 mW sin afectar la respiración, pues al esfuerzo normal, habrá que agregarle el peso del sistema de recolección de energía y la energía mínima para operación. Experimentalmente, estos autores obtuvieron solamente 17  $\mu$ W, pues existe aún una serie de obstáculos a vencer: pérdidas por rozamiento, acople mecánico deficiente, dirección variante del sentido del movimiento, etc.

El mejor resultado reportado en la bibliografía consultada [Niu et al, 2006] fue de 80 mW, donde se emplearon generadores electromagnéticos que funcionan en base a masas inerciales. Estos son los transductores más eficientes debido a que han existido y se han desarrollado tanto motores como generadores eléctricos de diversas potencias y tamaños a lo largo de muchos años. El inconveniente de esta solución es que este tipo de generadores tienden a ser pesados, voluminosos y están sujetos a mayor desgaste.

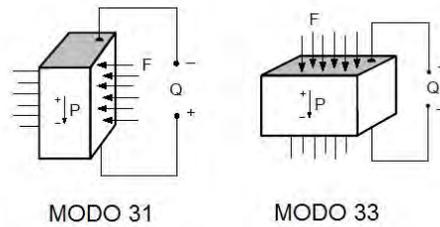
En cuanto a los transductores de vibraciones, esencialmente se han identificado tres diferentes tipos para convertir energía vibracional en eléctrica:

- Piezoeléctricos
- Electrostáticos
- Electromagnéticos

**Piezoeléctricos.** La conversión de energía mediante transductores piezoeléctricos es el tema que con mayor frecuencia aparece en las referencias relacionadas con recolección de energía. Los elementos piezoeléctricos se basan en cristales con celdas unitarias eléctricamente asimétricas, que producen un voltaje cuando se aplica una fuerza mecánica en una dirección determinada. El voltaje generado depende de:

1. Las dimensiones y forma del material.
2. La respuesta del material a la acción mecánica.
3. La dirección en la que se aplica la fuerza.

La designación para elementos piezoeléctricos se denota por los llamados “modos ij”, donde i es la parte vectorial correspondiente a la respuesta eléctrica y j a la excitación mecánica, de modo que un cristal piezoeléctrico en modo 31 significa que, al aplicar fuerza mecánica perpendicular al eje i mecánico, se produce un campo eléctrico perpendicular a los 3 ejes ortogonales eléctricos (i, j y k), como muestra la figura 2.1, donde también se muestra un cristal en modo 33.



**Figura 2.1. Modos ij 31 y 33 para un transductor piezoeléctrico.**

La direccionalidad es sumamente importante, porque determina el comportamiento a nivel macro del cristal piezoeléctrico. Un cristal en modo 33 puede generar energía cuando se le aplica fuerza mecánica en cualquier dirección perpendicular a los ejes mecánicos, pero producirá menor salida eléctrica que un cristal en modo 31, ya que su estructura está menos “enfocada”; por esta razón, se prefieren entonces materiales que presenten un módulo de Young bajo. El *módulo de Young* ( $Y$ ) es la relación entre esfuerzo aplicado (stress, en unidades de presión) y la deformación lograda (strain) y está dado por la ec. (5):

$$Y = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{deformacion}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F / A_0}{\Delta L / L_0} = \frac{FL_0}{A_0\Delta L} \quad (2.5)$$

Donde:

$F$  = Fuerza de tensión aplicada

$A_0$  = Área original del material antes de aplicarle el esfuerzo

$L_0$  = Longitud original del material antes de aplicarle el esfuerzo

$\Delta L$  = Cambio en la longitud

Un valor del módulo de Young reducido significa, por lo tanto, que se requiere menos esfuerzo para provocar una deformación más significativa y por lo tanto, un mayor voltaje. La mayoría de los metales son lineales (presentan un módulo de Young constante) y son **isotrópicos** (se deforman en cualquier dirección), mientras que los **anisotrópicos** tienen direcciones de deformación “preferentes”. Este es el caso de los materiales piezoeléctricos, por esta razón, la carga y el voltaje generados en un material de este tipo, además de la cantidad de fuerza aplicada, son funciones directas de la geometría del material y la dirección en la que se aplica fuerza.

A frecuencias menores o iguales a su frecuencia de resonancia, un cristal piezoeléctrico se comporta como un capacitor de placas paralelas de capacitancia constante. A frecuencias más altas, su capacitancia se verá incrementada [Shenck, 1999]. Para obtener la máxima potencia disponible, la fuerza aplicada deberá corresponder a esta frecuencia resonante, la cual depende de las propiedades mecánicas del material así como del acople mecánico entre la fuente de vibración y el transductor. Normalmente, para las aplicaciones de Recolección de energía, los cristales operarán a frecuencias por debajo de la de resonancia.

El modelo capacitivo se muestra en la figura 2.2, donde la energía generada se modela como una fuente de carga  $q_p(t)$  (producida por la deformación mecánica), una capacitancia  $C_p$  que retiene la carga generada y un resistor de auto descarga  $R_d$  que normalmente tendrá un valor del orden de varios Mega Ohms.

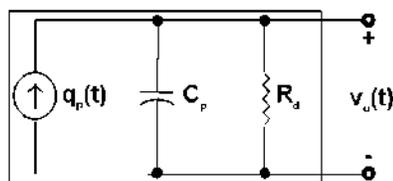


Figura 2.2. Modelo capacitivo de un transductor piezoeléctrico

Los dispositivos piezoeléctricos generan voltajes muy altos, del orden de decenas a cientos de volts, por lo que valores como 100, 200 o 400 Volts son muy comunes; este voltaje estará disponible a la salida  $V_o(t)$  como voltaje a circuito abierto; sin embargo, la carga  $q_p(t)$  generada es extremadamente pequeña, del orden de sólo unos cuantos Coulombs. Esto significa que el valor de  $C_p$  también es muy pequeño, del orden de los nF o pF, de acuerdo a la relación dada por la ecuación (2.6):

$$C = \frac{q}{V} \quad (2.6)$$

Donde:

$C$  = es la capacitancia en Faradios

$q$  = es la carga generada en Coulombs

$V$  = es el voltaje generado

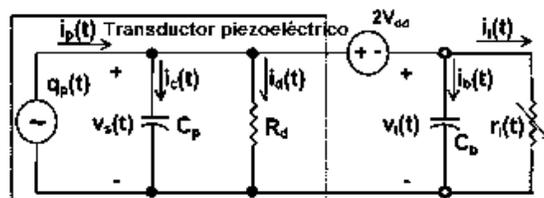
La energía almacenada en un capacitor está dada por la expresión de la ecuación (2.7)

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.7)$$

De manera que, aunque los voltajes generados son altos, la energía disponible es baja y la potencia generada por unidad de tiempo es apenas del orden de unos cuantos nW ó  $\mu$ W. En resumen, el modelo muestra que un transductor piezoeléctrico, a frecuencias de excitación mecánica por debajo de su frecuencia de resonancia, se comporta eléctricamente como una fuente casi puramente capacitiva, de alto voltaje y con una alta impedancia de salida.

Como ya se ha mencionado, la excitación mecánica para estos transductores consiste en vibraciones que presentan crestas y valles que se convertirán en formas de onda de voltaje con valores tanto positivos como negativos. Para aprovechar esta energía de la mejor manera posible, es necesario rectificar esta salida y transferirla a un capacitor de almacenamiento de mayor capacidad, desde donde puede ser aprovechado por la carga.

La figura 2.3 muestra el modelo del transductor conectado a una etapa rectificadora de onda completa (representada como una caída de voltaje de  $2V_{dd}$ , considerando que 2 diodos conducen al mismo tiempo), un capacitor de almacenamiento  $C_b$  y un resistor de carga variable ( $r_l$ ):



**Figura 2.3. Modelo eléctrico de transductor piezoeléctrico, rectificador de onda completa y carga.**

Es importante recalcar varios aspectos de la figura anterior:

- El voltaje realmente disponible a circuito abierto parecería ser  $V_i(t)$ , es decir, el voltaje generado por el transductor menos la caída de voltaje debida al rectificador en puente; sin embargo, esto no es cierto, debido a la presencia de  $C_b$ . Inicialmente, será necesario aplicar varios pulsos de corriente ( $i_b$ ) para cargar al capacitor  $C_b$  a un cierto valor de umbral, a partir del cual se pueda suministrar energía a rl.
- El capacitor  $C_b$  (de almacenamiento) se carga a través del capacitor del transductor  $C_p$ , es decir que se transfiere energía de un capacitor a otro. Como los voltajes son altos, no habrá problema para que los diodos del puente rectificador entren en estado de conducción, aunque la rectificación presentará algunos problemas debido a los bajos niveles de corriente circulante.
- La relación  $C_b/C_p$  típicamente es del orden de  $10^3$  o incluso mayor si el capacitor de almacenamiento es de muy alta capacitancia, que es necesario si la carga presenta un fuerte consumo de corriente, por lo que cada pulso de corriente  $i_b$  generado por  $dq_p/dt$  producirá a su vez un incremento en el voltaje del capacitor  $C_b$  proporcional a esta relación. Puesto que  $i_b = CdV/dt$  y ya que  $i_b$  es muy pequeña, un capacitor grande presentará poca variación de voltaje ( $dV/dt$ ); es decir que el capacitor más grande tardará en cargarse varios ciclos de carga del capacitor pequeño, en incrementos dados por  $C_b/C_p$ , esto significa que toda la potencia no está disponible para la carga inmediatamente, pues primero debe “llenarse” ó cargarse  $C_b$  a un valor adecuado.
- De lo anterior, se puede deducir que este enfoque “limita” la acción de la fuente piezoeléctrica, cuya naturaleza es generar altos voltajes. Al limitar el voltaje en cada ciclo, reduciendo su valor, se limita también la energía disponible y no existe la máxima transferencia de potencia mientras el capacitor de almacenamiento no esté plenamente cargado.

La transferencia directa de la carga de un capacitor pequeño a otro más grande presenta una gran cantidad de pérdidas, el siguiente análisis explica esta situación: Se asume un capacitor  $C_1$  cargado inicialmente a un valor  $V_o$  y con una carga  $q_o$ . Al conectar en paralelo un capacitor  $C_2$ , la carga  $q_o$  se dividirá entre ambos capacitores, de manera que si  $q_1$  es la carga de  $C_1$  y  $q_2$

la carga de  $C_2$  una vez conectados y  $V_f$  es el voltaje final en ambos capacitores, se obtiene (2.8).

$$\begin{aligned}
 q_0 &= q_1 + q_2 \\
 q_0 &= C_1 V_0 \\
 q_1 &= C_1 V_f \\
 q_2 &= C_2 V_f \\
 C_1 V_0 &= C_1 V_f + C_2 V_f \\
 C_1 V_0 &= V_f (C_1 + C_2) \\
 V_f &= V_0 \frac{C_1}{C_1 + C_2}
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Si la diferencia de capacitancias es muy grande, el voltaje  $V_f$  disminuye considerablemente. Para el caso de  $C_p$  y  $C_b$ , se puede ver que el valor de  $V_f$  será muy pequeño, pues la relación entre ellos es muy alta. En otras palabras, la carga inicial se distribuye entre los capacitores y por lo tanto, la energía disponible será menor, de acuerdo a la ecuación (2.9):

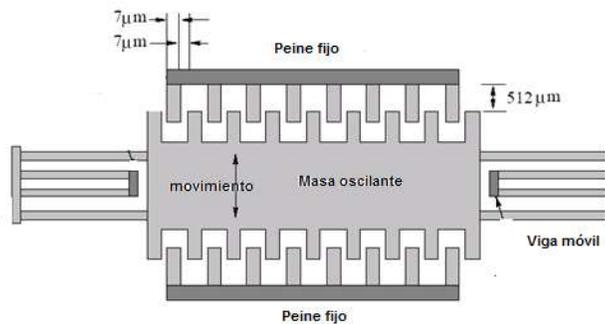
$$\begin{aligned}
 E_0 &= \frac{1}{2} C_1 V_0^2 \\
 E_F &= \frac{1}{2} C_1 V_f^2 + \frac{1}{2} C_2 V_f^2 = \frac{1}{2} V_f^2 (C_1 + C_2)
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

La carga directa, por lo tanto, limita la acción de la fuente piezoeléctrica, pues no permite que alcance su máximo antes de ser descargada. La manera mas eficiente de transferir energía de un capacitor pequeño (transductor) a un grande (de almacenamiento) es permitiéndole al primero alcanzar su máximo voltaje y hasta entonces, extraer la carga por decaimiento exponencial del voltaje.

Existe una gran cantidad de literatura sobre el modelado de transductores piezoeléctricos, sin embargo, en la mayoría de los trabajos reportados, el comportamiento es bastante alejado de los resultados prácticos en aquellos trabajos donde se hicieron pruebas experimentales, los cuales son muy escasos, siendo la mayoría de ellos orientados hacia la simulación. En general, se detecta que aún quedan por desarrollar materiales con mayor eficiencia así como mecanismos que auxilien en la sintonización del transductor con la fuente de vibración. El rango dinámico es muy reducido, siempre existirá una frecuencia central con poco ancho de

banda, siendo las frecuencias típicas de 60 Hz y múltiplos [Kompis, 2008] y en la mayor parte de los casos, la sintonización del generador con la fuente de vibración es bastante complicada [Sodano & Inman, 2004].

**Transductores electrostáticos.** Este es un método para convertir la energía ambiental vibracional en energía eléctrica utilizando un capacitor variable tipo MEMS (Micro Electro Mechanics). Este capacitor tiene forma de “peine” donde los dientes embonan unos dentro de otros, formando un capacitor variable. La figura 2.4 muestra un esquema del dispositivo.



**Figura 2.4. Esquema de un generador electrostático.**

El mecanismo general requiere aplicar una carga inicial a las placas del mismo y luego a través de la vibración de las mismas, la energía mecánica se puede convertir en energía eléctrica que puede ser utilizada por una carga. Existe una oblea base, la cual se une a la masa central mediante un sistema de resortes. Cuando la vibración se aplica al sistema, la inercia de la masa causa que los dientes del peine estacionario se muevan hacia delante y atrás; los resortes solo permiten el movimiento en una sola dirección. Los valores de capacitancia máxima y mínima dependen del número de dedos del peine, el traslape del área superficial de los dedos entrelazados y el espaciamiento máximo y mínimo logrado con la vibración. Los dedos del peine llevan un recubrimiento de teflón para reducir el desgaste.

En realidad esta estructura crea dos capacitores variables simétricos (uno por peine), de manera que cuando un capacitor se mueve a la máxima capacitancia, el otro estará a la mínima, creando un desfase de 180 grados. El proceso de generación de energía inicia con uno de los capacitores precargado a un valor de voltaje (esta es una desventaja) cuando la distancia

entre los dientes del peine es mínima (máxima capacitancia), debido a que la capacitancia es constante en este momento y el voltaje inicial  $V$  también lo es, la carga producida  $Q$ , en Coulomb, está dada por la ecuación (2.10).

$$Q = CV \quad (2.10)$$

Cuando las placas del generador se mueven, alejándose unas de otras y por lo tanto disminuyendo la capacitancia, puesto que la carga disponible solamente es la generada en la etapa anterior y la capacitancia ha disminuido, la única forma de mantener el equilibrio es que el voltaje  $V$  se incremente, de manera que con el movimiento se obtiene una ganancia de voltaje. Cuando la capacitancia es mínima, el voltaje generado será máximo. La energía de entrada al sistema está dada por (2.11).

$$E_{in} = \frac{1}{2} C_{max} V_{max}^2 \quad (2.11)$$

Y la energía ganada está dada por (2.12).

$$E = \frac{1}{2} (C_{max} - C_{min}) V_{max}^2 \quad (2.12)$$

Aunque existen algunos prototipos de estos generadores, la cantidad de potencia que pueden suministrar (en el orden de solo unos cuantos  $\mu W$  en el mejor de los casos) los hace poco prácticos, aún para aplicaciones de ultra bajo consumo de energía, sin embargo, es un tema sobre el cual se continúa investigando, ya que su principal ventaja es que al estar fabricados como MEMs, los movimientos son muy pequeños y es posible operar a frecuencias mucho mas altas que cualquier dispositivo piezoeléctrico o electromagnético.

**Transductores electromagnéticos.** Estos transductores tienen el gran inconveniente de ser relativamente voluminosos y pesados, aunque presentan densidades de energía altas. La idea fundamental es transformar el movimiento vibratorio u oscilatorio en movimiento lineal o circular a través de algún mecanismo, formando una especie de rotor que al cortar líneas de campo magnético pueda generar una fem. Entre los retos a superar con este tipo de generadores están los siguientes:

1. El acople vibracional a mecánico es complejo, ya que se debe convertir un movimiento típicamente oscilatorio en un movimiento giratorio o de desplazamiento lineal, donde siempre se presentan pérdidas por rozamiento, además de que las oscilaciones tienden a ser de baja frecuencia.
2. La propia masa del generador puede afectar la frecuencia de resonancia del sistema, amortiguando la oscilación o incluso limitando el movimiento que produce las vibraciones.
3. Es necesario contar con un campo magnético estable, generalmente construido mediante imanes permanentes. Los materiales con mayores densidades de flujo magnético tienden a ser mas pesados, como los imanes de Neodimio.
4. Este tipo de sistemas requiere de amortiguamiento mecánico, que se traduce igualmente en pérdidas por rozamiento (calor) que disminuyen su eficiencia.
5. Al contar con partes móviles, es mas susceptible a fallo por desgaste y tienden a ser menos robustos para soportar las condiciones del medio.

### **2.2.2. Fotovoltáica**

Las celdas solares eficientes han estado disponibles desde mediados de 1950. La investigación científica del efecto fotovoltaico comenzó en 1839, cuando el científico francés, Henri Becquerel descubrió que una corriente eléctrica podría ser producida haciendo incidir luz sobre ciertas soluciones químicas. El efecto fue observado primero en el Selenio en 1877. En 1954 Chapin, Pearson y Fuller desarrollaron una célula solar de silicio que convertía el 6% de la luz solar en electricidad y esta es la clase de célula que fue utilizada en usos especializados tales como satélites orbitales a partir de 1958.

Las celdas solares de silicio disponibles comercialmente en la actualidad tienen una eficiencia máxima de conversión en electricidad de la luz solar que incide sobre ellas de alrededor del 18% a 20%, a una fracción del precio de hace treinta años. En la actualidad existen una gran variedad de métodos para la producción práctica de celdas solares de silicio y de otros materiales como: seleniuro de cobre e indio, telurio de cadmio, arseniuro de galio, etc. Las celdas solares están formadas por dos tipos de material: silicio tipo p y silicio tipo n, donde la unión queda expuesta a la radiación. Ciertas longitudes de onda pueden contener suficiente

energía para ionizar los átomos en el silicio y el campo interno producido por la unión que separa algunas de las cargas positivas (huecos) de las cargas negativas (electrones libres) dentro del dispositivo fotovoltaico. Los agujeros se mueven hacia la capa positiva o capa de tipo p y los electrones hacia la negativa o capa tipo n. Aunque estas cargas opuestas se atraen mutuamente, la mayoría de ellas solamente se pueden recombinar pasando a través de un circuito externo fuera del material debido a la barrera de energía potencial interno. Por lo tanto si se cierra un circuito, se puede producir una corriente puesto que los electrones libres tienen que pasar a través del circuito para recombinarse con los huecos positivos (sentido real de la corriente).

La cantidad de potencia producida dependerá de:

1. La longitud de onda de la radiación incidente. Dependiendo del tipo de material con el que está fabricada la celda será mayor o menor la respuesta espectral, es por ello que parte del criterio de selección de una celda o transductor fotovoltaico será el rango de sensibilidad a diferentes longitudes de onda (ancho espectral).
2. La intensidad de la radiación incidente o irradiancia, que se especifica en  $W/m^2$ . Por regla general, a mayor irradiancia, mayor corriente y voltaje producidos.
3. El valor Ohmico de la carga.

La energía solar es una de las fuentes para recolección de energía que mayor desarrollo presentan, pues los transductores se han estado mejorando desde hace casi 40 años, siendo los generadores fotovoltaicos actuales capaces de desarrollar densidades de potencia de hasta  $100 mW/cm^3$  [Valenzuela, 2009], [Raju, 2008], es decir, unas 3 veces mayor densidad que la energía máxima teórica para los transductores piezoeléctricos. Una ventaja de estos transductores es que se obtiene corriente directa sin necesidad de conversión eléctrica adicional y no tiene partes móviles, de manera que no existe desgaste. A pesar de estos desarrollos, la eficiencia de las celdas solares es aún relativamente baja según la tecnología empleada para su fabricación, que se listan a continuación.

- Mono cristalinas: 15 a 20 % (celdas tecnológicamente más desarrolladas)
- Poli cristalinas: 10 a 12%
- Silicio amorfo: 8 a 10%, pero tienen la ventaja de ser muy económicas.

Las fuentes de radiación pueden ser naturales ó artificiales, es decir, que puede utilizarse la luz directa del sol ó la iluminación por ejemplo dentro de edificios; en este último caso la respuesta espectral es uno de los factores primordiales a considerar, puesto que típicamente, al ser fabricadas con materiales semiconductores, su respuesta en frecuencia pico normalmente se ubica en la región del infrarrojo cercano (800 a 900 nm). Un punto fundamental a considerar es que las densidades de potencia reportadas por los fabricantes son máximas, especificadas en el punto en el que la radiación solar incidente sobre la superficie de la celda fotovoltaica es la mayor posible (normalmente especificada con la radiación del sol a medio día o similar). Como ya se mencionó anteriormente, la respuesta cambia a diferentes intensidades luminosas. Esta fuente es, quizá, el ejemplo más claro de la variabilidad que existe en cuanto a disponibilidad de la energía para sistemas de recolección de energía, ya que las condiciones atmosféricas influyen drásticamente con el desempeño de la celda.

El modelo de comportamiento se representa por un diodo en paralelo con una fuente de corriente. La ecuación que denota la corriente producida está dada por (2.13):

$$I = I_{sc} - I_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.13)$$

Donde:

$I_{sc}$  es la corriente de cortocircuito especificada a pleno sol o a cierto valor de irradiancia

$k$  es una constante cuyo valor es de  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

$q$  es la carga elemental, de  $1.6 \times 10^{-19} \text{ Coulombs}$

$V$  es el voltaje de circuito abierto de la celda.

$T$  es la temperatura de la celda en Kelvin

El punto de operación de una celda de este tipo puede encontrarse en cualquier punto dentro de estos extremos donde el transductor no tiene carga (circuito abierto) o bien, entrega la corriente máxima a corto circuito; sin embargo, hay que considerar que la resistencia interna es muy variante, en el rango de  $10 \Omega$  a  $10 \text{ K}\Omega$ , dependiendo de las condiciones de iluminación; es por ello que el principal reto es lograr el acople de impedancias entre la celda fotovoltaica y la carga, debido a que el punto de operación se mueve constantemente. puesto que existe un punto de operación óptimo de la celda, la circuitería debe dar seguimiento a la

energía disponible y conservar este punto de operación en la medida de lo posible. Esto se hace manteniendo constante la salida de voltaje de la celda y hace necesaria la circuitería de rastreo de punto de potencia máxima ó MPPT (Maximal Power Point Tracking). Actualmente existen muchos diseños y circuitos para un rastreo muy eficiente, sin embargo, están orientados a elementos para instalaciones fotovoltaicas grandes, y consumen potencias relativamente altas, por lo que no están optimizados para una aplicación de Recolección de energía.

### 2.2.3. Termoeléctrica

Los termo generadores (Thermoelectric Generators o TEGs) se basan en el efecto Seebeck, donde dos materiales diferentes unidos, sometidos a diferentes temperaturas, desarrollan un voltaje proporcional al gradiente o diferencial de temperatura entre sus uniones. El voltaje generado está dado por la ec. (2.14).

$$V = \alpha \Delta T \quad (2.14)$$

Donde:

$\alpha$  Es el coeficiente Seebeck, en V/°C.

$\Delta T$  es el diferencial de temperatura entre los dos materiales, en °C.

Asociado al efecto Seebeck se encuentra el efecto Peltier, que se manifiesta cuando una corriente circula a través de dos materiales diferentes, absorbiendo o produciendo calor en la unión, dependiendo de la dirección del flujo de la corriente. La velocidad a la cual el calor ( $Q_p$ ) es liberado o rechazado está dado por la ecuación (2.15).

$$Q_p = II \quad (2.15)$$

Donde:

$I$  es la corriente a través de la unión

$II$  Es el coeficiente Peliter en Volts

Los dispositivos termoeléctricos actuales se fabrican en conjuntos de pares de materiales semiconductores P y N, semejantes a los termopares utilizados para medición de temperatura. Estos pares P-N se conectan en arreglos eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo, de manera que los voltajes generados, que son del orden de los micro o mili Volts, se hagan

mayores. Típicamente, valores de  $\alpha$  de 150 a 250  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  por cada par significan un dispositivo termoelectrico de buen desempeño. En dispositivos reales, el número de pares puede ser de unos cuantos hasta cientos. La conexión térmica en paralelo mejora la transferencia de calor.

Se utilizan semiconductores porque se necesitan materiales de alta movilidad de portadores, pero con una concentración suficientemente pequeña que permita controlar el flujo de calor. Es por esta razón que los metales, que son los materiales con la movilidad de portadores más alta, no se utilizan para generar energía eléctrica, pues además conducen fuertemente el calor y son difíciles de controlar. El Silicio o Germanio, ampliamente utilizados en semiconductores para electrónica, tampoco son buenos candidatos, pues su conductividad térmica es muy alta. Se utilizan otros materiales como el Bismuto y Telurio para la fabricación de estos dispositivos.

Los módulos termoelectricos se recomiendan cuando se requiere:

- Alta confiabilidad.
- Pequeño tamaño.
- Bajo costo.
- Poco peso.
- Seguridad intrínseca a medios eléctricamente peligrosos.
- Salida directamente en corriente directa.
- Sin partes móviles, no hay desgaste.

Mientras mayor sea el diferencial de temperatura aplicado ( $\Delta T$ ), la respuesta del transductor es mejor, pues la potencia crece en función del cuadrado del gradiente de temperatura [Laird Technology, 2010]. El principal problema con la generación por termoelectricidad es que aunque se producen corrientes relativamente altas (del orden de decenas o centenas de mA), los voltajes son producidos del orden de unos cuantos mV.

#### **2.2.4. Otras fuentes**

Existe una gran gama de fuentes potenciales de energía, como la posibilidad de generación a partir del movimiento de las ramas de los árboles impulsadas por el viento, donde se han determinado potencias viables entre 38  $\mu\text{W}$  y 44.7 mW. [McGarry & Knight, 2011].

Igualmente interesante resulta el planteamiento de la implementación de una Celda de combustible microbiana ó MFC (microbial fuel cel) y sus reacciones electroquímicas en conjunto con la actividad de bacterias naturalmente presentes en el agua para generar energía. El pico de generación de potencia reportado es de 1 mW, con un voltaje de salida de 0.4 V. [Meehan et al 2011].

Otro trabajo reciente [Riemer & Shapiro, 2011] reporta el potencial de generación de energía del cuerpo humano durante el movimiento de articulaciones (energía mecánica) y por pérdida de calor, tanto por conducción como por evaporación; en este último caso, estiman un rango de producción de potencia de 100 a 525 W ya sea por calor sensible (conducción térmica de la piel) ó por calor latente (evaporación por transpiración); este es un planteamiento interesante, ya que indican que es posible generar energía incluso cuando el cuerpo humano se encuentra en reposo. Adicionalmente, sus resultados respecto a la generación mecánica coinciden con otros autores como [Watkins et al, 2005], [Schenck, 1999], [Matheu, 2004] y [Hoang et al, 2009]; adicionalmente, agregan datos para el potencial de generación de energía a partir del movimiento de las rodillas (34 W) y los tobillos (20 W).

### **2.3. Almacenamiento de energía**

Ya se ha mencionado anteriormente que un sistema para recolección de energía debe poseer un almacén que proporcione potencia al dispositivo cuando la energía del medio ambiente sea demasiado baja o esté incluso ausente, también debería acumular gradualmente la energía en exceso del sistema si es el caso. Su capacidad debería ser suficiente para suministrar potencia autónoma aún en el peor caso a pesar de las variaciones de carga, temperatura y humedad. Entre las características a tomar en cuenta para seleccionar el almacén se encuentran:

- Número de ciclos de carga/descarga requeridos por la carga y soportados por el almacén.
- Rangos de temperatura y humedad de trabajo.
- Porcentaje de autodescarga y tiempo en el que ésta ocurre.
- Densidad de energía (J/Kg) que el almacén puede proporcionar.
- Densidad de potencia (W/Kg) que el almacén puede proporcionar.

### 2.3.1. Baterías

La tecnología de baterías a utilizar dependerá de la química de la batería, el perfil de consumo de la potencia, la corriente de recarga necesaria y disponible y el punto específico de cruce costo-eficiencia. Existen dos tipos básicos de baterías: las primarias o desechables, que contienen un nivel de carga predeterminado y una vez agotadas deben descartarse (es el caso de las alcalinas y litio de alta energía) y las secundarias o recargables. Debido a la dinámica de las aplicaciones para Recolección de energía, las secundarias serían las más adecuadas debido a que proporcionan autonomía por mayor tiempo al poderse recargar. Las baterías son el medio de almacenamiento más utilizado, por ello es importante analizar sus ventajas y desventajas y compararlas así con otras opciones. Un factor a considerar en las aplicaciones de Recolección de energía es la llamada carga flotante (trickle charge), que ocurre cuando la batería está prácticamente cargada y sólo se proporciona energía suficiente para que no comience a descargarse. La mayoría de las baterías sólo soportan de 500 a 1,000 ciclos de carga/descarga de este tipo antes de que su integridad se vea comprometida. Esto significa que, además de que las descargas muy profundas no son recomendables para ningún tipo de batería, tampoco lo es mantenerlas en modo de carga flotante. Ambos extremos pueden ocurrir en una aplicación, por ello las baterías pueden tener un tiempo de vida menor al esperado, tal como reportan [Kompis, 2008], para nodos de redes de sensores cuya duración de la batería es menor a la especificada por el fabricante.

La capacidad energética de una batería se especifica en Ah. Para las baterías secundarias, este valor indica la velocidad de carga, también denominada como  $E$ ; es decir que, por ejemplo, una batería con una especificación  $E= 400$  mAh requiere una hora para cargarse si se le aplica una corriente de 400 mA. En la práctica, en realidad el tiempo requerido para cargar una batería es de aproximadamente  $1.5E$ , es decir que para este ejemplo, se necesitaría 1.5 horas para recargarla completamente. En cuanto a la descarga, es difícil predecir la duración real, ya que este valor debe especificarse a una tasa de consumo determinada. Típicamente los consumos en las aplicaciones finales son mucho menores a los de la especificación, así que se esperaría que la duración fuera mayor a la especificada, sin embargo, es un hecho que están expuestos a la humedad y temperatura, implicando variaciones en el comportamiento. Por ejemplo, los efectos de auto descarga se duplican con cada incremento de 10 °C en la temperatura ambiente. Existen diversas tecnologías de baterías secundarias:

**Baterías de Níquel metal Hidruro (NiMH).** Estas baterías requieren carga a corriente constante, pero debe limitarse la temperatura y amplitud de la corriente de recarga para evitar daños por una reacción de recombinación excesiva. No son muy adecuadas para Recolección de energía debido a que tienen una tasa de auto descarga extremadamente alta, llegando a perder del 10 al 15% de su carga 24 horas después de haber sido cargadas, seguida por una descarga del 10 al 30% mensual [Maxwell technologies Inc, 2004]. Adicionalmente, pueden soportar hasta 500 ciclos de carga/descarga, a partir de los cuales la batería comenzará a entregar solo el 80% de su capacidad nominal. El tiempo de vida útil se incrementa si no se permiten descargas tan profundas; esto puede ser difícil de lograr en periodos de baja disponibilidad de energía en el medio ambiente. De acuerdo a [Ragunathan et al, 2005], la eficiencia de carga para una batería de NiMH es del orden del 66%. Además, para mantenerla cargada, se necesita un 2.5% adicional de la corriente de carga para contrarrestar el efecto de auto descarga.

**Baterías de litio-ion.** Ampliamente utilizadas en teléfonos celulares, la auto descarga de las baterías de Li-Ion es del orden del 5% durante las primeras 24 horas posteriores a la carga y de 1 a 2 % mensual posteriormente. Una de sus ventajas es que no presentan efecto memoria. Su principal desventaja es que las pérdidas aumentan proporcionalmente con la profundidad de descarga. En ocasiones los fabricantes especifican capacidades de 500 hasta 1000 ciclos de carga para estas baterías; sin embargo esto solo ocurre si la descarga no es tan profunda. La recarga requiere circuitería especializada, ya que uno de los riesgos del litio es que tiene un punto de fusión bajo (alrededor de 180°C) y una vez en alcanzado este punto, al pasar a fase líquida, es aún más reactivo que en fase sólida, por lo que el control de carga para evitar sobrecalentamiento es crucial: una batería sobrecargada es potencialmente peligrosa, ya que la temperatura se eleva, pudiendo pasar a fase gaseosa, donde puede producirse una explosión. Su voltaje nominal típico es de 3.7 Volts; este nivel puede ser difícil de alcanzar para el caso de algunos transductores que generan bajos voltajes.

Las baterías de litio-ion de película delgada (thin film) son, al parecer, una de las mejores opciones a futuro, ya que han podido alcanzar densidades de hasta 30 mW/cm<sup>2</sup> con poca auto descarga y ciclos de vida relativamente largos (idealmente mayores a 10,000 ciclos de carga),

además de un tamaño más reducido. Tienen la ventaja de tener corrientes de fuga extremadamente bajas, sin embargo, aún no están ampliamente disponibles comercialmente.

### **2.3.2 Supercapacitores**

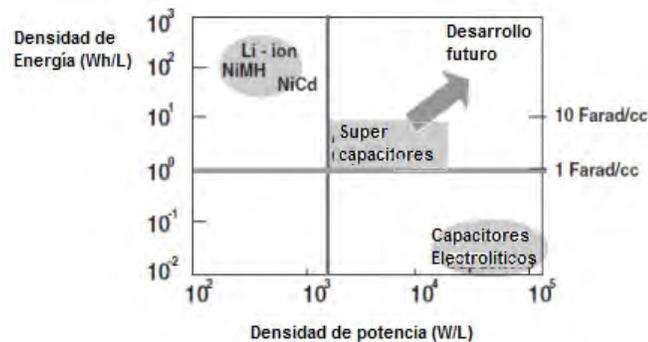
Los capacitores son elementos pasivos que almacenan energía en forma de campo eléctrico. Esta energía puede ser descargada en forma de corriente eléctrica hacia una carga determinada. Teóricamente, el número de ciclos de carga y descarga de un capacitor es de  $10^5$  a  $10^6$  ciclos [Cohen, 2007], [Cooper Bussmann, 2007], contra  $10^3$  para las baterías. Con el desarrollo de nuevos materiales porosos (polvos, aerogeles) que poseen grandes superficies y dieléctricos pequeños, se han podido lograr capacitancias de hasta 100 Faradios por gramo, cuyos voltajes de trabajo son bajos típicamente (el dieléctrico es muy delgado, por ello la ruptura eléctrica ocurre a tensiones mas bajas), raramente excediendo de los 100 V y típicamente en el rango de 2.5 a 5 Volts. Gracias a estos materiales, se forma una doble capa en la interface electrodo/electrolito del capacitor, que se ve reforzada por la aparición de una pseudo capacitancia producida por reacciones redox que ocurren en superficies muy grandes.

Una de las principales ventajas de un súper capacitor es que su funcionamiento no es tan dependiente de la temperatura como en el caso de las baterías, las cuales, aunque puede llegar a operar en rangos mas amplios, producen menos corriente a temperaturas bajas y viceversa, haciendo difícil predecir el desempeño real. Otra de sus grandes ventajas es que se recargan muy rápidamente y soportan millones de ciclos de carga/descarga. Debido a que las baterías funcionan por reacciones electroquímicas de los materiales que forman sus terminales con el electrolito, los ciclos de carga y descarga involucran cambios de fase y otros fenómenos incluyendo elevación de temperatura y gasificación que a la larga son irreversibles, razón por la cual tienen un tiempo de vida limitado, por ello una batería sometida a ciclos frecuentes y/o profundos de carga/descarga se degradará rápidamente. Existen dos conceptos que diferencian el desempeño de una batería respecto de un super capacitor: la densidad de potencia y la densidad de energía, que se explican a continuación:

*Densidad de potencia:* Se expresa en W/Kg, es decir, es la capacidad para entregar energía instantánea (J/segundo/Kg). Típicamente es 5 veces más alta en un super capacitor que en una

batería de plomo-ácido y es la característica más deseable en aplicaciones de alta demanda de corriente en tiempos cortos como puede ser el flash de una cámara o la transmisión de paquetes de datos en tiempos cortos, como en el caso de las redes inalámbricas de sensores.

*Densidad de energía.* Se expresa en Wh/Kg ó J/Kg: Es la capacidad de almacenamiento de energía y típicamente es de aproximadamente 1/3 del valor en un super capacitor que el de una batería de plomo-ácido. La densidad debe ser alta en sistemas orientados a proporcionar energía durante tiempos largos. Por lo tanto, las baterías son más adecuadas en aplicaciones donde se requiere tener una fuente constante de energía, es decir, en dispositivos que están permanentemente alimentados. En cambio, un súper capacitor es más adecuado para proporcionar alta energía durante periodos de tiempo cortos y por lo tanto es mas conveniente para aplicaciones para Recolección de energía. Como referencia, las baterías de litio almacenan unos 1,000 J/cm<sup>3</sup>, mientras que los capacitores cerámicos presentan sólo de 1 a 10 J/cm<sup>3</sup>. Esto significa que los capacitores no pueden almacenar mucha energía, pero la velocidad de transferencia de la energía del capacitor hacia una carga es mucho mejor que la de una batería. Una aplicación basada en súper capacitores para Recolección de energía deberá balancear la existencia de una densidad de energía suficiente a bajo consumo al igual que una buena densidad de potencia en los momentos en que la carga consume picos de corriente. La figura 6 muestra un gráfico comparativo entre tecnologías de baterías y super capacitores en cuanto a densidades de potencia y de energía. La tabla 2.3 muestra un comparativo de los diferentes medios de almacenamiento de acuerdo a [Roundy et al, 2008], donde las densidades de potencia y energía se especifican por unidad de volumen (W/centímetro cúbico y J/centímetro cúbico).



**Figura 2.5. Comparativo de densidades de energía y potencia entre baterías y supercapacitores.**

**Tabla 2.3. Comparativo de densidades de energía y potencia de diferentes medios de almacenamiento**

Tecnología de Almacenamiento	Voltaje (V)	Corriente máxima	Temperatura de operación (° C)		Densidad de energía	Densidad de potencia
			Mínima	máxima		
Baterías primarias de alta capacidad	3.6 a 3.9	10 mA	-40	125	Mediana	Baja
Super capacitor	2.3 a 5.5	10 A	-40	85	Mediana	Alta
Batería secundaria de litio-ion	4.2	200 mA	-20	60	Mediana	Mediana
Batería de película delgada	4.1	30 mA	-20	120	Alta	Baja
Capacitor tradicional	cualquiera	10 A	-55	85	Baja	Alta

A valores de descarga pequeños, los súper capacitores pueden funcionar de manera similar a las baterías, pero hay que considerar que el nivel de voltaje se irá reduciendo paulatinamente, a diferencia de la batería, donde el nivel de voltaje permanece prácticamente constante hasta que se alcanza un punto de descarga importante, a partir del cual el voltaje comienza a disminuir rápidamente. Esto puede compensarse permitiendo que el capacitor almacene voltajes mas altos que el valor nominal. Se debe recordar que para un capacitor, la energía almacenada está dada por (2.7); por lo que, por definición, alcanzando un nivel de voltaje mayor, es posible que el capacitor almacene más energía.

Un factor a considerar es la resistencia serie equivalente (Equivalent Series Resistance) ó ESR. Esta se debe a la construcción interna del capacitor, que agrega un valor resistivo en serie con el capacitor y debe evaluarse porque representa pérdidas por calentamiento y caídas de tensión, que afectan las fluctuaciones de voltaje a través del capacitor durante la carga especialmente, así como la corriente de fuga. La potencia  $P_{loss}$  disipada por un capacitor en corriente directa, ya sea durante la carga o descarga, depende de su componente resistiva, la cual produce calor y está dada por (2.16):

$$P_{loss} = I^2 R_{ESR} \quad (2.16)$$

Donde:

$I$  = Corriente circulando en el capacitor

$R_{ESR}$  = Resistencia serie equivalente del super capacitor

Es decir, que a mayor valor de ESR, las pérdidas por disipación de potencia serán mayores.

Existen otros parámetros a considerar, que se resumen en la tabla 2.4:

**Tabla 2.4. Comparativo de características físicas y eléctricas de medios de almacenamiento**

Parámetro	Batería de litio-ion	Batería de película delgada (thin film)	Super capacitor
Ciclos de recarga	Cientos	Miles	Millones
Auto descarga	Moderada	Despreciable	Alta
Tiempo de carga	Horas	Minutos	Segundos-minutos
Tamaño físico	Grande	Pequeño	mediano
Capacidad energética	2,500 mAh	12-1,000 $\mu$ Ahr	10-100 $\mu$ Ahr
Impacto al medio ambiente	Alto	Mínimo	Mínimo

Puede verse que la autodescarga es más grande en súpercapacitores que en baterías, esto significa que para fuentes de energía cuya disponibilidad en tiempo es demasiado corta, los súpercapacitores pueden no ser una buena opción, a menos que se almacene energía extra, lo cual es difícil por la propia naturaleza de los sistemas de Recolección de energía. En contraste, la relación carga total removida/carga total de recarga es de casi el 99%, es decir que se pierde muy poca energía al cargar y descargar un súper capacitor [Cohen, 2007].

#### 2.4. Acondicionamiento de potencia

Se ha mencionado anteriormente que los transductores para recolección de energía proporcionan niveles de energía bajos, ya sea porque producen voltajes reducidos como en el caso de los transductores termoeléctricos ó voltajes altos pero con corrientes reducidas como en el caso de los transductores piezoeléctricos. Los transductores fotovoltaicos presentan una salida mas balanceada en cuanto a sus niveles de corriente y voltaje, aunque la alta variación de la impedancia de salida hace difícil alcanzar niveles altos de eficiencia.

Conectar directamente la salida de cualquier transductor al almacén de energía o a la carga por lo general no es posible, puesto que la transferencia de energía es inadecuada, como indica (2.9) en el análisis de carga capacitor-capacitor para el caso de los transductores piezoeléctricos. De igual manera, para el caso de los transductores fotovoltaicos, es necesario acoplar la impedancia variante para lograr transferir la mayor cantidad de potencia posible. Para sacar el máximo provecho del transductor, debe existir alguna manera de igualar la

impedancia de salida del transductor con el sistema eléctrico posterior, que normalmente es el almacén de energía. Hay que recordar que muchas veces y dependiendo del tipo de fuente de energía, la impedancia del transductor cambia con las condiciones de operación. Lograr una buena regulación de carga es difícil, típicamente la salida será ruidosa ya que la energía es extraída en paquetes [Deng, 2009] y [Maxim Inc, 2000].

Para la mayoría de las aplicaciones, se sugiere el uso de convertidores de directa a directa (DC-DC). Un convertidor DC-DC funciona como interfase entre dos niveles de corriente directa donde se requiere alta eficiencia. Se les puede considerar como convertidores de impedancia, ya que dependiendo de la topología utilizada, que puede ser buck (reductora) ó boost (elevadora), cumplen con mantener un voltaje de salida a un valor determinado, sin importar el valor del voltaje de entrada, manteniendo la máxima eficiencia posible. En un convertidor DC-DC el voltaje de entrada y la corriente de salida son de alta frecuencia y relativamente libres de rizo, pero hay que considerar que tanto la corriente de entrada como el voltaje de salida presentan un rizo bastante elevado [Ragunathan et al, 2005], el cual debe minimizarse para evitar daños ó funcionamiento incorrecto de la carga.

Aunque existe una gran disponibilidad de convertidores DC-DC, no son adecuados para aplicaciones de Recolección de energía, tanto por los niveles de potencia de entrada como de salida. Normalmente, para su operación se presuponen voltajes de entrada mayores a 1 V y corrientes de al menos 1 mA. Típicamente se usa retroalimentación de corriente, que consumiría gran parte de la energía disponible. Las corrientes quiescentes también son altas para estas aplicaciones, del orden de los mA.

Para otras funciones como la implementación de mecanismos MPPT (Maximal Power Point Tracking) existen también algunas soluciones, pero están diseñados para mayores potencias (en especial para paneles solares por encima de los 3W). Lo mismo ocurre con los circuitos integrados cargadores de baterías, en caso de utilizarlas, que se han diseñado para trabajar a corrientes muy altas para los estándares que se manejan en Recolección de energía y su eficiencia se reduce con corrientes bajas. Las características de los convertidores, dependiendo del transductor de entrada, son las siguientes:

Piezoeléctrico:

- Deben soportar voltajes de entrada muy altos (decenas o cientos de Volts) con salidas a voltajes reducidos, será necesario utilizar un convertidor tipo buck o reductor. La ventaja es que pueden generarse fácilmente voltajes de valor nominal para circuitería electrónica de bajo consumo (de 1.8 V hasta 5.5 V).
- Las corrientes de entrada y retroalimentación deberían ser extremadamente bajas, ya que se generan cargas eléctricas muy pequeñas y por lo tanto las corrientes circulantes también lo serán.

Termoeléctrico:

- Es necesario elevar el voltaje desde valores de unos cuantos mili Volts hasta niveles de al menos 1.8 V. Serán necesarios convertidores tipo boost o elevadores.
- Por la misma razón anterior, el empleo de tecnología CMOs estándar no es adecuada, ya que el voltaje generado no es suficiente para que el semiconductor entre en conducción.
- El arranque o inicio para elevar el voltaje es complicado; requiere de aprovechar la relativamente alta densidad de corriente generada en estos dispositivos a través de algún mecanismo auxiliar.

Fotovoltaico:

- Los voltajes generados pueden ir desde 0.5 V a valores más altos. Puede ser necesario elevar o reducir el nivel del voltaje de salida, dependiendo de la cantidad de radiación incidente. La topología adecuada será la buck-boost, con algún medio para hacer suave la transición entre un modo y otro, sin afectar a la carga.
- La implementación de un mecanismo MPPT es ineludible, si se quiere alcanzar la máxima eficiencia.

Para todos los casos, es deseable que el convertidor cumpla con las siguientes características:

- Corrientes de operación mínimas (Corriente quiescente), del orden de los  $\mu\text{A}$  ó  $\text{nA}$ .
- Alta eficiencia en la conversión. Es fundamental perder la mínima energía posible, que es escasa.
- Protecciones contra sobre corriente y sobrecarga térmica. Aún cuando las corrientes promedio son reducidas, pueden existir picos de corriente muy altos, sobre todo

durante el arranque de transmisores y transceptores de radio, que pueden durar varios milisegundos y generar calor excesivo o altas corrientes de cortocircuito en caso de falla.

- Voltaje de arranque y voltaje mínimo de operación lo más bajos posible. La mayoría de los convertidores tiene un nivel de voltaje mínimo a partir del cual puede comenzar a operar (voltaje de arranque). Una vez operando, este nivel de voltaje puede reducirse hasta cierto punto donde dejará de funcionar (voltaje mínimo de operación); en este caso, habrá que volver a alcanzar el voltaje mínimo de arranque para encenderlo.
- Desconexión o aislamiento de la salida del convertidor en caso de que no se cumplen las condiciones de entrada mínima. Sin este mecanismo, la poca energía colectada sería consumida por el convertidor y por la carga, que funcionará erráticamente, pudiendo dañarse.
- Buena regulación de carga, que se traduce en un mínimo rizo del voltaje de salida

La tabla 2.5 muestra un comparativo con algunos convertidores DC-DC cuyas características los hacen útiles para aplicaciones relacionadas con Recolección de energía. Puede verse que en el periodo comprendido entre 2005 a 2008 no se observa reducción en el voltaje mínimo de entrada necesario para operar el convertidor. La principal aplicación es para dispositivos alimentados a baterías. Con la aparición del concepto de Recolección de energía y el interés por desarrollar tecnología relacionada, es que se comenzaron los esfuerzos por diseñar convertidores que puedan funcionar con los niveles de potencia necesarios [Kadirvel et al, 2012]. No se encontró información acerca de la tecnología empleada por los fabricantes para alcanzar estos niveles.

**Tabla 2.5. Comparativo de convertidores comerciales para recolección de energía.**

MATRICULA	FABRICANTE	TIPO	Voltaje de arranque (V)	Rango de voltajes de entrada (V)	Isal (A)	Iquiescente ( $\mu$ A)	Eficiencia (%)	Disponible en (año)
LTC3421	Linear technology	Boost	1	0.5 a 4.5	1.5	12	96%	2003
LTC3425	Linear technology	Boost	1	0.5 a 4.5	1	12	95%	2003
NPC1450A	ON semiconductor	Boost	0.9	0.6 a 6	0.058	20	85%	2003
LTC3429	Linear technology	boost	0.85	0.5 a 4.4	0.6	20	96%	2004
L6920D	SGS Thomson	boost	1	0.6 a 5.5	1	18	85%	2005
TPS61200	Texas instruments	Buck/boost	0.5	0.3 a 5.5	0.6	55	90%	2008
LTC3105	Linear technology	Boost	0.25	0.225 a 5	0.4	24	75%	2010
LTC3108	Linear technology	Boost	0.025	0.025 a 0.5	0.007	0.4	30%	2010
MAX17710	Maxim	Boost	0.95	0.65 a 1	0.2	0.6	No especificado	2011

Existen también diversos esfuerzos reportados en publicaciones especializadas, donde el diseño del convertidor se llevó a cabo mediante dispositivos comerciales de bajo consumo, aunque los voltajes mínimos de entrada reportados son de alrededor de 400 mV [Dwari et al, 2010] y [Chen et al, 2011]. Para otros autores, la solución es la implementación del convertidor en circuito integrado, como en el caso de [Carmo et al, 2010], que mediante el diseño de un circuito CMOS de 0.35  $\mu$ m lograron voltajes de entrada de 0.4 a 4V. El nivel mas bajo reportado por este medio es el de [Carlson et al, 2010], quienes diseñaron un convertidor en proceso CMOS de 0.13  $\mu$ m, el cual opera con voltajes de entrada de 20 a 250 mV con un voltaje de salida a 1 V regulado. La eficiencia máxima del circuito se estimó en 46%. El inconveniente es que requiere un impulso mecánico inicial para arrancar el convertidor.

Se puede ver que todos son desarrollos recientes, tanto en el terreno de investigación como en el comercial, es por esta razón que antes de estos años, el desarrollo relacionado con el acondicionamiento de potencia respecto al tema de recolección de energía se redujo. Puede verse también en la tabla anterior que la eficiencia por debajo de 0.5 V aún es relativamente baja. Durante este período, se generó mucho trabajo acerca de métodos de administración de la energía y mejora de la densidad de potencia y eficiencia en transductores, así como intentos de

estandarización, comparativos y predicciones de desarrollo, como en el caso de [Kompis, 2008] ó [Morais et al, 2008].

## **2.5. Conclusiones del capítulo**

De la información de este capítulo y del anterior, se deduce que existen varios aspectos fundamentales que rigen el diseño y la aplicación de los conceptos de Recolección de energía.

1. La fuente o fuentes de energía disponible, en cuanto a la potencia útil y tiempo de disponibilidad.
2. El transductor, en cuanto a su eficiencia y respuesta dinámica. La gran mayoría de los transductores se encuentran actualmente en fase de desarrollo y mejoramiento y no existe estandarización aún en cuanto a la definición de sus parámetros de prueba y desempeño.
3. El nivel de potencia consumido, el ciclo de trabajo y las situaciones de alto consumo predecibles en algún grado de la carga.
4. El tamaño y eficiencia del almacén de energía, que debe soportar descargas profundas y recargas continuas sin que su desempeño se vea afectado.
5. El acondicionamiento de potencia, que debe balancear una alta eficiencia, potencia de salida, protecciones y consumo mínimo.

Considerando estos puntos, en el siguiente capítulo se definirán los aspectos de diseño del sistema.

# CAPÍTULO 3

## DISEÑO DEL SISTEMA

### 3.1. Calor y energía solar térmica.

Como fuente de energía térmica se decidió utilizar la energía solar debido a las siguientes razones:

- Amplia disponibilidad, pues se encuentra presente a todo lo largo del país.
- Es considerada como una energía renovable, con prácticamente cero impacto ambiental.
- Existe información estadística, aún cuando para algunos lugares es escasa o no muy confiable [Fernández y Estrada-Cajigal, 1983].
- La radiación solar tiene la particularidad de producir tanto radiación visible como calor, por lo que es factible implementar sistemas híbridos a partir de la misma fuente de energía. México se considera un país privilegiado en cuanto a disponibilidad energética solar [Collares y Pereira, 2003].

Es importante resaltar que al plantear e iniciar este trabajo de tesis, no se encontraron referencias de publicaciones relacionadas con la radiación solar como fuente térmica para aplicaciones de recolección de energía, aunque sí existen trabajos previos enfocados en la simulación y mejora de los transductores.

**Radiación solar.** La radiación solar que alcanza la superficie terrestre está compuesta en un 92% por radiación infrarroja y luz visible, de la cual el 46% corresponde al rango visible y 46% al infrarrojo. El 8% restante corresponde a la radiación ultravioleta [Sanchez, 2008]. La cantidad de energía solar incidente sobre una superficie es llamada irradiancia y se mide en  $W/m^2$ . Esencialmente se estudia la radiación incidente sobre superficies horizontales e inclinadas y es el resultado de la suma de 3 componentes.

1. La radiación directa, es decir, los rayos que inciden en forma completamente perpendicular a la superficie de captación.
2. La radiación difusa, que es aquella que ha sido dispersada por las nubes u otros efectos atmosféricos, se puede considerar como radiación directa “filtrada” a través de las nubes y la atmósfera.
3. La radiación de albedo, que proviene de reflexión de la radiación al incidir sobre superficies como el suelo y por lo tanto, se recibe de forma indirecta.

Para lograr captar la mayor cantidad de radiación posible, es necesario inclinar la superficie captadora con la misma latitud del sitio y orientarlo hacia el sur en el caso del hemisferio norte, como corresponde a México, de esta manera la radiación directa es la máxima posible. En el caso de la Ciudad de Morelia, donde se llevó a cabo la experimentación, la latitud es de 19.7 °, por lo tanto esta tendrá que ser la inclinación para un captador inclinado. Idealmente, un captador solar que sigue o rastrea el movimiento solar a lo largo del día proporciona la mayor cantidad de energía posible, sin embargo, debido a la naturaleza del trabajo, un sistema de rastreo no es una opción viable, por ello sólo se considerará el caso para superficies horizontales fijas horizontales e inclinadas.

Para evaluar la máxima cantidad de energía disponible en un lugar con una latitud determinada, se utiliza a menudo la unidad llamada “hora pico solar”, que representa el número de horas al día en el que cada  $m^2$  de superficie captadora recibe de modo constante una energía equivalente al de una fuente de 1 KW de potencia luminosa. El comportamiento típico de la irradiancia a lo largo del día tiene una forma semejante a la de una campana de Gauss, iniciando con un valor de cero para las horas de la madrugada (sin radiación) para ir aumentando paulatinamente hasta llegar a un máximo (alrededor del medio día) y luego reduciéndose hasta cero (puesta del sol). El número de horas pico solares representan al área bajo esta curva y por lo tanto son un indicativo de la cantidad de energía disponible, razón por la que se expresan en  $KWh/m^2$ .

A partir de los datos obtenidos de la Comisión Nacional del Agua ([SMN-CNA-2000]), el promedio de irradiación solar horizontal para la república Mexicana, expresado en horas pico solares, es de 5.0  $KWh/m^2/día$ , es decir, un promedio de 5 horas de insolación con una

radiación instantánea promedio de  $1 \text{ KW/m}^2$ . El máximo se encuentra ubicado en la zona norte del país, con niveles de hasta  $8.6 \text{ KWh/m}^2/\text{día}$ , mientras que los niveles mínimos se presentan en algunas zonas cercanas al golfo de México .

Ahora es necesario determinar la cantidad de energía existente en la latitud de interés. Tal como apuntan [Collares & Perira, 2003] y [Fernández y Estrada-Cajigal, 1983], existe una gran necesidad por conocer datos horarios de radiación solar en diferentes regiones del país, en especial para las instalaciones solares comerciales, tanto fotovoltaicas como térmicas. En contraste, aunque existe trabajo previo, parte de la información no es muy confiable o está muy dispersa, ya que muchas veces la información es muy puntual y los valores históricos pueden estar incompletos. Afortunadamente, estos investigadores crearon un método de cálculo a partir de la estadística recopilada sobre horas de insolación de 57 localidades de la república mexicana, en periodos que varían entre 7 y 40 años (25.8 años en promedio). Esta información se correlacionó para validarla con datos estadísticos de otras variables meteorológicas (humedad relativa, temperatura, altitud y nubosidad) a partir de información recabada por la Comisión Nacional del Agua (CNA). El método permite calcular la irradiancia directa normal (es decir, la perpendicular al plano inclinado para cualquier latitud), la irradiancia directa horizontal y la irradiancia difusa horizontal, con una incertidumbre del 15%. Adicionalmente, también se pueden obtener las temperaturas promedio y mínima mensuales. Afortunadamente, dentro de este análisis, se cuenta con información estadística anual sobre la ciudad de Morelia. La tabla 3.1 combina la información disponible en [Collares y Pereira, 2003] y la figura 3.1, obtenida de [SMN-CNA, 2000]. Las horas pico solar reportadas por la CNA (horas de insolación promedio en la cuarta columna de la tabla 3.1.) , como puede verse, discrepan de la información de [Collares & Pereira, 2003]. La irradiancia instantánea promedio para la ciudad de Morelia será de  $927.02 \text{ W/m}^2$ . Aunque este es un resultado importante, para asegurar el funcionamiento a partir de esta fuente, es mejor diseñar para el peor caso posible. Según la fuente antes citada, estadísticamente, para la ciudad de Morelia, el mes de menor disponibilidad solar es diciembre. Con estos valores se calcularon los diferentes valores de irradiancia de las 5 horas a las 19 horas mediante el método propuesto. El resultado se muestra en la tabla 3.2.

**Tabla 3.1. Radiación y horas de sol en la ciudad de Morelia según Collares-Pereira y CNA-SMN.**

Mes	Radiación horizontal promedio en Kwh/m <sup>2</sup> /día [Collares y Pereira]	Horas de insolación promedio según CNA (1981 – 2000) promedio: 5.54 hrs	Irradiancia promedio (W/cm <sup>2</sup> ) de acuerdo a [Collares & Pereira]
Enero	4.2	6.93	606.06
Febrero	4.9	6.29	779.01
Marzo	5.5	4.29	1282.05
Abril	5.8	4.47	1297.54
Mayo	5.9	5.1	1156.87
Junio	5.2	5.3	981.13
Julio	5	4.77	1048.223
Agosto	5.1	4.9	1040.82
Septiembre	4.9	5.1	960.78
Octubre	4.6	5.97	770.52
Noviembre	4.3	6.73	638.93
Diciembre	3.7	6.58	462.31

La tabla también hace evidente que utilizar una superficie de captación con la inclinación adecuada permite captar 23% más energía en promedio que en una superficie horizontal, además de que en las primeras horas permite captar casi un 40% más de energía. Llama la atención que los datos aparecen muy simétricos tanto a la elevación como a la disminución de la radiación; esto se debe a que los autores utilizan un modelo senoidal del comportamiento solar. Los valores para este día se van a considerar en el diseño, pues constituyen el peor caso posible en general. Los espacios marcados con un guión (-) significan que el cálculo no pudo llevarse a cabo, por los valores de cero radiación. Esta irradiancia disponible puede convertirse directamente en electricidad a través de un dispositivo fotovoltaico, pero también puede producir calor.

CONAGUA Comisión Nacional de Aguas		NORMALES CLIMATOLÓGICAS											
LATITUD N 19° 42'		MORELIA, MICH.											
LONGITUD W 101° 11'		PERIODO 1981-2000											
ALTITUD 1913 msnm		OBSERVATORIO SINOPTICO DEPENDENCIA: SMN-CNA											
P A R A M E T R O S	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
<b>TEMPERATURA</b>													
MAXIMA EXTREMA	29.2	32.6	34.1	37.5	39.6	36.4	32.1	30.2	30.6	31.2	31.0	37.6	39.6
PROMEDIO DE MAXIMA	24.2	26.4	28.6	30.5	30.8	28.5	26.2	26.2	25.8	25.9	25.5	24.7	26.9
MEDIA	15.2	16.9	18.8	20.8	22.1	21.5	19.9	19.8	19.4	18.4	16.9	15.8	18.8
PROMEDIO DE MINIMA	6.1	7.4	9.0	11.2	13.4	14.5	13.7	13.5	13.1	10.9	8.3	6.9	10.7
MINIMA EXTREMA	-2.4	0.4	1.0	5.1	1.4	1.6	8.9	1.5	6.5	1.1	0.4	-1.5	-2.4
OSCILACION	18.1	19.0	19.6	19.3	17.4	14.0	12.5	12.7	12.6	15.1	17.2	17.8	16.3
TOTAL HORAS INSOLACION	208	176	133	134	158	159	148	152	153	185	202	204	2011
<b>HUMEDAD</b>													
TEMPERATURA BULBO HUMEDO	9.7	10.2	11.0	12.0	14.1	15.8	15.5	15.5	15.5	13.9	12.1	10.5	13.0
HUMEDAD RELATIVA MEDIA	56	52	46	43	48	62	68	69	69	66	62	59	58
EVAPORACION	126	147	212	222	219	168	134	132	120	122	116	109	1826.5
<b>PRECIPITACION</b>													
TOTAL	11.6	3.7	5.9	12.7	49.2	146.8	167.9	178.9	119.9	42.0	11.2	6.4	756.2
MAXIMA	108.5	15.7	43.6	123.3	108.9	226.9	292.7	524.1	296.5	102.0	47.1	36.9	524.1
MAXIMA EN 24 HRS.	30.3	15.7	12.7	78.0	35.2	60.6	55.5	292.9	106.9	26.0	28.8	20.0	292.9
MAXIMA EN 1 HORA	3.7	10.2	9.2	15.0	30.0	42.9	42.2	136.0	29.4	23.2	11.6	10.5	136.0
<b>PRESION</b>													
MEDIA EN LA ESTACION	811.0	813.5	810.7	811.8	811.6	810.3	812.7	811.9	810.9	811.0	811.8	811.8	811.6
VIENTO MAXIMO DIARIO													
MAGNITUD MEDIA	8.0	8.5	9.0	9.3	8.7	8.5	7.9	7.7	7.0	6.7	6.5	7.2	7.9
<b>FENOMENOS ESPECIALES</b>													
LLUVIA APRECIABLE	2.4	1.4	1.9	2.7	8.6	16.7	23.9	21.5	17.8	9.6	3.1	2.1	111.8
DESPEJADOS	9.0	8.8	10.1	8.8	7.9	7.0	6.5	6.5	5.9	6.1	6.9	7.9	91.4
MEDIO NUBLADOS	16.6	16.0	16.5	14.9	16.0	9.9	6.7	8.1	8.4	14.8	18.6	17.0	163.6
NUBLADO/CERRADO	5.4	3.2	4.5	6.2	7.1	13.1	17.8	16.4	15.6	10.1	4.5	6.1	110.1
GRANIZO	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3
HELADA	0.3	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.6
TORRENTA ELECTRICA	0.2	0.3	0.7	1.5	2.9	4.5	8.0	7.5	4.2	3.2	0.6	0.4	34.1
NIEBLA	2.3	1.0	0.5	0.5	0.8	6.3	10.9	10.1	13.3	8.7	6.7	3.1	64.2

UNIDADES: TEMPERATURA (°C), HUMEDAD RELATIVA (%), PRECIPITACION Y EVAPORACION (mm), PRESION (mb), VIENTO (m/s) Y FENOMENOS ESPECIALES (dias)

Figura 3.1. Normales climatológicas en el periodo de 1981 a 2000 para la Ciudad de Morelia.

Tabla 3.2. Irradiancia horaria promedio para el mes de Diciembre en la Ciudad de Morelia.

Hora (tiempo solar)	Plano horizontal	Plano inclinado (19.7 °)	Porcentaje de diferencia en la captación en plano inclinado respecto al plano horizontal (%)
	Irradiancia total (W/m <sup>2</sup> )	Irradiancia total (W/m <sup>2</sup> )	
5 a 6	-	-	-
6 a 7	-	-	-
7 a 8	111.40	155.35	39.45
8 a 9	253.42	313.55	23.73
9 a 10	392.70	467.63	19.08
10 a 11	503.84	590.10	17.12
11 a 12	565.48	657.89	16.34
12 a 13	565.48	657.89	16.34
13 a 14	503.84	590.10	17.12
14 a 15	392.70	467.63	19.08
15 a 16	253.42	313.55	23.73
16 a 17	111.40	155.35	39.45
17 a 18	-	-	-
18 a 19	-	-	-
<b>Promedio</b>	<b>365.3</b>	<b>436.94</b>	<b>23.14</b>
<b>TOTAL DIARIO (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>3653.68</b>	<b>4369.04</b>	

**Energía solar térmica.** La conversión de energía solar a térmica tiene las siguientes características:

- La captación es simple, generalmente de bajo costo y baja tecnología.
- El calor puede almacenarse en medios tanto sólidos como en fluidos, de esta forma la disponibilidad energética no se limita al periodo diurno a diferencia de la conversión solar a fotovoltaica.
- La eficiencia en la conversión directa es de al menos el 40%, contra 15% de la conversión fotovoltaica.

Se consideran tres rangos de temperatura para la conversión de energía solar a térmica, de acuerdo a [Sánchez, 2008]:

- De baja temperatura ( $< 90^\circ$ )
- Mediana temperatura (entre  $80$  y  $250^\circ\text{C}$ )
- Alta temperatura (por encima de  $250^\circ\text{C}$ )

La conversión de mediana y alta temperatura hace necesario el uso de concentradores solares, que tienen la desventaja, para el objetivo de este trabajo, de requerir rastreo solar para mantener la eficiencia. Existen distintos tipos de captadores solares que convierten la radiación en energía térmica. Los más sencillos son los captadores planos, que pueden coleccionar radiación tanto directa como difusa. Esencialmente constan de una superficie absorbente de radiación con una cubierta de vidrio encima que hace la función de efecto invernadero, permitiendo la entrada de radiación y limitando la emisión de radiación del interior al exterior así como las pérdidas por convección.

La superficie que capta el calor es llamada absorbedor y debería capturar la mayor cantidad posible de radiación solar (absortividad). Al mismo tiempo, debería emitir cero radiación hacia el ambiente (emisividad) idealmente. Los absorbedores se construyen con materiales metálicos a los que se agrega algún recubrimiento de alta absortividad, en cuyo caso se les llama superficies selectivas. Existe una gran variedad de recubrimientos, como el SOLKOTE, un recubrimiento que presenta valores de 0.88 a 0.95 de absortividad (siendo 1 el valor más alto posible) y de 0.2 a 0.4 de emisividad. Otros recubrimientos más económicos como la pintura

negra comercial tienen índices tanto de absorptividad como de emisividad de 0.8 a 0.9; sin embargo, según reporta [Amataya & Ram, 2010], aún empleando concentradores solares, lentes concentradores fresnel y un receptáculo aislado con bajas pérdidas térmicas, la diferencia en el gradiente de temperatura entre la pintura negra ordinaria y el SOLKOTE fue de solo 10%. Para cualquier recubrimiento, la potencia absorbida  $Q_{abs}$ , de acuerdo a [Sánchez, 2008] está dada por la ecuación (3.1):

$$Q_{abs} = aIA \quad (3.1)$$

Donde:

$I$  Es la Irradiancia en  $W/m^2$

$A$  = área de captación en  $m^2$

$a$  = coeficiente de absorptividad, adimensional

Existen también pérdidas relativas a la diferencia de temperaturas entre el absorbedor ( $T_e$ ) y la temperatura ambiente ( $T_a$ ), tanto por convección como por radiación y conducción, es decir que parte de la energía captada se pierde en el ambiente. Esta potencia perdida  $Q_{per}$  se calcula mediante la ecuación (3.2).

$$Q_{per} = b(T_e - T_a)A \quad (3.2)$$

Donde  $b$  es el coeficiente de pérdidas, en  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$  debido a las 3 formas de transmisión de calor. La eficiencia total se determina por la diferencia entre la potencia captada y la perdida, que es la potencia realmente disponible en el sistema y está dada por (3.3).

$$\eta = \frac{Q_{abs} - Q_{per}}{IA} = a - b \left( \frac{T_e - T_a}{I} \right) \quad (3.3)$$

En otras palabras, tanto la eficiencia como la temperatura máxima alcanzada dependerán de la absorptividad  $a$  del absorbedor y de las medidas tomadas para evitar las pérdidas térmicas, que impactan en el coeficiente  $b$ . Esto depende del material utilizado como aislante, de la emisividad del absorbedor y las medidas tomadas para lograr hermeticidad. Para colectores

planos, se recomienda utilizar cubierta de vidrio o algún otro material transparente, ya que los colectores sin cubierta difícilmente pueden alcanzar los 45 °C [Sánchez, 2008] .

Se utilizará un colector metálico con cubierta a base de pintura, con vidrio de protección y aislante. Deberá determinarse la temperatura máxima alcanzable y a partir de ello, calcular los valores de  $a$  y  $b$  así como la máxima potencia real disponible y las pérdidas de calor.

### 3.2. Transductores termoeléctricos y fotovoltaicos.

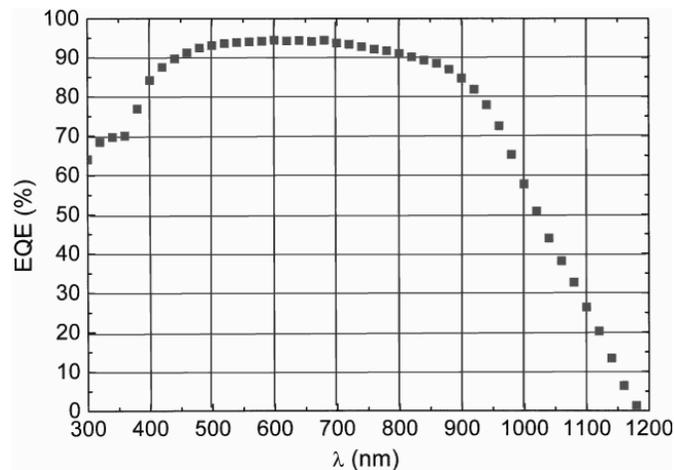
Debido a que la fuente es la radiación solar, se seleccionaron transductores tanto fotovoltaicos como termoeléctricos para este trabajo de tesis; estos últimos debido a que durante las primeras etapas de la investigación, no fue posible conseguir los transductores termoeléctricos aún cuando se contactó a varios fabricantes; por ello, se trabajó inicialmente con los transductores fotovoltaicos como transductores principales. Al obtener los transductores termoeléctricos, se dejaron parcialmente de lado los primeros, aunque permitieron comparar los resultados prácticos con la información estadística descrita en la sección 3.1 como referencia para la experimentación posterior.

**Transductores fotovoltaicos.** Adquirir transductores con potencias de salida por debajo de 10 W que incluyan información técnica resultó ser una tarea laboriosa, debido a que al no ser comerciales, los fabricantes principalmente los utilizan para aplicaciones como llaveros, pequeños juguetes solares, etc. A pesar de ello, fue posible identificar y obtener un transductor cuyas características se muestran en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3: Características del transductor fotovoltaico utilizado.**

<b>Matrícula</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Corriente de cortocircuito (Isc)</b>	<b>Voltaje a circuito abierto Voc (V)</b>	<b>Dimensiones (mm)</b>
XOB17-04X3	IXYS	12.6 mA	1.89	22 x 7 x 1.4

Este transductor es un arreglo de celdas solares mono cristalicas de alta eficiencia (17%), que incorporan una superficie captadora de luz mejorada. Funcionan aún en condiciones de baja luminosidad, por lo que son adecuadas para aplicaciones bajo techo y radiación solar directa. Presentan un amplio rango de longitud de onda, con una respuesta prácticamente plana para un espectro de frecuencias entre 450 nm y 800 nm, con una eficiencia cuántica exterior (QE) de 95%, la cual es la relación de portadores de carga generados en la celda respecto al número de fotones que inciden sobre ella; este parámetro relaciona la respuesta del transductor en todo el ancho espectral. Si todos los fotones de una longitud de onda se absorben y generan portadores minoritarios proporcionales, la QE es de 100%. La figura 3.2 muestra el valor de QE para el transductor XOB17-04X3



**Figura 3.2. Eficiencia cuántica del transductor XOB17-04X3.**

Adicionalmente, estos transductores están sellados contra humedad y resisten la radiación Ultravioleta. La información técnica es muy completa e incluye el valor del coeficiente de temperatura de voltaje a circuito abierto (que es la reducción en la salida de voltaje a circuito abierto por variación de temperatura y es igual a  $-2.1 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ ). Se llevaron a cabo varias pruebas experimentales con ambas celdas, que se presentan en el capítulo correspondiente.

**Transductores termoelectricos.** Como se indica en la sección 1.2, la disparidad entre resultados para el mismo gradiente de temperatura entre las fuentes consultadas llama la

atención desde el inicio. Tras un análisis más detallado, se pudo detectar que [Dalola et al, 2009] caracterizan tres transductores termoeléctricos de los cuales, uno de ellos es diferente a los otros dos y es definido por el fabricante como un módulo Peltier. Tras investigar, se determinó que, comercialmente, existen dos tipos de transductores termoeléctricos: los módulos Peltier y los generadores termoeléctricos (Thermoelectric Generators o TEGs). Los primeros, también conocidos como enfriadores termoeléctricos (thermoelectric coolers o TECs), también son dispositivos que internamente se forman por pares semiconductores P-N, pero con la diferencia de que se utilizan para enfriar pequeñas áreas como pueden ser microprocesadores de computadoras o instrumental médico. En estos dispositivos se explota el efecto Peltier, que, como ya se ha mencionado en la ecuación (2.15), desarrollan un gradiente de temperatura proporcional a la corriente aplicada a través de ellos. Este diferencial se debe a que los portadores de los materiales P-N, al moverse, pueden extraer calor de un lado de la unión (lado caliente) y llevarlo hacia el otro lado (lado frío) donde se puede expulsar a la atmósfera o transferir a algún otro medio de disipación de calor, formando así una verdadera bomba de calor donde el “fluido” de trabajo, de manera similar a los equipos de refrigeración que utilizan gases de enfriamiento, lo conforman los portadores del material semiconductor. Dependiendo de la dirección de la corriente  $I$  y de cuál de los lados del TEC se tome como referencia, el calor puede verse como rechazado o absorbido. Al ser su funcionamiento completamente eléctrico, se utilizan los TECs para el control de temperatura de precisión, ya que permiten aplicar o remover calor de la carga según sea necesario, pudiendo alcanzar niveles de precisión menores a  $\pm 0.01$  °C.

Por otro lado, en la sección 2.2.3, se describen algunas características básicas de los transductores termoeléctricos. Para aplicaciones de baja temperatura (por debajo de 100 °C), los generadores termoeléctricos (Thermoelectric generators o TEGs) comerciales no son apropiados ya que sus materiales y procesos de fabricación, están optimizados para diferenciales de temperatura  $\Delta T$  muy altos, provenientes de fuentes como hornos y otros dispositivos de combustión que producen temperaturas de 200 °C o más, de manera que las fuentes energéticas como gradientes térmicos a partir de seres vivos, estratificación de capas de agua oceánica por diferencia de densidades o incluso captadores solares de baja temperatura; es decir, aquellas fuentes más apropiadas para un sistema de Recolección de energía, no son adecuados [Buist & Lau], [Dalola et al, 2009].

Una opción es la utilización de enfriadores termoeléctricos (Thermoelectric Coolers o TECs).

Ya se ha mencionado anteriormente que los efectos Seebeck y Peltier ocurren al mismo tiempo. Para un TEG conectado a una carga a través de la que fluye la corriente, el flujo de calor está dado por (23), según [Lineykin & Yaakov, 2005]:

$$Q = \Pi I + \Theta \Delta T - \frac{I^2 R_i}{2} \quad (23)$$

Donde:

Q es la potencia térmica efectiva aplicada al módulo en Watts.

I es la corriente de carga.

$\Pi$  es el coeficiente Peltier.

$R_i$  es la resistencia eléctrica interna del TEG.

$\Theta$  conductancia térmica en W/K.

Aunque el efecto Seebeck es de interés para generación de energía, el hecho de hacer fluir una corriente a través del dispositivo producirá un efecto Peltier. Esto implica que un TEC puede utilizarse como TEG y viceversa. La diferencia fundamental entre uno y otro es el material con el que se fabrican. Los TECs se fabrican para rangos de temperaturas de operación no mayores a 127 °C, mientras que los valores de  $\Delta T$  son de 70 °C o menores. Su eficiencia a temperaturas relativamente bajas se debe a que están optimizados para emitir el calor excesivo al ambiente y por lo tanto pueden utilizarse en los rangos de temperatura de interés para este trabajo, de acuerdo a [Buist & Lau, 1977] y [Dalola et al, 2009].

A pesar de lo anterior, debido a que los TECs están diseñados para enfriamiento o calentamiento, existe poca o ninguna información técnica de los fabricantes para evaluar su comportamiento como TEGs. El número de pares del TEC, el material y geometría permiten predecir la capacidad de generación de potencia, de acuerdo a [Lineykin and Been-Yakoov 2007], [Dalola et al] y [Freunek et al 2008] entre otros, pero esta información de manera general no está disponible, por lo que la caracterización es necesaria.

Para este trabajo se adquirieron cinco TECs de diferentes características pero mismo fabricante (Marlow). Las hojas técnicas se encuentran en: [RC6-6] y [RC12-4]. La tabla 11 resume las características de tres de estos módulos, que se utilizaron para la experimentación. Los resultados de la caracterización se reporta en el capítulo 4.

**Tabla 3.4. Características de los módulos Peltier utilizados**

	<b>RC 12-4</b>	<b>RC 3-8</b>	<b>RC 3-2.5</b>
Tmax (°C)	124	123	123
$\Delta t$ max (°C)	74	73	73
Qmax (W)	39	19	6
Vmax (VDC)	16.7	4.1	4.1
I <sub>max</sub> (ADC)	3.7	7.4	2.5
R <sub>out</sub> ( $\Omega$ , 25 °C)	3.3	1.0	1.2

Es importante resaltar que, para mantener un diferencial de temperatura entre las caras fría y caliente del termo generador, se debe potenciar el flujo de calor a través del módulo. La razón es que cuando se aplica un diferencial de temperatura inicial (estado transitorio), el calor comenzará a fluir a través del dispositivo desde la cara caliente no sólo por el flujo de portadores, sino también debido a su propia conductividad térmica, que depende del material de fabricación, por lo que el gradiente inicial tiende a ser alto y posteriormente disminuye. Si el calor no se retira eficientemente por el lado frío, aunque la fuente de calor y la temperatura ambiente se mantengan constantes, se reduce el flujo de calor y por lo tanto disminuye el valor de  $\Delta T$  hasta hacerse casi cero en el estado estable, donde las temperaturas tienden a igualarse. De igual manera, si existe un mecanismo muy eficiente para retirar el calor del lado frío y la fuente de calor en el lado caliente reduce su magnitud, el poco calor disponible se disipa rápidamente y tampoco se crea un flujo de calor adecuado. Esto significa que el valor de  $\Delta T$  alcanzado dependerá en gran medida de las condiciones de operación y de los mecanismos existentes para retirar el calor. En caso de utilizar una ventilación natural por convección, el diseño del disipador de calor es crítico, siendo necesario mantener al mínimo la resistencia

térmica del mismo, que es una medida de la elevación de la temperatura del disipador por encima de la temperatura ambiente y se especifica en °C/Watt.

De acuerdo a [Gromov 2004], para un TEC de una sola etapa, el valor de diferencial de temperatura  $\Delta T$  máximo es establecido por (24):

$$\Delta T_{max} = \frac{1}{2} Z T_c^2 \quad (24)$$

Donde:

$T_c$  es la temperatura del lado frío

Z : Figura de mérito, la cual está dada por (25):

$$Z = \frac{\alpha^2}{kR} \quad (25)$$

Donde:

$\alpha$ = coeficiente Seebeck

k = conductancia térmica

R = resistencia eléctrica

La figura de mérito permite evaluar de forma general el desempeño de un módulo termoelectrico. Un valor alto de Z es lo deseable, pues significa un bajo valor de conductancia térmica al igual que de resistencia eléctrica. Idealmente el valor de  $\alpha$  debería ser muy alto, tener resistencia eléctrica cero y una conductancia térmica cero. Los valores actuales son típicamente de 1 y menores a 2 [Tritt &Subramanian, 2006]. Experimentalmente, es necesario obtener el valor de Z para los diferente módulos, así como el coeficiente Seebeck y determinar tanto la conductancia térmica como la resistencia eléctrica.

### 3.3. Selección de supercapacitores.

Debido a las ventajas antes mencionadas, se decidió utilizar súper capacitores como medio de almacenamiento eléctrico. Utilizando energía solar como fuente principal, significa, por lo menos, 365 ciclos de carga/descarga por año que una batería muy probablemente no soportará por un periodo prolongado. El funcionamiento de un sistema de Recolección de energía

depende del monitoreo constante de la energía disponible para determinar si algunas operaciones son posibles o no. Determinar el estado real instantáneo de la carga de una batería es complicado debido a factores como las temperaturas de operación. En aplicaciones prácticas, se ha encontrado que muchas veces la duración de las baterías es inferior a lo reportado por los fabricantes y/o lo esperado por los diseñadores o usuarios [Kompis y Aliwell 2008]. En cambio, para los capacitores que tienen un valor relativamente constante (la expectativa es de un millón de ciclos de carga/descarga con una reducción de aproximadamente el 20% en la capacitancia [Cooper Bussmann, 2007. Design considerations...], una simple medición de voltaje a circuito abierto permite determinar el estado de la carga [Cohen, 2007]. Una descarga corta (2-10 segundos) a cualquier valor de corriente constante permite calcular la capacitancia y la ESR [Cooper Bussmann, 2007, Methods for measuring...] y [Cap-XX, 2009]. Dado que el proceso de carga y descarga no rompe enlaces químicos, no se afectan por descargas profundas o pequeñas descargas frecuentes y la medición será confiable.

Aunque los súper capacitores, como ya se ha visto anteriormente, poseen una alta densidad de potencia, también pueden utilizarse para proporcionar energía por espacios de tiempo relativamente largos, de manera semejante a una batería siempre y cuando el consumo no sea muy elevado (densidad de energía), de acuerdo a [Curtis, 2008]; la elevada capacitancia permite llevar a cabo esta función, mientras que una baja ESR favorece entregar potencias altas en espacios de tiempo reducidos, es decir que para una aplicación con un consumo promedio, balanceado con picos de consumo no muy frecuentes, los súper capacitores pueden ser una buena opción. La energía que puede suministrar un súper capacitor funcionando como batería se determina mediante (19):

$$E = \frac{1}{2} I_{load} (V_{WV} + V_{min}) t \quad (19)$$

Donde:

$I_{load}$  es la corriente promedio que consume la carga, en Amperes

$V_{WV}$  es el voltaje nominal de alimentación del sistema, en Volts

$V_{min}$  es el voltaje mínimo al que puede caer el capacitor en el periodo de interés, en Volts

t es periodo en el cual se pretende proporcionar energía a la carga, en segundos

El decremento de la energía está dado por:

$$E = \frac{1}{2} C (V_{WV}^2 - V_{\min}^2) \quad (20)$$

Despreciando la caída de tensión debida a IR e igualando estas dos ecuaciones, se tiene la expresión (21):

$$C = \frac{I_{load} (V_{WV} + V_{\min}) t}{(V_{WV}^2 - V_{\min}^2)} \quad (21)$$

Para aplicaciones donde hay una corriente relativamente baja y continua seguida de una corriente alta y breve, con ciclos de trabajo típicamente menores del 20%, hay que considerar 2 caídas: la caída debida a la corriente circulando a través de la resistencia interna del capacitor (ESR) mas la disminución del voltaje en el capacitor con cada descarga. Estos dos factores se determinan mediante la ec. (21):

$$V_{drop} = I_{load} \left( R + \frac{t}{C} \right) \quad (21)$$

Donde:

$V_{drop}$  es la caída de voltaje máxima permitida con cada descarga

$I_{load}$  es la corriente consumida durante el pico de potencia

R es la resistencia total del súper capacitor

t es el tiempo de duración del pico de corriente

Despejando la capacitancia, se obtiene (22)

$$C = \frac{t}{\left( \frac{V_{drop}}{I_{load}} - R \right)} \quad (22)$$

Se decidió utilizar súper capacitores de aerogel debido a las siguientes características:

- Extremadamente baja ESR
- Ultra baja corriente de fuga (pueden retener carga por semanas)
- Amplio rango de temperaturas de operación

Una de las ventajas de utilizar calor como fuente de energía es que éste se puede almacenar. Para este proyecto, se plantea aprovechar esta ventaja para incrementar el tiempo de operación del sistema. El medio de almacenamiento puede ser líquido, sólido o gaseoso. Los factores a considerar en la selección de un medio de almacenamiento son:

1. Rango de temperaturas de operación del almacén.
2. Tamaño. Un almacén pequeño puede operar a temperaturas promedio mas altas, aunque el tiempo de almacenamiento puede ser corto.
3. Las pérdidas térmicas, que pueden ocurrir tanto por conducción y convección como por radiación. Lo ideal es mantener al mínimo las pérdidas, en especial para almacenamiento a largo plazo.
4. Velocidad carga y descarga. Este factor determina la rapidez con la que la energía estará disponible.
5. Disponibilidad de materiales, duración y resistencia al medio ambiente. por ejemplo, el agua es un medio muy económico, pero la corrosión es un factor a considerar.
6. Formas de transporte del calor y requerimientos de potencia para ello.
7. Costo.

Se puede almacenar calor por tres mecanismos:

1. Calor sensible. Significa calentar un sólido o un fluido sin que exista cambio de fase. Sus principales ventajas son que es muy económico y simple de implementar, pero requiere una gran cantidad de volumen porque la densidad de energía es baja, además de que la temperatura de descarga es variable.
2. Calor latente: Se almacena energía provocando un cambio de fase en la sustancia. Por ejemplo, la parafina al volverse líquida absorbe una gran cantidad de calor, que libera al disminuir la temperatura aplicada y hacerse sólida. Su principal ventaja es que la descarga de calor es constante y tienen mayor capacidad de almacenamiento, por lo

que requieren un menor volumen que las de calor sensible (aproximadamente 50% menos, de acuerdo a [Van Helden, 2010] y [Ataer, 2006]). Estos materiales tienen el inconveniente de presentar baja conductividad térmica, son los más costosos y presentan riesgos porque no son materiales amigables con el ambiente.

3. Termoquímico o de enlace. Involucra una reacción endotérmica reversible. El principio básico consiste en que si se parte de un sistema compuesto por dos partes A y B y éstos están unidos por enlaces químicos débiles, como enlaces de Van der Waals formando AB, al aplicarles calor pueden separarse en A + B, pero al retirar el calor, se puede volver a obtener AB, recuperándose al 99.99%. La capacidad de almacenamiento es el calor de reacción o la energía libre de reacción; al ser enlaces débiles, presentan mayor capacidad de almacenamiento de energía en cuanto a peso y volumen, siendo los más compactos de todos (aproximadamente la sexta parte de los de calor latente). Su principal ventaja es que presentan pérdidas térmicas despreciables puesto que el calor queda almacenado en las uniones y no presentan desgaste.

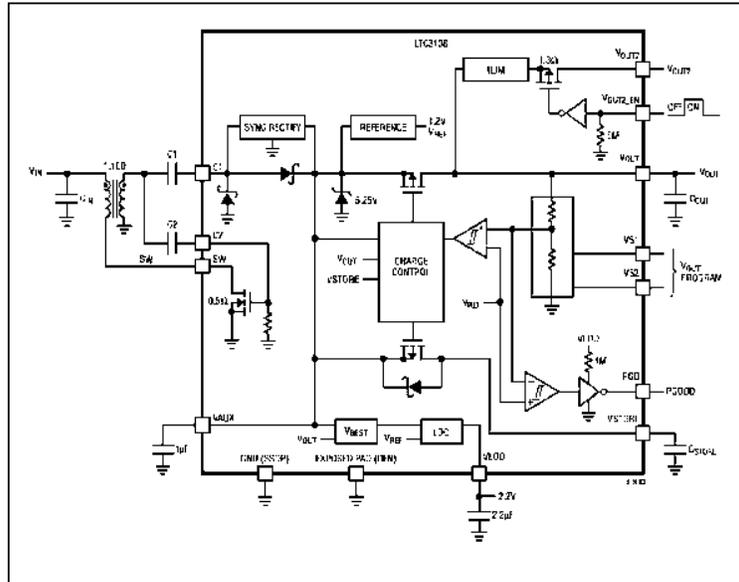
De los tres medios diferentes de almacenamiento, se determinó que el más apropiado es el termoquímico. Después de investigar varias opciones, se decidió utilizar el mineral zeolita para esta finalidad. Las zeolitas son arcillas o aluminosilicatos porosos que se forman naturalmente (aunque existen materiales sintetizados artificialmente) y que tienen una estructura interna semejante a la de un panal. Esta estructura produce una gran área superficial interna que le proporciona una gran capacidad de adsorción, que se aprovecha en un gran número de aplicaciones, como por ejemplo, para eliminar sustancias tóxicas. Una característica que las hace únicas es que dentro de su estructura pueden almacenar vapor de agua en grandes cantidades (aproximadamente el 30% en peso, de acuerdo a [Tchernev, 1979]). Si se aplica calor de una magnitud suficiente, el vapor de agua se evapora al ambiente y su lugar dentro de la estructura es reemplazado por el calor aplicado (proceso de desorción o carga de calor), de manera que se lleva a cabo un intercambio calor/vapor de agua. De manera similar, si se aplica un flujo de vapor de agua, éste es adsorbido por la zeolita, la cual expulsa el calor contenido internamente (adsorción o descarga de calor). La gran ventaja es que puede trabajarse con vapor de agua, que es una sustancia no contaminante y el calor se puede almacenar por un tiempo prácticamente infinito, además de que la adsorción en zeolitas no

requiere presiones altas en el vapor para introducirse en la estructura. La densidad energética estimada es de 24 KWh/m<sup>3</sup>, pudiendo almacenar calor con temperaturas de hasta 140 °C, que está dentro del rango de temperatura alcanzable por la energía solar de baja temperatura. Una desventaja es que la temperatura de descarga no es constante, pero se compensa con la gran capacidad de almacenamiento.

### **3.4. Convertidor de potencia.**

Ante la imposibilidad de desarrollar una solución mediante un circuito integrado “a la medida” al igual que el empleo de dispositivos discretos, se seleccionó el convertidor LTC3108, el cual es un convertidor DC/DC elevador que puede generar 2.35, 3.3., 4.1 o 5 V en su terminal de salida  $V_{OUT}$  a partir de voltajes tan pequeños como 20 mV [Linear technology Corporation, 2010]. Este convertidor está diseñado específicamente para usarse con generadores termoelectricos. La salida puede suministrar hasta 4.5 mA y tiene una corriente quiescente de operación de sólo 9  $\mu$ A máximo. Como se mencionó en el capítulo 4, sólo [Carlson et al, 2010] han logrado un convertidor a estos niveles de voltaje y en fechas muy recientes. El LTC3108 tiene la ventaja de no requerir energía externa para iniciar o arrancar su operación a bajos valores de voltaje de entrada. La información disponible muestra que es el único dispositivo con estas características disponible al momento.

Además de operar a voltajes tan reducidos, este convertidor presenta un terminal para conectar un dispositivo de almacenamiento adicional (CSTORE) que puede ser una batería o súper capacitor que respalde la operación, una salida de 2.2 Volts para alimentar un micro controlador o microprocesador externo de bajo consumo (VLDO) y programación del voltaje de salida mediante la combinación de dos entradas digitales, evitando así el uso de resistores externos que pueden consumir la poca energía disponible. La figura 9 muestra el esquema interno del circuito integrado.



**Figura 3.3. Esquema interno del convertidor LTC3108**

La operación del dispositivo es la siguiente: El MOSFET marcado como SW y el transformador externo forman un oscilador resonante elevador. La frecuencia de oscilación depende de la inductancia del secundario y es del orden de 10 KHz a 100 KHz. El transformador es el factor clave en el funcionamiento del dispositivo, ya [Shenck, 1999] indicaba que para los niveles de energía presentes en una aplicación de Recolección de energía, el uso de transformadores representa una fuente de altas pérdidas y requiere un transformador de muy alta eficiencia y pequeño tamaño, lo cual es difícil de lograr. En este caso, este inconveniente se solucionó mediante el uso de transformadores especiales para esta aplicación con un coeficiente de acople de 0.95 y relaciones de transformación tan altas como 1:100.

El voltaje de CA del secundario se amplifica mediante una bomba de carga externa (charge pump) compuesta por el capacitor C1 y el MOSFET interno. La salida, también en CA, es rectificadora mediante los rectificadores Schottky internos y se integran en el terminal VAUX, el cual es el terminal de alimentación del convertidor, por ello se necesita un capacitor de filtrado. Cuando el voltaje acumulado en VAUX excede los 2 V, entran en operación los rectificadores síncronos, que mejoran la eficiencia. Esto significa que requiere bastante energía para el arranque, puesto que la rectificación inicial es a través de diodos semiconductores. Todos los componentes internos del circuito toman energía de VAUX. El orden en el que se producen los voltajes en el circuito se muestra en la figura 10 y es el siguiente:

1. VAUX. Este voltaje se incrementa constantemente mediante la bomba de carga. El valor máximo que puede alcanzar es de 5.25 V
2. VLDO. Cuando el valor de VAUX alcanza 2.3 V, esta salida está disponible y proporciona 2.2 V. Su función es alimentar un microcontrolador u otro dispositivo de control de bajo voltaje de operación en caso de ser necesario. Esta terminal puede proporcionar hasta 11 mA.
3. VOUT. Este es el voltaje de salida hacia el almacén de energía, que comienza a elevarse a partir de que VAUX alcanza los 2.5 Volts hasta que alcanza el valor programado de voltaje de salida. La corriente máxima que puede suministrar es de 4.5 mA.
4. CSTORE. Este terminal carga el almacén adicional de energía. Una vez establecido VOUT y funcionando la carga, cualquier corriente en exceso se deriva a este almacén, que se va cargando paulatinamente hasta alcanzar su nivel máximo de 5.25 V. Si en algún momento el valor de VAUX disminuye por debajo del valor de VSTORE o la corriente solicitada por la carga en VOUT y/o en LDO no puede ser suministrada por el almacén conectado en VOUT, automáticamente la corriente se deriva de VSTORE. La corriente máxima que puede proporcionar es de 4.5 mA.

Este circuito integrado facilita alimentar un dispositivo a partir de un generador termoelectrico, sin embargo, existe una gran cantidad de consideraciones y precauciones que hacen su uso no trivial. Al ser un producto nuevo (disponible a mediados de 2010), tampoco existen notas de aplicación o lineamientos de diseño y es necesario experimentar con diferentes valores de componentes, como lo indica específicamente la hoja técnica. Algunos datos, como la eficiencia, se reportan para condiciones de operación que no pueden obtenerse de manera práctica, como es el voltaje de salida de 4.5 V, puesto que solo se pueden programar valores de 4.1 ó 5V o bien con algunos valores muy puntuales, como el valor de C1. Entre los puntos a considerar se encuentra lo siguiente, derivado del análisis de las curvas y observaciones que aparecen en la hoja de datos del dispositivo.

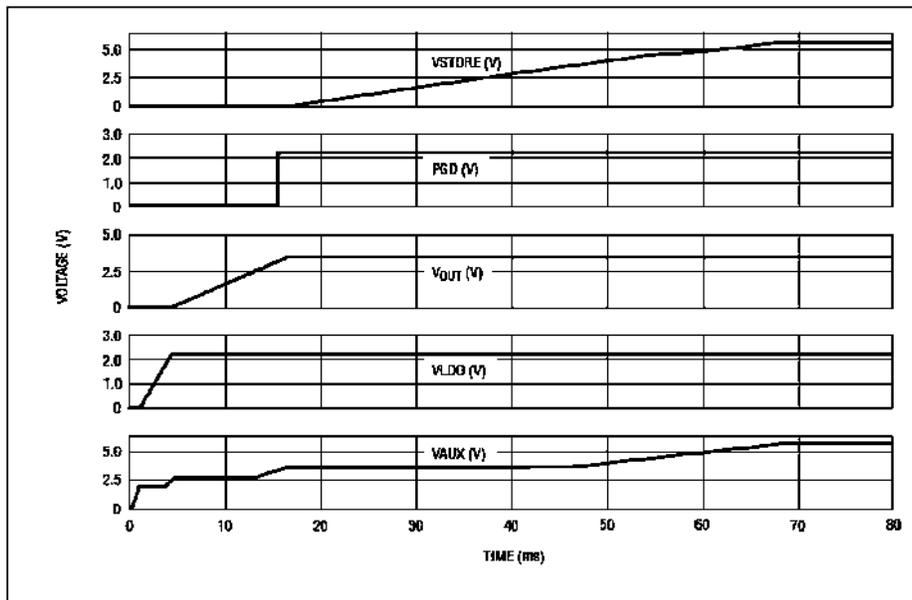


Figura 3.4. Orden de aparición de los voltajes en el convertidor LTC3108.

1. Los valores óptimos de las capacitancias C1, C2, CLDO y CAUX no están definidos y deben encontrarse experimentalmente, pues dependen de la carga, del tipo de transductor de entrada y transformador empleados y de los valores de los capacitores que almacenan energía (COUT y CSTORE). Específicamente, el capacitor C1 afecta la resistencia de entrada del convertidor y la capacidad máxima de corriente de salida. Si su valor es muy alto, puede ser difícil operar a voltajes bajos del transductor, aunque se incrementa la capacidad de generar corriente de salida, por lo que su valor debe balancearse para operar a un voltaje suficientemente bajo (producido por un  $\Delta T$  reducido) y aprovechar la poca energía disponible, pero lo suficientemente grande para generar la corriente necesaria.
2. A medida que el voltaje de entrada es más alto, la corriente consumida en la entrada aumenta también de manera no lineal. Se debe cuidar el máximo voltaje de entrada ya que de otra forma se producirá voltajes muy altos en el secundario y se incrementa la potencia disipada en el integrado, decrementando la eficiencia. La relación: máximo voltaje de entrada/relación de transformación no debe exceder de 50. Por ejemplo, para una relación de transformación de 100, será de  $50/100 = 500$  mV. Un inconveniente es que mientras más corriente consume la entrada, disminuye la eficiencia global, como se muestra en la siguiente figura para una relación 1/100, donde la eficiencia cae de

40% con un voltaje de entrada de 60 mV a solamente 5% con un voltaje de 500 mV, de acuerdo a la figura 11, tomado de la hoja de datos del dispositivo:

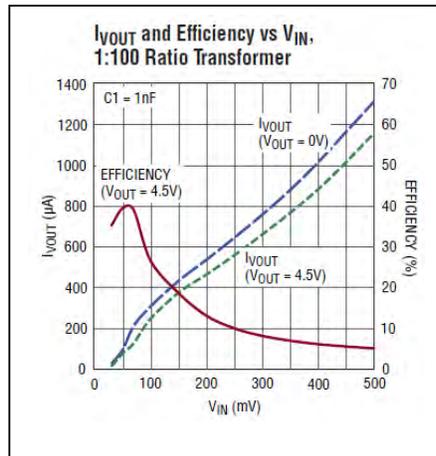


Figura 3.5. Corriente de salida y eficiencia contra voltaje de entrada con transformador 1:100.

- El transformador utilizado es determinante, ya que mientras más alta sea su relación de transformación, menor será la resistencia de entrada y se requiere mayor corriente del transductor. La hoja de datos muestra que a menor relación de transformación, la eficiencia se incrementa, pero esto significa que se necesitan valores de  $\Delta T$  mayores. Puesto que se trabaja a baja temperatura, debe encontrarse una relación de transformación balanceada que genere energía a partir de diferenciales de temperatura pequeños pero que al mismo tiempo no exijan demasiada corriente del transductor.
- Es importante comprender que la salida regulada del convertidor no se conecta directamente a la carga. El circuito integrado está diseñado para cargar un almacén de energía en  $V_{OUT}$ , que puede ser un capacitor o una batería, y no para proporcionar energía constante, a menos que esta sea muy pequeña, como corresponde a la carga en su periodo “dormido” o de bajo consumo. Los picos de corriente que demanda la carga deben ser absorbidos por el almacén de energía, el cual previamente debe estar correctamente cargado durante el mencionado periodo de bajo consumo. Esta es la principal diferencia con relación a cualquier otro convertidor o regulador: su diseño para una operación discontinua.

5. Deben determinarse los tiempos de carga de todos los capacitores o dispositivos de almacenamiento, incluyendo el que se conecta en LDO, para asegurar que la energía estará disponible en el momento adecuado. Por regla general, a mayor voltaje de entrada los almacenes se cargan más rápido, pero no hay que olvidar los puntos anteriores, para generar suficiente corriente de salida y trabajar a los niveles de diferenciales de temperatura adecuados. Estos almacenes deben ser de baja pérdida y en todo caso, ésta debe ser conocida y considerarse para poder compensar su efecto.
6. Los termo generadores utilizados deben tener una resistencia interna eléctrica lo más baja posible, esto ayudará a que la corriente de salida sea alta aún con valores de voltaje pequeños. La entrada del convertidor está diseñada para valores de resistencia entre 2 y 10 Ohms, por lo que este deberá ser el rango de resistencia que debe buscarse en los transductores termoeléctricos. La resistencia interna del transductor, en conjunto con el capacitor  $C_{in}$ , deben formar una constante de tiempo mayor a 100  $\mu s$ .
7. Al ser un dispositivo de montaje superficial que opera a frecuencias relativamente altas, además del bajo nivel de potencia, es necesario diseñar y construir un circuito impreso para poder llevar a cabo las pruebas pertinentes. La regla general es mantener las pistas lo más cortas y anchas posible, pues cualquier caída de tensión, por pequeña que sea, reducirá la eficiencia del circuito.

Existe un modelo SPICE para este convertidor, disponible en el sitio de internet del fabricante, el cual está optimizado para un software de simulación propietario llamado LTSPICE, el cual se utilizó para realizar pruebas, que se discuten en el capítulo 4.

### **3.5. Carga de prueba.**

Los trabajos relacionados con el tema se han ocupado de generar la mayor cantidad de energía posible y posteriormente, intentan encontrar algún hardware que se adecúe a los niveles de voltaje y corriente generados [Leonov et al, 2007], [Lu, et al, 2010], [Ramadass & Chandrakasan, 2011], [Watkins et al, 2005], [Zhang et al, 2010], [Carlson et al, 2010], [Hoang

et al, 2009] y[Mateu et al, 2007]. En cambio, el caso práctico es a la inversa: se cuenta con un equipo con parámetros conocidos, adecuado para una aplicación determinada y debe adaptarse la generación de energía a este perfil; este es el caso de interés para éste trabajo: establecer una metodología para dimensionar si la aplicación es posible y en caso de serlo, bajo qué condiciones lo es. Por esta razón, se decidió utilizar como ejercicio de referencia un equipo real y con una alta exigencia energética, aunque dentro de los lineamientos que debe cumplir una carga susceptible de ser alimentada por un sistema basado en recolección de energía.

El equipo seleccionado es un registrador de datos (datalogger) operado a baterías con capacidad de registro de datos provenientes de dos canales analógicos conectados a sensores con salida de 4 a 20 mA. Los datos almacenados pueden enviarse remotamente en horarios programables a través de un canal de comunicaciones celular GSM, lo que representa un alto consumo de energía. Se cuenta con información técnica y experiencia práctica en el uso del tal equipo. Los consumos promedio típicos, de acuerdo al fabricante, se muestran en la tabla 12:

**Tabla 3.5. Consumos promedio del registrador de datos de acuerdo a la información del fabricante.**

<b>Estado</b>	<b>Consumo medio típico (mA)</b>
Reposo (standby)	0.15
Ejecución de tarea	10
Activación de fuente interna de 24 Volts para alimentar sensores	120
Transmisión GSM	251
Recepción GSM	55

El consumo real del equipo, en la práctica, depende de la forma en la que se configure su operación, el número de canales a monitorear y la frecuencia de envío de la información. Para fines de evaluación, se consideró un perfil probado en la práctica donde se toma una lectura de datos cada 10 minutos mediante dos sensores de tipo de corriente con salida 4-20 mA, alimentados a 24 VCD a partir de la fuente interna del registrador, la cual se activa durante 22 ms. Posteriormente, se hace un envío del registro histórico de datos a través de un canal de comunicación GSM una vez al día en el mismo horario. Debido a que se plantea obtener

energía a partir de la radiación solar, se calculará la energía necesaria y que debe ser colectada en un periodo de 24 horas para mantener funcionando siempre al equipo.

### **3.6. Conclusiones del capítulo**

En este capítulo se han establecido las principales condiciones a cumplir para el diseño, ahondando en el tema de la generación termoeléctrica, el convertidor de potencia y las limitaciones tecnológicas existentes en la actualidad, al igual que el caso de los medios de almacenamiento de energía. En la siguiente sección, se conjuntan estas observaciones y se reportan los resultados pertinentes.

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 4.1. Irradiancia medida y conversión a temperatura

El siguiente paso es estimar la cantidad de energía disponible a partir de la radiación solar. Considerando el peor caso para la ciudad de Morelia, se sabe que se cuenta con un promedio de 3.654 KWh/m<sup>2</sup> ó 3.654 horas solares, sin embargo, la energía aprovechable dependerá de la eficiencia del captador solar ( $\eta_{\text{captador}}$ ), de la eficiencia en la conversión termoelectrica ( $\eta_{\text{conversionTE}}$ , y la eficiencia en la conversión del acondicionador de potencia  $\eta_{\text{conversionCD-CD}}$ . La energía captada depende del área del captador A. A todo esto habrá que agregar las pérdidas en el almacén de energía, de manera que la cantidad de energía total en Joules estará dada por:

$$E_{\text{total}} = \left( (3654 \cdot \eta_{\text{captador}} \cdot \eta_{\text{conversionTE}} \cdot \eta_{\text{conversionCD-CD}}) \cdot 3600 \cdot A \right) - \text{Pérdidas} \quad (27)$$

La eficiencia mínima de un captador solar es de alrededor del 40% [Guevara, 2003], mientras que la de un convertidor termoelectrico puede ser tan baja como 0.1%. La energía total deberá ser mayor o al menos igual a los 283.029 Joules necesarios para operar el sistema durante 24 horas. Determinar primeramente estos datos permitirá también dimensionar el área del colector solar A.

### 4.2. Análisis de consumo de la carga.

El primer paso para determinar si la aplicación es viable, es establecer las necesidades de consumo de la carga. Posteriormente, será necesario cuantificar las pérdidas, sumándolas a la energía que es necesario coleccionar y finalmente, se mide y compara la energía disponible en el medio. Respecto al primer paso, algunos consumos promedio representativos para aplicaciones susceptibles de ser alimentadas por Recolección de energía son los siguientes:

- Comunicación bluetooth y GSM: de 12 a 18 mW promedio (288 a 432 mWh/día), estas son las aplicaciones más exigentes en cuanto a consumo de energía.
- Redes inalámbricas de sensores (WSN): de 50 a 200  $\mu$ W (1.2 a 4.8 mWh/día). Aunque, en general, de acuerdo a varias fuentes de información [Lu & Yang 2010 ], [Penella & Gasulla, 2007], [Kansal et al, 2006] y [Arms et al, 2005], se considera un valor promedio de 100  $\mu$ W como representativo de este tipo de cargas.

De manera general, la energía necesaria, en Joules, está dada por el área bajo la curva de la potencia consumida en un periodo dado, es decir:

$$Energia(J) = \int_{t_1}^{t_2} Potencia\ consumida(W) \cdot dt \quad (26)$$

Por lo tanto, a partir de la información técnica de consumo y considerando que el voltaje de alimentación nominal es de 7.2 V, se determinó el siguiente perfil de consumo teórico, el cual consta de las siguientes cuatro etapas:

1. **Modo standby o de bajo consumo.** En este modo, el equipo entra a un modo de bajo consumo mientras no tenga tareas que realizar, con el fin de minimizar el consumo de las baterías. Esta condición ocurre durante un periodo que tiene una duración de 10 minutos – 22 ms; este es el consumo que el equipo tendrá la mayor parte del tiempo, como corresponde a una carga para recolección de energía. La potencia instantánea, puesto que el voltaje de alimentación es de 7.2 V y la corriente promedio es de 150  $\mu$ A, será de 1.08 mW. La duración de este periodo es de 599.78 segundos, lo que da un total de 647.76 mJoules. En 24 horas de operación, existirán 144 periodos similares, lo que arroja un total de 93.278 Joule/día, simplemente para mantener activo el equipo durante un periodo de 24 horas.
2. **Activación del convertidor interno de 24 VCD.** Transcurrido el periodo anterior, el equipo “despierta” momentáneamente para alimentar los sensores de presión y registrar las lecturas correspondientes, antes de retornar al modo de bajo consumo. El consumo, de acuerdo al fabricante y siguiendo el procedimiento anterior, será de 864 mW durante 22 ms, para un total de 19 mJoul. Nuevamente, se presentarán 144 eventos de este tipo a lo largo del día, haciendo un total de 2.73 Joule en un periodo de

24 horas. Hay que observar que aunque el consumo de potencia es mucho más alto que el modo standby, el periodo de encendido es muy corto y el total energético en el mismo periodo de 10 minutos para poder activar el convertidor, los sensores y registrar un dato en el equipo es menor.

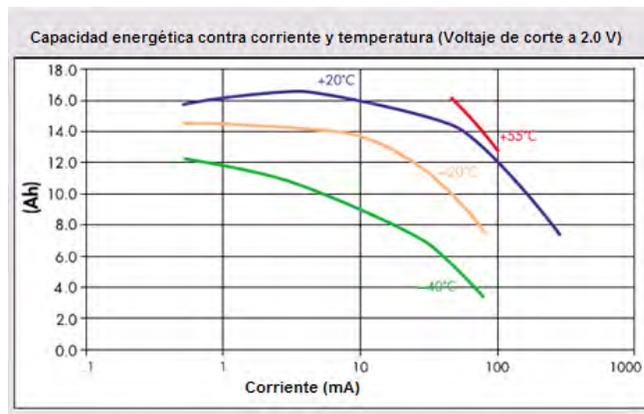
3. **Envío de datos por canal GSM durante 1 minuto.** Este es el periodo normal en el que el equipo envía un histórico de datos completo registrado a lo largo de 24 horas a través de la red celular, haciendo un solo envío por día en condiciones normales de operación. Este es un perfil difícil de determinar pues involucra tanto envío como recepción de datos a través del canal celular para verificar que la operación ha sido exitosa. Se consideró un promedio con los consumos de envío y recepción; lo que arroja un valor de 153 mA y una potencia instantánea de 1.1016 W, a 7.2 Volts de alimentación. Ya que el envío requiere 60 segundos, el total por envío será de 66.09 Joules. Esta es la etapa de mayor consumo.
4. **Ventana de comunicaciones.** Esta es una característica intrínseca del equipo, que no puede eliminarse y que consiste en abrir el canal de comunicaciones diariamente en un horario preestablecido durante 5 minutos para que el equipo pueda ser contactado vía remota para hacer cambios de configuración o extraer algún dato necesario. Dado que el periodo de encendido es muy largo, el consumo de energía lo será también. Se consideró nuevamente un consumo promedio de 153 mA, ya que puede existir tanto envío como recepción de información; es decir que este perfil es muy similar al anterior, excepto que posee una duración 5 veces mayor, por lo que la energía necesaria será de 330.45 Joul.

El requerimiento total de energía en 24 horas es de 492.548 Joules, siendo el 67% exclusivamente para la ventana de comunicaciones. Un resultado importante es que el segundo consumo más alto es el del modo de standby (19%). Puede verse que aún cuando el equipo permanece “dormido” la mayor parte del tiempo, el consumo en este modo resulta ser un factor a considerar en un periodo de 24 horas.

La disponibilidad energética total de las baterías del equipo (SAFT LS 33600), considerando que consta de cuatro baterías de 3.6 V en un arreglo serie/paralelo, que forma un paquete que proporciona 7.2 V y 32 Ah, es de 230.4 Wh. En la práctica, se ha observado que la duración normal promedio es de 1.5 años aproximadamente (547.5 días). Considerando que 1 Wh =

3600 Joule, entonces la energía disponible será de 829.44 KJ. Si se divide este valor entre los días de operación, el consumo diario será de 1514.95 Joules; es decir, 3 veces mayor a lo esperado a partir del análisis anterior, utilizando los valores promedio de consumo proporcionados por el fabricante del equipo.

Otra forma de ver este problema es que la duración de la batería indica que el equipo es capaz de operar durante un total de 13140 horas. Dividiendo la energía total (en Wh) entre las horas de operación, se obtiene el consumo instantáneo promedio, que es de 17.53 mW. Para el perfil calculado a partir de los datos del fabricante, si el total energético en 24 horas es de 492.548 Joule, al dividir entre el total de segundos en 24 horas (8600), se obtiene que el consumo instantáneo es de 5.7 mW.; por lo tanto, existe una discrepancia muy importante entre el consumo teórico y la duración real de la batería. Para determinar la razón de ello, se analizó la información técnica de la batería para determinar la causa de esta diferencia.

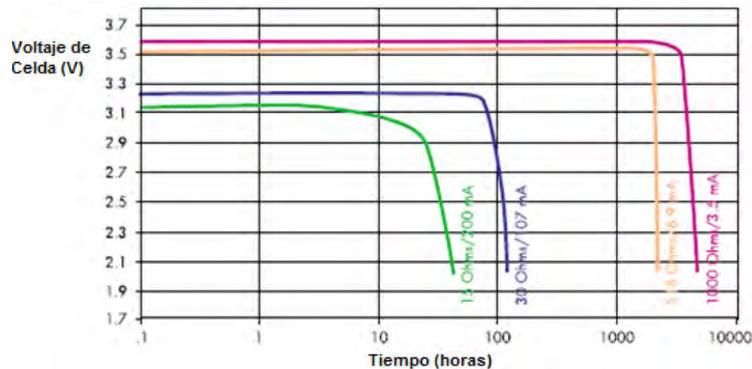


**Figura 4.1. Capacidad energética contra corriente consumida y temperatura en una batería de litio SAFT LS33600.**

La corriente instantánea promedio, considerada a partir de los datos de duración de la batería y del cálculo de perfiles de consumo a partir de la información técnica es de 2.43 mA para el primer caso y de aproximadamente 791.66  $\mu$ A para el segundo. La curva de descarga de la batería, mostrada en la figura x muestra que, para estos valores de corriente promedio, la capacidad energética en Ah por celda prácticamente no se reduce y la batería debería durar una gran cantidad de tiempo; sin embargo, cuando se exigen corrientes más altas, la capacidad se reduce grandemente. Esto ocurrirá durante los periodos de transmisión/recepción de

información por el canal GSM. Aún cuando se consideró un valor conservador de la corriente necesaria en el cálculo del perfil de 150 mA, puede verse que a este valor, a 20 °C la capacidad se reduce desde 14 hasta 12 Ah. Corrientes más altas provocarían una mayor caída en la capacidad de la batería. De acuerdo a [Cap-XX, 2002], la transmisión de datos GSM puede llegar a consumir corrientes tan altas como 2.5 A que, aún cuando ocurren en periodos de tiempo cortos, disminuyen la capacidad de la batería y lentamente la degradan; para estos casos, la reducción en la capacidad de la batería es superior, pues caería por debajo de los 7 Ah para una temperatura de 20 °C

Por otro lado, en la figura 13, se puede ver que a 200 mA, el voltaje de celda disminuye prácticamente a la mitad y el tiempo de vida útil se reduce enormemente. La disminución del voltaje puede provocar fallas en el equipo, en especial si existe circuitería de protección contra bajo voltaje. Nuevamente, considerando las corrientes de consumo promedio, el gráfico muestra que la batería debería durar menos de 10,000 horas, es decir, un poco mas de un año.



**Figura 4.2. Horas de vida útil y caída del voltaje de celda a diferentes corrientes de consumo para una batería de litio LS33600.**

En resumen, en términos de la energía nominal disponible, el equipo parecería consumir mayor cantidad de energía de la calculada a partir de la información técnica del fabricante, aunque por otro lado, la batería aparentemente tendría una duración mayor a la esperada para los niveles de corriente promedio considerados.

La razón para este comportamiento es muy compleja, pues depende tanto de la temperatura de operación como de la química, la degradación durante los altos consumos de corriente y el

factor de auto descarga de la batería [Shukla et al., 2000]. La combinación de perfiles de consumo del orden de unos cuantos  $\mu\text{W}$  a varios Watts en tiempos cortos hace aún más difícil predecir la duración real de la batería. Es claro también que considerar un comportamiento promedio, aunque puede ser una primera aproximación, no refleja el comportamiento interno de lo que ocurre en el equipo y puede llevar a sobre o subdimensionar el requerimiento energético del equipo.

Otro factor importante encontrado en el análisis de la información técnica de la batería, es que en realidad no es posible extraer toda la energía disponible de la misma, pues siempre existirá un nivel remanente por debajo del cual el equipo es incapaz de operar. Los datos mostrados en la figura x están limitados al punto en el que el voltaje de celda cae un 45%. En la práctica se ha observado que el registrador deja de operar cuando el voltaje nominal de la batería cae de 7.2 a alrededor de 6.5 Volts. Esto representa una disminución en el voltaje de sólo 10%,; claramente, existe aún energía disponible en la batería que ya no será posible utilizar, siendo este un problema adicional que no se había contemplado inicialmente: el hecho de que la energía no puede extraerse ni siquiera al 50% de una batería de alta energía.

Las fuentes bibliográficas indican que es muy difícil la medición de la capacidad energética real en una batería [Curtis, 2008], [Shukla et al., 2000], por lo que la mayoría de las veces se hace una aproximación de su desempeño. Estas observaciones son consistentes con lo reportado por [Kompis, 2008] en el sentido de que en la práctica, los usuarios de nodos de redes inalámbricas han observado que por lo general, la duración de las baterías no coincide con las especificaciones de los equipos que incluyen un transceptor de radio de baja potencia, sino que típicamente es más corta de lo esperado.

Ante esta problemática, se midió de manera práctica el consumo para cada uno de los perfiles antes mencionados, a través de una tarjeta de adquisición de datos (NI-USB 6009) con una frecuencia de muestreo de 20 KS/s para detectar pequeñas variaciones que pudieran existir en el perfil de consumo [National Instruments, 2005]. Los datos se registraron mediante el software LabVIEW. Se conectó un resistor con un valor nominal de 0.36 Ohms al 1% en serie con la batería y se midió la caída de tensión en modo diferencial a través de la misma para obtener de manera indirecta la corriente circulante. Se midió también el voltaje de la batería sin carga y el voltaje directamente en los terminales de alimentación del equipo para medir la

caída de tensión. Las mediciones se almacenaron en computadora como archivos datalog, es decir que incluyen la fecha y hora de captura (timestamp) y los valores de corriente y voltaje que corresponden a estos tiempos, con la ventaja de que ocupan poco espacio en memoria. Posteriormente, a través de otra aplicación desarrollada también en LabVIEW, se analizaron los datos fuera de línea. El análisis consiste en recuperar la información del archivo correspondiente, la cual se muestra en la pantalla del programa. Mediante cursores, se elige libremente el rangos de datos deseados. Una vez seleccionada una región de interés, un algoritmo de integración numérica con el método Simpson 3/8 iterativamente calcula el área bajo la curva y por lo tanto, la energía en Joules, considerando el consumo de corriente medido y el voltaje en terminales del equipo. Adicionalmente, se obtuvieron los valores promedio tanto de voltaje, corriente, potencia y energía para las regiones analizadas. La figura 14 muestra la pantalla principal del programa. La pantalla superior muestra el archivo completo de datos recuperado de la memoria de la computadora y la inferior la región de interés seleccionada.

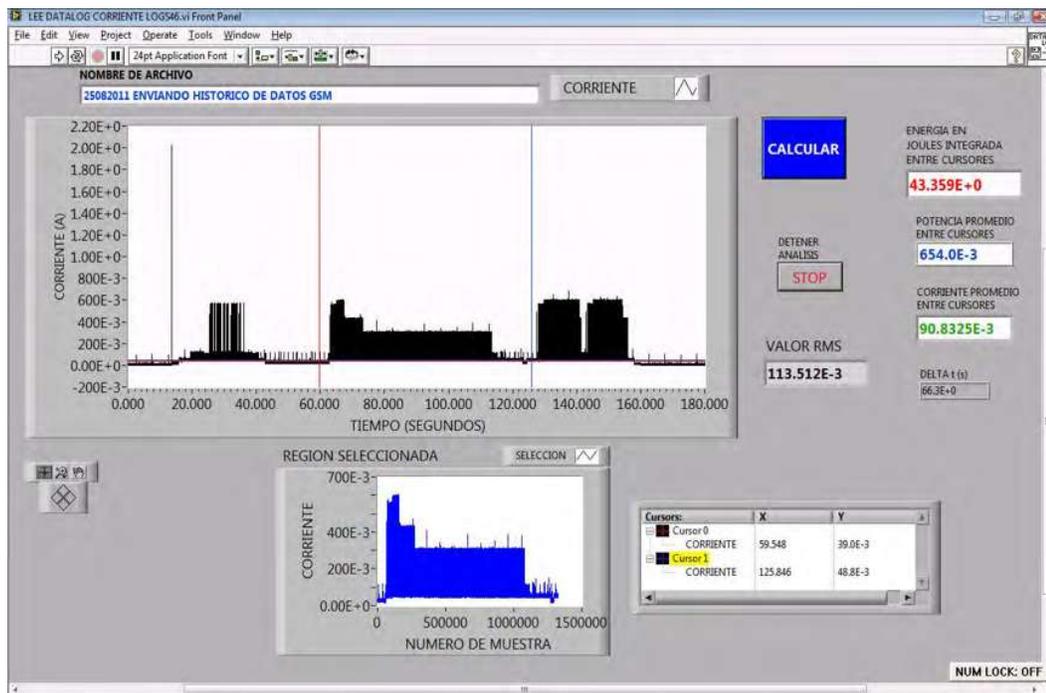


Figura 4.3. pantalla del programa analizador de datos de consumo del registrador de datos.

Los resultados son los siguientes:

1. **Perfil en modo de bajo consumo.** En este modo, se encendió el equipo sin cargar ninguna configuración. Debido al bajo valor de corriente consumido, las lecturas presentaron un alto nivel de ruido, el cual se midió uniendo las entradas del amplificador de instrumentación de la tarjeta de adquisición de datos y aplicando un voltaje de entrada de 0 Volts, determinándose un nivel de ruido promedio en sucesivas pruebas de 4.83 mV, aún siguiendo los lineamientos del fabricante para la reducción de ruido, equivalentes a 1.48 mA de ruido. Este valor se restó dentro del software a las mediciones tomadas en forma automática, para compensar el nivel de ruido. El consumo medido promedio para el equipo fue de 196  $\mu$ A, es decir, de un 30% mayor a lo esperado. Posteriormente se configuró el equipo con el perfil completo (lectura cada 10 minutos, encendido de sensores durante 22 ms y envío de datos cada 24 horas) y se pudo verificar que los niveles de corriente medidas fueron los mismos. La energía total integrada por el software indicó un total de 824.07 mJoul.
2. **Perfil de activación de sensores.** En esta etapa, se pudo observar que la corriente es menor de lo reportado en los datos técnicos, siendo de solamente 18.53 mA promedio, aunque en el arranque alcanzó hasta 117 mA, contra 120 mA promedio esperados; sin embargo, el tiempo de activación total fue de 120 ms, en lugar de 22 ms. La energía integrada en este periodo fue de 2.22 mJ, muy semejante a lo estimado con la información de fabricante. La figura 15 muestra este perfil de consumo.

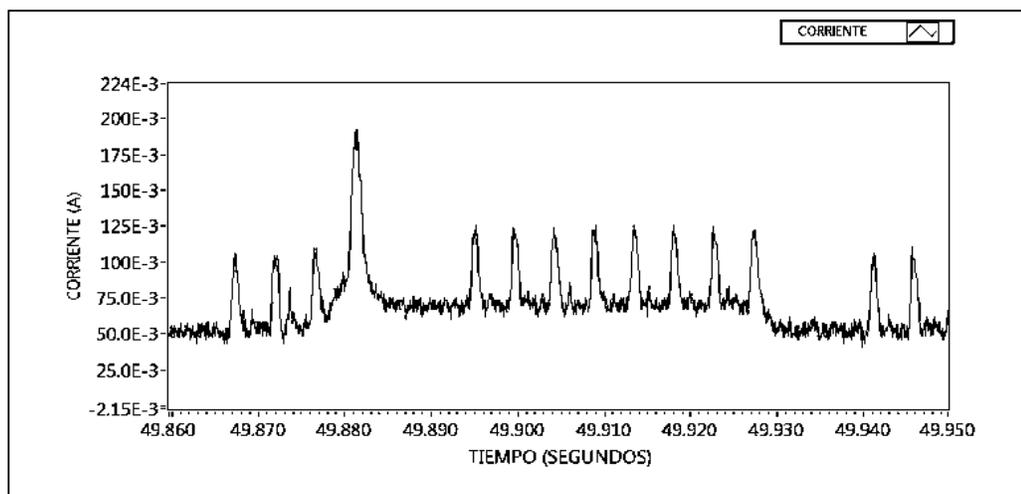


Figura 4.4. Consumo de corriente del perfil de activación de sensores.

3. **Envío de datos vía GSM.** El registro de datos muestra que el envío requiere 100 segundos en promedio. La razón es que el módem GSM se apaga completamente para ahorrar energía de las baterías y requiere aproximadamente 50 segundos para iniciar antes de poder hacer un envío de datos. la duración promedio únicamente del envío de datos fue bastante consistente en repetidas pruebas y es de 51.4 segundos, consumiendo 101.9 mA promedio. Este perfil se muestra en la figura 16. La energía total necesaria desde el arranque hasta el envío de datos es de 66.09 Joul y la corriente promedio necesaria es de 75.236 mA. Existe un pico de corriente inicial que alcanza los 2.1 A, con una duración de 7.6 ms, como se muestra en la figura 17; de acuerdo a la información anterior, estos picos de corriente son los que degradan el funcionamiento de la batería.

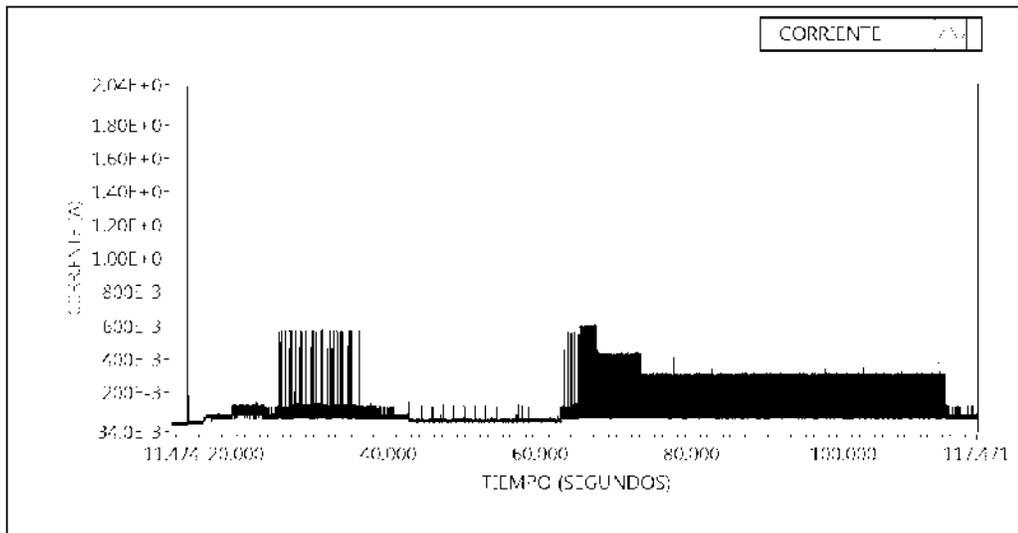
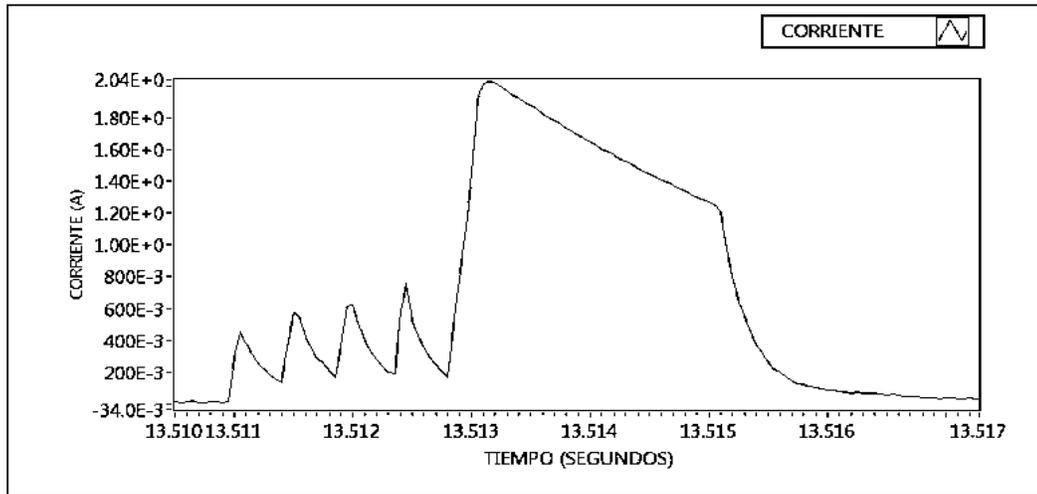
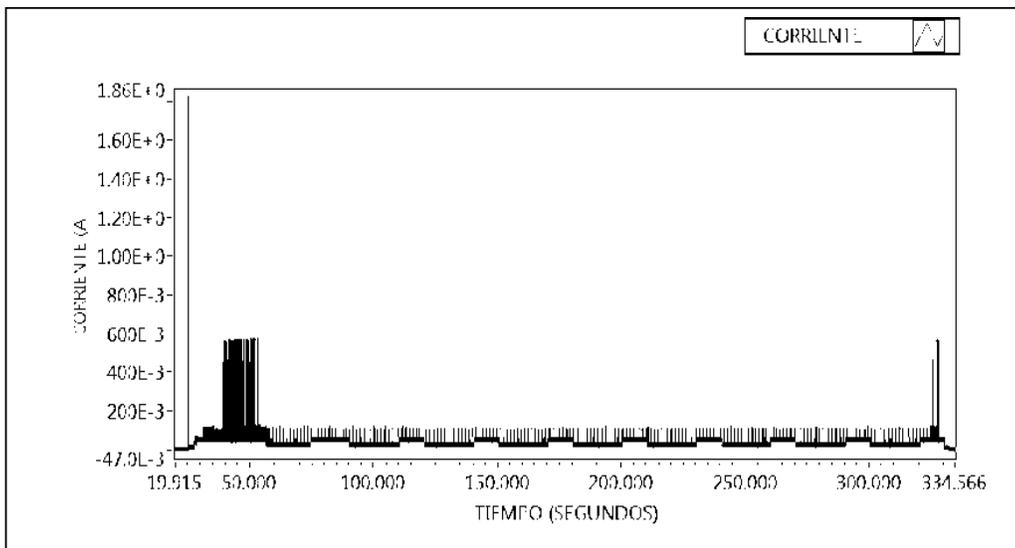


Figura 4.5. Consumo de corriente del perfil de envío de datos por el canal GSM

4. **Ventana de comunicaciones.** La duración promedio de la ventana de comunicaciones es de 310.6 segundos (5.1766 minutos), incluyendo el encendido del módem. La corriente promedio es de 46.228 mA y la energía total integrada es de 103.223 Joul. El perfil se muestra en la figura 18.



**Figura 4.6. pico de corriente al inicio de la transmisión GSM.**



**Figura 4.7. Perfil de consumo de la ventana de comunicaciones y pico de corriente inicial.**

Nuevamente, como se puede ver en la figura 17, aparece inicialmente el pico de corriente cuando se activa el módem.

La tabla 13 muestra el comparativo entre las 3 aproximación realizadas para determinar el consumo energético del equipo.

Tabla 4.1. Comparación de consumo energético del registrador de datos.

<b>Perfil</b>	<b>Requerimiento energético en 24 horas de acuerdo a datos técnicos (Joules)</b>	<b>Requerimiento energético en 24 horas a partir de la información práctica de duración de la batería (Joules)</b>	<b>Requerimiento energético experimental en 24 horas (Joules)</b>
<b>Standby</b>	93.278	ND	121.90
<b>Alimentar sensores</b>	2.73	ND	2.306
<b>Envío de datos</b>	66.09	ND	55.60
<b>Ventana de datos</b>	330.45	ND	103.223
<b>TOTAL</b>	<b>492.548</b>	<b>1514.95</b>	<b>283.029</b>
<b>Potencia instantánea promedio</b>	<b>5.7 mW</b>	<b>17.53 mW</b>	<b>3.2758mW</b>

Estos resultados muestran que existe una gran variación en el cálculo de los requerimientos energéticos a partir de observaciones prácticas, los datos técnicos y el consumo real medido experimentalmente. El cálculo a partir de los datos técnicos arrojó un consumo de energía 1.7 veces mayor al medido, aunque en este caso se asumieron ciertos valores tanto para la transmisión de datos como para la ventana de comunicaciones, ya que se carecía de la información específica. Respecto al cálculo de la duración de las baterías a partir de observaciones prácticas, se puede ver que aparentemente se consume 5 veces más energía de la real. Esto, como ya se ha mencionado, se debe a que en realidad no se extrae toda la energía de la batería. Es posible concluir entonces que la información de la disponibilidad energética de las baterías no es muy representativa de la realidad. Para este caso en específico, utilizar los datos técnicos de consumo constituyen una buena aproximación; sin embargo, los perfiles de operación pueden ser muy complejos, por lo que la mejor opción será siempre medir el consumo de energía real.

### 4.3. Caracterización de transductores

Al no existir información sobre el comportamiento de elementos Peltier como termogeneradores, la primera aproximación consistió en evaluar su comportamiento directamente exponiéndolos a la radiación solar, a fin de determinar su capacidad de generación bajo estas condiciones; los datos técnicos de los TECs utilizados, fabricados por Marlow Industries se muestran en la tabla 14:

**Tabla 4.2. Módulos utilizados para la prueba con radiación solar.**

	<b>RC 12-4</b>	<b>RC 3-8</b>	<b>RC 3-2.5</b>
<b>Tmax (°C)</b>	124	123	123
<b><math>\Delta T</math> max (°C)</b>	74	73	73
<b>Qmax (W)</b>	39	19	6
<b>Vmax (VDC)</b>	16.7	4.1	4.1
<b>Imax (ADC)</b>	3.7	7.4	2.5
<b>Rout (<math>\Omega</math>, 25 °C)</b>	3.3	1.0	1.2

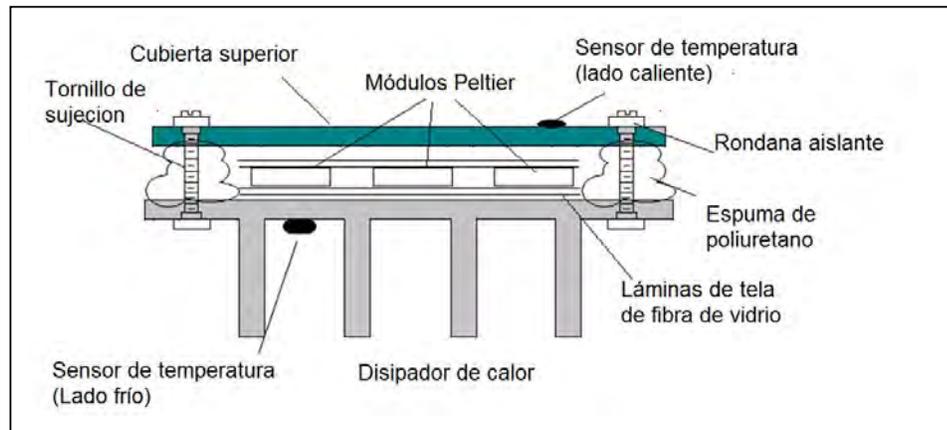
Aunque se adquirieron un total de cinco dispositivos diferentes, todos del mismo fabricante, se eligieron éstos en particular por ser los de valores extremos de la serie en cuanto a potencia consumida máxima (RC12-4 y RC3-2.5), asumiendo que éste sería un parámetro determinante para la generación de energía y un dispositivos con valores intermedios (RC3-8). Donde:

- Tmax es la temperatura máxima de operación del dispositivo.
- $\Delta T$  max es el diferencial de temperatura máximo que el dispositivo puede alcanzar cuando se le aplica una corriente, este puede positivo o negativo, dependiendo de la dirección de la corriente.
- Qmax es la potencia eléctrica máxima consumida.
- Vmax es el voltaje máximo que se puede aplicar al TEC.
- Imax es la corriente máxima que circulará a través del dispositivo.
- Rout. Es la resistencia eléctrica del módulo actuando como módulo Peltier o TEC.

La evaluación se llevó a cabo mediante la construcción de un arreglo experimental diseñado para cumplir con los siguientes requisitos:

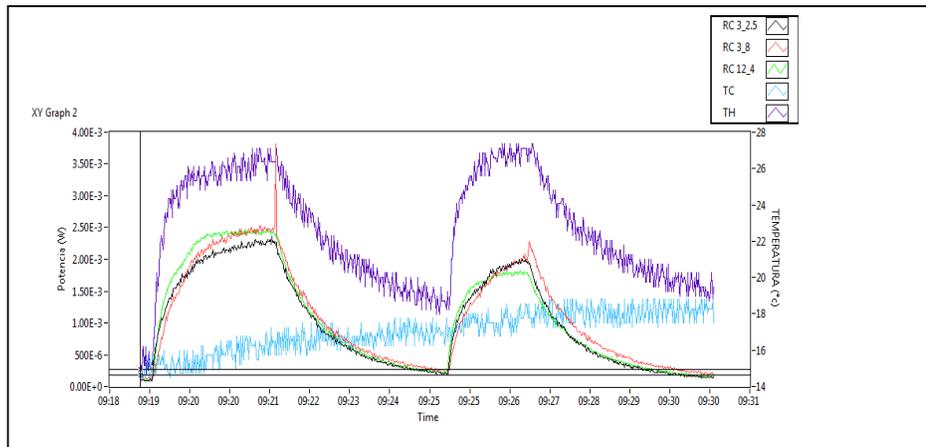
1. Permitir evaluar varios módulos al mismo tiempo para poder comparar su comportamiento bajo las mismas condiciones. El área utilizada fue de 180 x 75 mm, compuesta de aluminio de 3 mm de espesor para el lado caliente, donde en este caso se aplicó la radiación solar. Es posible instalar los 5 módulos adquiridos en esta superficie.
2. Determinar el valor máximo de  $\Delta T$  alcanzable.
3. El aislamiento entre el lado caliente y el lado frío debe mantener el diferencial de temperatura independientemente de su valor, minimizando la transferencia de calor por conducción, radiación y convección entre las caras de los módulos. Esto se logró mediante 3 capas de tela de fibra de vidrio; este es el material comercial sólido con mejores características como aislante térmico.
4. Para el lado frío se utilizó un disipador de calor del fabricante Wakefield Thermal Solutions modelo 421 A. para llenar los huecos existentes, se utilizó espuma de poliuretano.
5. Para mejorar el contacto de las placas del transductor con la placa del lado caliente y el disipador del lado frío, se emplearon tornillos con rondanas de aislamiento de nylon, evitando así transferir calor del lado caliente al frío.
6. Adicionalmente, debería ser posible medir las temperaturas de los lados frío y caliente, esto se hizo mediante sensores de temperatura de estado sólido LM35 (National semiconductors). La figura 19 muestra el arreglo construido.

Se probó que el aislamiento funcionara adecuadamente aplicando inicialmente diferenciales de temperatura (no controlados) y observando la evolución de la temperatura de la cara fría, asegurándose las temperaturas en las caras fría y caliente no se igualaran. Para evaluar la potencia eléctrica generada, se conectaron resistencias eléctricas de 1.19, 1.05 and 3.4 Ohms al 1% respectivamente, buscando igualar la resistencia interna reportada por el fabricante y obtener la mayor transferencia de potencia posible. La señal de los sensores de temperatura, así como los voltajes en cada uno de los resistores de carga, se aplicaron a una tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6009 de National Instruments.



**Figura 4.8. Arreglo para la caracterización de transductores expuestos a energía solar.**

Se aplicaron técnicas de reducción de ruido [National Instruments, 2008]. Se tomó una muestra cada 10 segundos. La información se guardó en archivos tipo datalog para mantener los archivos de datos en un tamaño compacto y se procesó posteriormente fuera de línea. La figura 20 muestra un comportamiento típico de los módulos evaluados, donde la temperatura de la cara fría (TC) lentamente se incrementa debido a la transferencia de calor de la cara caliente hacia la cara fría. Esto indica que la disipación de calor natural, debida a la convección, no es suficiente para retirar el calor eficientemente en la cara fría; sin embargo, se puede ver que existe un gradiente respecto a la temperatura del lado caliente (TH) que se decrementa cuando la radiación solar incidente disminuye y por lo tanto, la temperatura en la cara caliente disminuirá también. La salida de potencia de los tres módulos evaluados, según puede verse, sigue a las variaciones del gradiente de temperatura y no se aprecia diferencia entre uno y otro módulo; aparentemente los tres generan la misma cantidad de potencia bajo las mismas condiciones de trabajo.



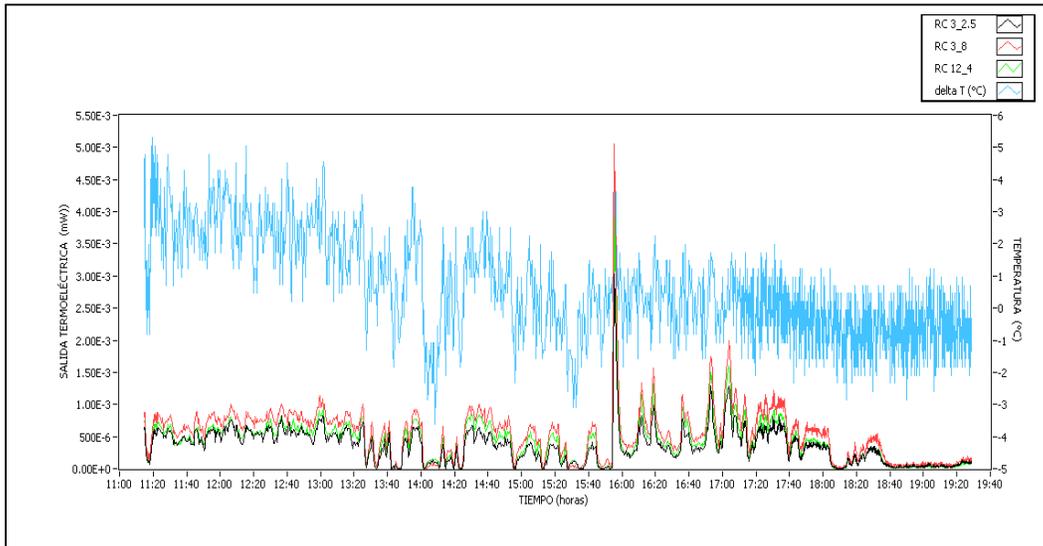
**Figura 4.9. Comportamiento de los tres módulos en el arreglo experimental.**

Se realizaron varias corridas en días sucesivos, obteniendo los siguientes resultados representativos:

1. Potencia pico promedio alcanzada: 1.39 mW
2. Potencia promedio en un periodo de 5 horas de radiación: 29  $\mu$ W, es decir que el total de energía captada es de sólo 522 mJoul
3. Voltajes generados: de 24 mV a 68 mV.
4. Temperatura máxima alcanzada en el lado caliente: 41 °C
5. Gradiente de temperatura  $\Delta T$  promedio: 4.97 °C
6. La energía captada se encuentra muy lejana de 283 mWh/día

La figura 21 muestra un día en particular, en donde se presentaron tanto momentos de alta radiación solar como nublados parciales, totales e incluso algunas lluvias ligeras. Se puede observar, a lo largo del periodo de prueba de 8 horas, que el gradiente de temperatura tiende a disminuir por falta de mecanismos de remoción de calor en el lado frío, en el cual la temperatura se incrementa lenta pero constantemente, mientras que la salida de potencia de los módulos es prácticamente la misma para cada gradiente de temperatura, aunque se puede observar que, en determinados momentos, el módulo RC3-8 produce potencias más altas. Aún así, la energía captada no es suficiente ni siquiera para operar un nodo de red inalámbrica, cuyo consumo promedio representativo, como se ha mencionado anteriormente, se puede

considerar de 100  $\mu$ W. En este experimento, se pudo observar también que los sensores de estado sólido son relativamente lentos para responder a las variaciones de temperatura, ya que los cambios en la salida de los módulos no se reflejaba en las lecturas del gradiente sino hasta cierto tiempo posterior.



**Figura 4.10. comportamiento de los tres módulos expuestos a radiación solar.**

A pesar de los resultados anteriores, experimentalmente, al aplicar diferenciales de temperatura mayores no controlados, se pudo observar que la cantidad de potencia generada se incrementa grandemente, aunque su cuantificación era difícil debido a las condiciones ambientales tan cambiantes; por esta razón se decidió caracterizar bajo condiciones controladas el desempeño de los módulos Peltier como generadores, pues los resultados de estos experimentos anteriores parecían indicar que ni el tamaño ni la cantidad de potencia que consumen como módulos Peltier parecían ser determinantes para conocer o predecir en mayor o menor medida la cantidad de energía que pueden producir como generadores. La única excepción observada fue que a mayor voltaje de trabajo, la salida en mili voltaje fue mayor, alcanzado los 90 mV para el módulo RC12-4.

Para determinar la eficiencia de la conversión termoeléctrica, se caracterizaron los transductores mostrados en la tabla 15.

**Tabla 4.3. Características técnicas de los transductores caracterizados bajo condiciones controladas.**

	RC 3-2.5	RC6-6	RC 12-4
$\Delta T$ max (°C)	73	73	74
Qmax (W)	6	33	39
Vmax (VDC)	4.1	8.2	16.7
I <sub>max</sub> (ADC)	2.5	5.6	3.7
R <sub>in</sub> (Ω)	1.2	1.2	3.3

El mercado comercial de los módulos Peltier o TECs es del tipo:

**RCX-Y**

Donde X indica el voltaje de trabajo del TEC e Y es el consumo de corriente. Para su caracterización como generadores, es necesario establecer un gradiente de temperatura entre caras, con la menor variación de temperatura posible. Para lograrlo, los módulos se colocaron entre dos placas de aluminio huecas, aplicando presión mecánica mediante una prensa de tornillo y utilizando grasa térmica para mejorar la transferencia de calor entre la placas y las caras del módulo de acuerdo a las recomendaciones en [Tellurex, 2006], [Laird technologies, 2010 ]. A través de una de las placas se hizo circular agua a una temperatura constante y cercana a la del medio ambiente, a la que se denominó como agua fría; esta temperatura permaneció controlada y con mínimas variaciones a lo largo del experimento y se aplicó al lado frío de los módulos. En la otra placa, en contacto con la cara caliente, se aplicó agua a diferentes temperaturas, denominada agua caliente, superiores a las del lado frío, creando así un gradiente a partir de una temperatura de referencia, las figuras 22 y 23 muestran la apariencia de las placas y el esquema general del experimento.

La temperatura del agua en cada placa se mantuvo mediante controladores PID independientes con una precisión de  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ . El gradiente aplicado se midió directamente en las caras cerámicas de los módulos Peltier mediante termopares tipo K mediante una tarjeta de adquisición para temperatura [National Instruments, 2003], ya que debido a la transferencia de calor existen pequeñas diferencias de temperatura entre la superficie de las placas y las caras del módulo; de esta forma se mide directamente el gradiente aplicado al módulo o caracterizado, aunque en este caso, las diferencias de temperatura fueron menores a los  $0.02^\circ\text{C}$ . La salida de voltaje se relaciona con el parámetro  $\alpha$  como se ha mencionado

anteriormente, por lo que esta prueba permite determinar el valor del coeficiente Seebeck de los módulos y su resistencia eléctrica interna, entre otros parámetros.



Figura 4.11. Placas huecas empleadas para la caracterización de los módulos.

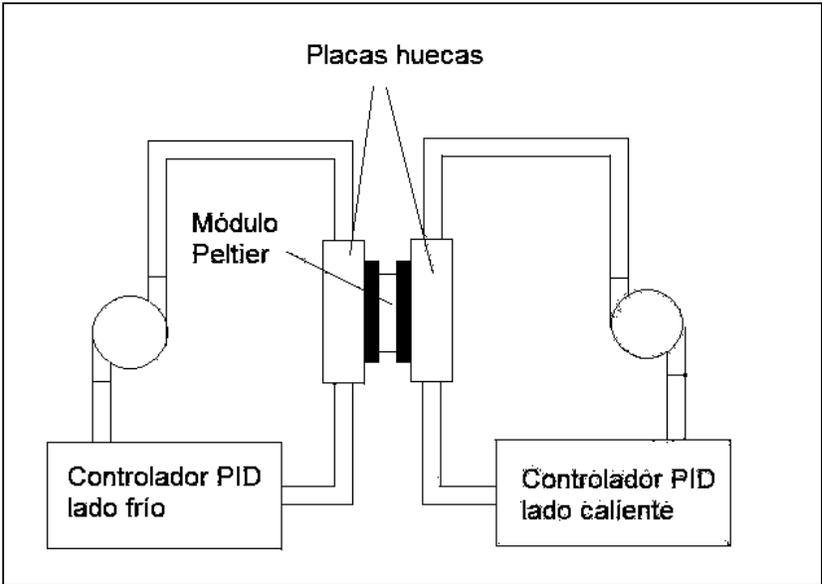
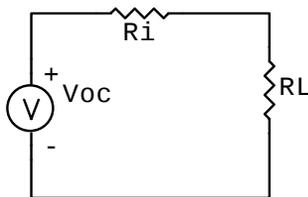


Figura 4.12. Esquema general del arreglo experimental para caracterizar los módulos Peltier.

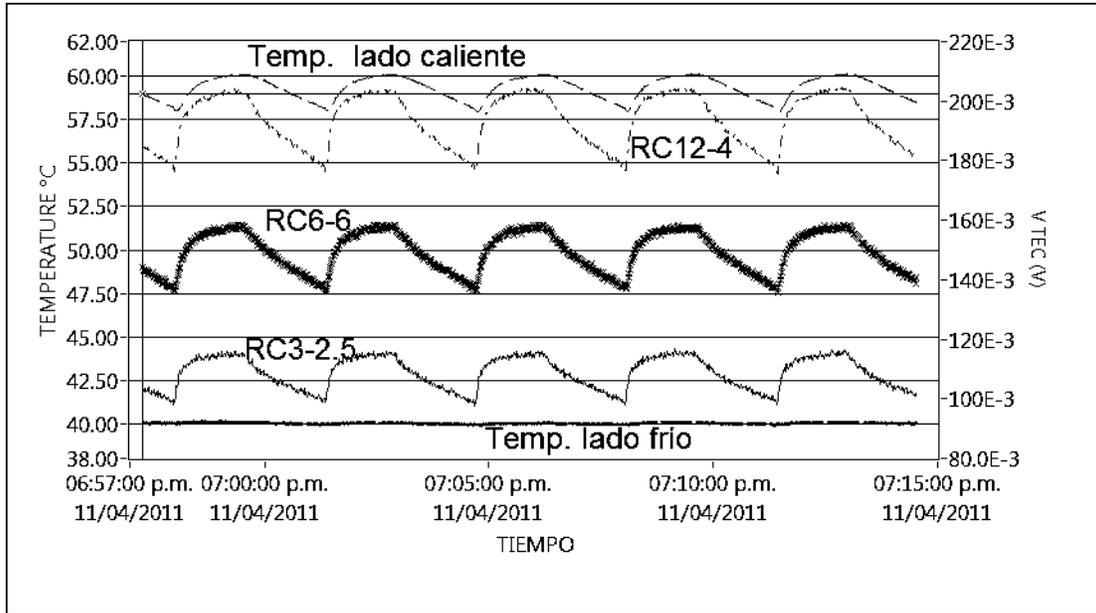
Una vez estabilizado el gradiente aplicado, es necesario determinar la resistencia interna ( $R_i$ ) del módulo, a fin de predecir la máxima potencia que el transductor puede entregar, de acuerdo al teorema de máxima transferencia de potencia utilizado en circuitos eléctricos, considerando que se modela como una fuente de voltaje ideal con un resistor interno en serie (equivalente Thévenin), como se muestra en la figura 24. Para ello, se tomaron lecturas de voltaje a circuito abierto ( $V_{oc}$ ) del módulo y posteriormente, se conectaron a la salida eléctrica resistores variables de carga ( $R_L$ ), al 1% de precisión, ajustando su valor manualmente hasta obtener un voltaje igual a  $\frac{1}{2} V_{oc}$ . La razón es que cuando esto ocurre, significa que el valor del resistor  $R_L$  es igual al valor del resistor interno  $R_i$  del generador, en este punto se transfiere la mayor cantidad de potencia, dividiendo el valor de  $V_{oc}$  a la mitad. A partir de este valor se pudo determinar el coeficiente Seebeck y la potencia generada, que son los principales parámetros de interés de un generador termoeléctrico. Las señales se adquirieron y almacenaron mediante una tarjeta de adquisición de datos, a una frecuencia de 1 muestra cada 10 segundos, debido a que es un proceso lento y aplicando compensación de temperatura incluida en la tarjeta para los termopares tipo K. Debido a los niveles de voltaje tan reducidos, tanto en los módulos como en los termopares, se aplicaron también técnicas de reducción de ruido recomendadas por el fabricante de la tarjeta y se tomaron lecturas en modo diferencial para rechazar señales indeseadas. Se estableció el nivel promedio de ruido (alrededor de 4 mV) y se compensaron en software todas las lecturas respecto a este nivel. La caracterización de los módulos se realizó en un rango de gradientes de temperatura desde 1 hasta 50°C, almacenando la información mediante un programa desarrollado en labVIEW.



**Fig. 4.13. Equivalente eléctrico de la salida de un generador termoeléctrico.**

El controlador del lado frío tiene la capacidad de mantener muy estable la temperatura ya que cuenta tanto con un actuador calefactor como con un sistema de refrigeración, aplicando calor o retirándolo según sea necesario, por esa razón se utilizó como referencia en el lado frío. El

controlador del lado caliente solo tiene capacidad de calentamiento y su enfriamiento depende de las condiciones ambientales de operación, lo que produce oscilaciones de temperatura debido a la histéresis térmica. La figura 25 muestra una respuesta típica, donde la temperatura del lado caliente (TEMP CALIENTE) presenta la ondulación mencionada, mientras que la temperatura del lado frío (TEMP FRIO) permanece constante:



**Figura 4.14.** Respuesta estable típica de las temperaturas en los lados frío y caliente de los módulos caracterizados.

Estas oscilaciones, al aparentar ser muy estables, deberían tener un valor promedio representativo. Para probar esta tesis, se realizó una prueba de coeficiente de variación o CV, el cual, en forma general, está dado por (28):

$$CV = \left( \frac{\text{desviación estándar}}{\text{valor promedio}} \right) \times 100 \quad \text{Ec. (28)}$$

La desviación estándar es una medida estadística que determina qué tan dispersos se encuentran los valores respecto a un valor medio. Cuando este valor se divide entre el promedio, se obtiene una indicación directa de qué tan representativas son las lecturas de la realidad. La figura 26 muestra los valores de CV para todos los valores de  $\Delta T$  obtenidos experimentalmente, tanto para el lado caliente (TH) como para el lado frío (TC) y en los 3 módulos termoeléctricos caracterizados:

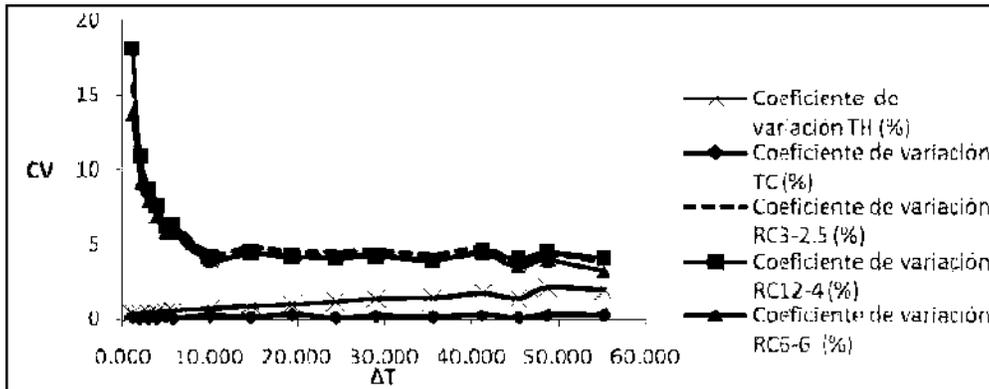


Figura 4.15. coeficiente de variación para las lecturas tomadas en la caracterización de los módulos.

Se observa que el CV es mas alto a valores de  $\Delta T$  menores para los módulos en general, debido a que se producen unos cuantos mili Volts, los cuales se ven enmascarados por el ruido eléctrico existente, aún cuando se tomaron medidas para reducirlo al máximo; sin embargo, en el peor caso es del 18%, disminuyendo rápidamente a solo un 4% a partir de un  $\Delta T$  de 10 °C.

Por otro lado, las lecturas en los lados frío y caliente presentaron aún menor desviación. Como era de esperarse, la temperatura en el lado frío se mantiene con un CV de alrededor del 0.2% debido al estricto control de temperatura. Las lecturas del lado caliente, a pesar de las variaciones observadas, muestran un CV máximo del 2% en todo el rango. La razón por la que se incrementa su valores se debe a que al aumentar el gradiente  $\Delta T$ , las oscilaciones se hacen mas pronunciadas. Por lo tanto, puede considerarse el valor promedio de las oscilaciones como representativo del comportamiento de la temperatura en el lado caliente.

En cuanto al coeficiente Seebeck ó  $\alpha$ , el valor de este, a circuito abierto para cada uno de los módulos se muestra en la figura 27:

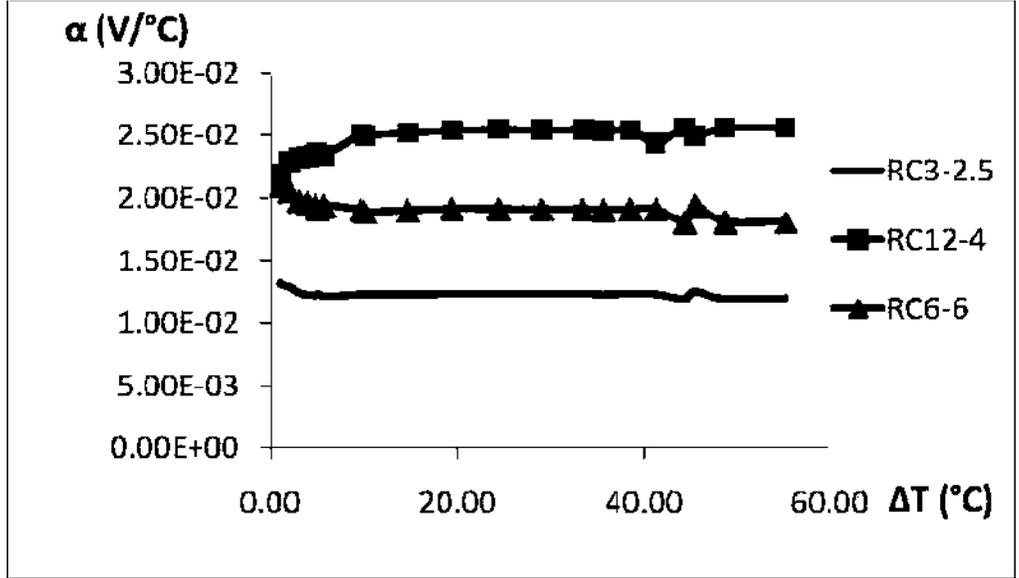


Figura 4.16. Coeficiente Seebeck de los diferentes módulos.

La diferencia fundamental, además de la magnitud, es que por debajo de un  $\Delta T$  de  $10^{\circ}\text{C}$ , en los módulos RC6-6 y RC3-2.5, el valor de  $\alpha$  disminuye hasta estabilizarse, mientras que para el RC12-4, se incrementa primeramente y después se estabiliza igualmente a partir de un gradiente de aproximadamente  $10^{\circ}\text{C}$ ; esto puede deberse al ruido eléctrico existente, por lo que los valores promedio para cada uno de los módulos, a partir de un diferencial de  $10^{\circ}\text{C}$ , se muestra en la tabla 16:

Tabla 4.4. Coeficiente Seebeck promedio de los diferentes módulos a partir de un  $\Delta T$  de  $10^{\circ}\text{C}$ .

RC 3-2.5	RC6-6	RC 12-4
12.5 mV/°C	19.4 mV/°C	24.1 mV/°C

La respuesta en corriente a través de la carga se muestra en figura 28, donde se puede ver que la producción de corriente permanece casi constante, con pocas variaciones, lo que significa que, para el rango de temperaturas considerado, la resistencia interna del módulo no sufre de grandes variaciones. Claramente, el módulo RC6-6 es el que produjo la mayor cantidad de corriente aún cuando su coeficiente Seebeck no es el más alto.

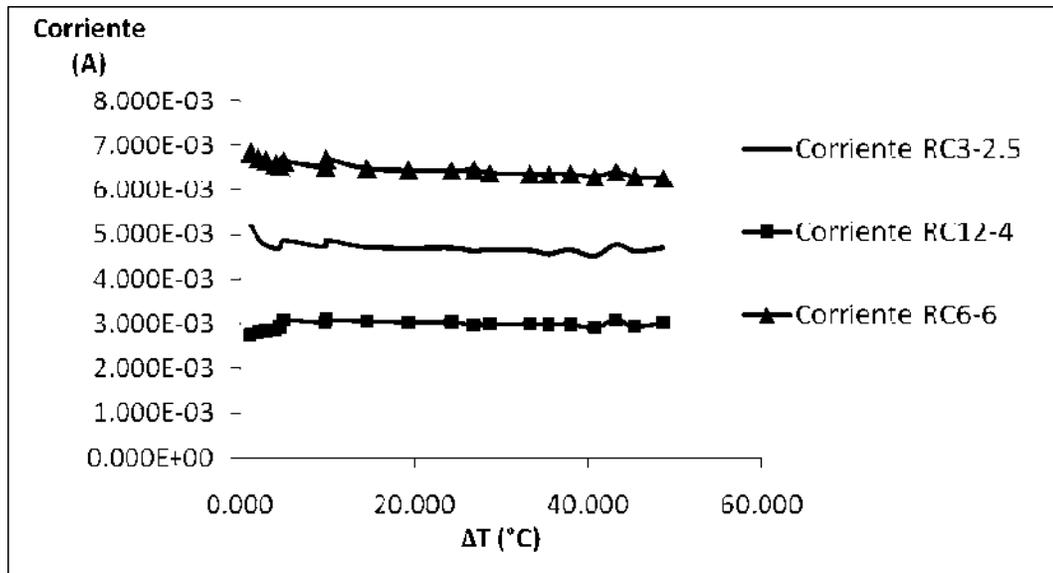


Figura 4.17. Respuesta en corriente de los módulos caracterizados.

La resistencia interna de cada uno de los TECs se muestra en la figura 29:

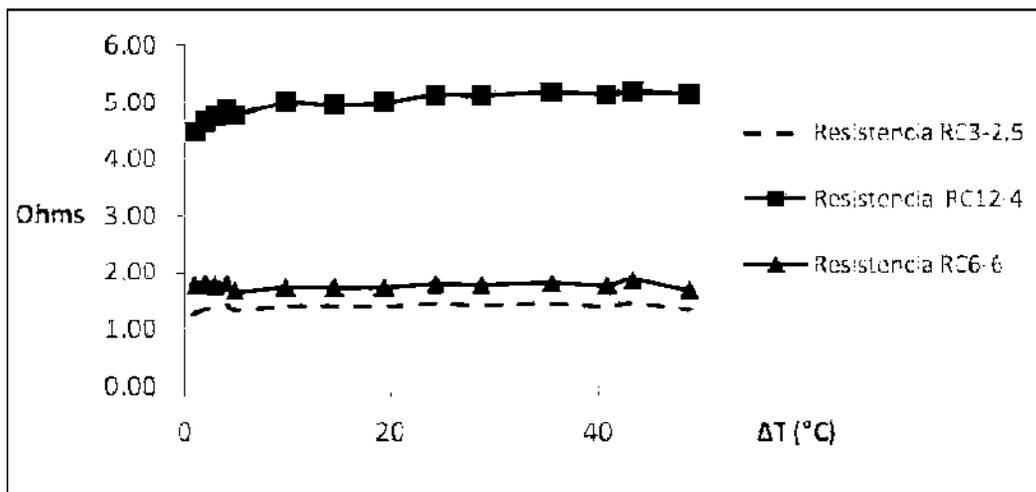


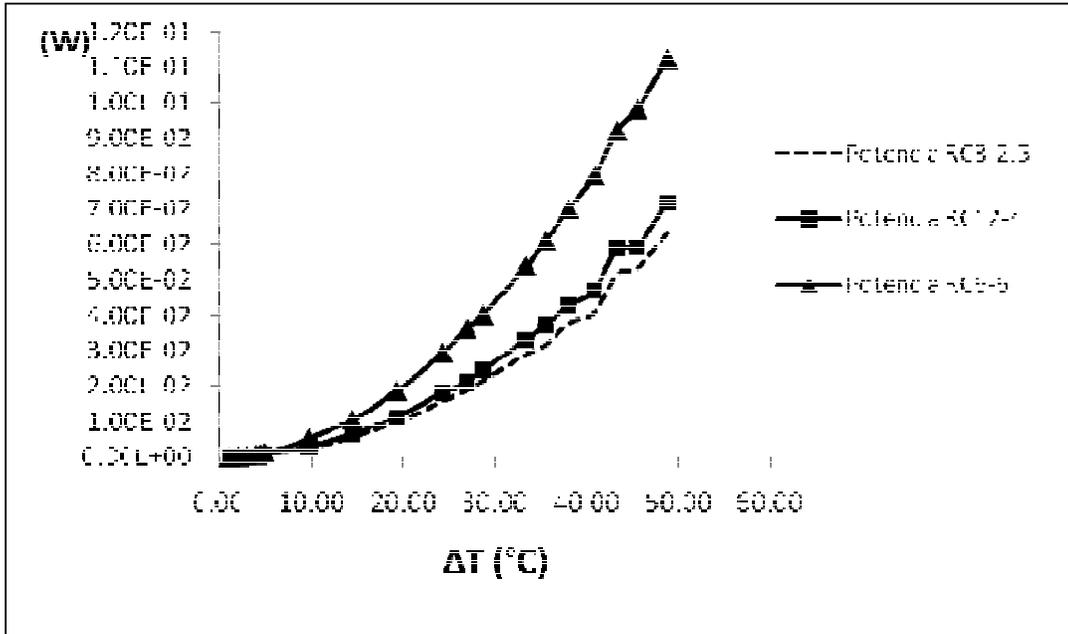
Figura 4.18. Resistencia interna de los módulos caracterizados.

La tabla 17 muestra los valores promedio de Resistencia interna para cada módulo, a partir de los 10°C.

**Tabla 4.5. Resistencia interna promedio de los módulos caracterizados.**

RC 3-2.5	RC6-6	RC 12-4
1.40 Ohms	1.77 Ohms	4.76 Ohms

Este valor es muy importante para determinar la eficiencia máxima en la conversión de energía, puesto que para lograrlo, debe igualarse su valor con el de la impedancia de entrada del circuito convertidor que transforme el mili voltaje en valores de voltaje útiles. Los valores experimentales mostraron ser de 16%, 28% and 44% más altos que la resistencia interna nominal operando como módulos Peltier. La potencia generada por los módulos se muestra en la figura 30:



**Figura 4.19. Potencia generada por los módulos caracterizados.**

Hasta un gradiente por debajo de 10°C, según puede verse en la figura anterior, los tres transductores producen prácticamente la misma potencia; esto coincide con los resultados observados experimentalmente con los módulos expuestos a la radiación solar, con un gradiente promedio de alrededor de 5 °C; sin embargo, por encima de este valor, claramente el módulo RC6-6 es el que proporciona la mayor cantidad de potencia, alcanzando hasta 110

mW con un gradiente de 50 °C. La ecuación de ajuste a una curva de potencia que representa este comportamiento, determinada a través de LabVIEW mediante el método de ajuste a curva de potencia bicuadrático, que fue el que mostró mejor ajuste y un residuo mínimo, además de ser muy robusto, está dada por:

$$P = 5.72598 \times 10^{-5} \Delta T^{1.05342} \quad (29)$$

Para proporcionar la potencia promedio de 3.276 mW con este módulo, requerida por el datalogger y despejando de la ecuación anterior:

$$\Delta T = \left( \frac{P}{5.72598 \times 10^{-5}} \right)^{0.5119} \quad (30)$$

El gradiente de temperatura promedio necesario será de 7.94 °C, asumiendo que éste gradiente puede sostenerse en forma dinámica, es decir, retirando continuamente el calor del lado frío; sin embargo, aún es necesario considerar la eficiencia del acondicionador de potencia para estimar la potencia de entrada necesaria, que será mayor debido a las pérdidas en el convertidor. De cualquier modo, se observa que mientras mayor sea el gradiente de temperatura, la potencia crecerá exponencialmente, por ello pequeños cambios en el gradiente significarán grandes cambios en la potencia disponible.

La figura de mérito Z también a partir de (25). Aunque no se conoce el valor de k, a partir de los datos experimentales, se puede aproximar el valor de Z para cada módulo, como aparece en la tabla 18.

**Tabla 4.6. Figura de mérito Z para cada módulo.**

	<b>RC 3-2.5</b>	<b>RC6-6</b>	<b>RC 12-4</b>
Figura de mérito Z	1.11 E <sup>-4</sup> /k	2.12 E <sup>-4</sup> /k	1.22 E <sup>-4</sup> /k

Es decir que, efectivamente, el dispositivo con la mejor figura de mérito fue el RC6-6 y por lo tanto fue el que mayor eficiencia y cantidad de potencia pudo proporcionar.

La caracterización de los módulos muestra que los parámetros disponibles del fabricante como módulos Peltier no son indicativos de los niveles de voltaje y corriente que pueden generar. De

igual modo, es claro que los efectos no son reversibles, es decir que si se selecciona un módulo Peltier para el cual, al aplicar un voltaje se produce un gradiente de temperatura determinado, al invertir la operación como generador y aplicar este mismo gradiente, se obtendrán corrientes y voltajes mucho menores. Se pudo observar que el valor de resistencia interna como bomba de calor es diferente de la resistencia como generador, como puede verse en la tabla X. Algunos modelos propuestos [Lineykin & Yaakov, 2005] muestran que el parámetro  $\alpha$  es la variable que relaciona tanto los efectos térmicos como los eléctricos y por ello claramente este parámetro es determinante en la selección de un módulo, pero no es el único. Para un módulo Peltier, el voltaje de trabajo (V), de acuerdo a [Buist & Law, 1977], [Dalola et al, 2009], está dado por:

$$V = R_i I + \alpha \Delta T \quad (31)$$

Donde I es la corriente aplicada en Amperes y  $R_i$  es la resistencia eléctrica interna del módulo, la cual a su vez, está determinada por:

$$R_i = 2N \left( \frac{\rho}{G} \right) \quad (32)$$

Donde N es el número de pares p-n conectados en serie en el módulo,  $\rho$  la resistividad eléctrica en  $\Omega$ -cm y G la relación área/longitud. Para dispositivos cuyos pares se fabrican con el mismo material y geometría, el valor del voltaje de operación es determinado exclusivamente por el valor de N. Efectivamente, puede verse que, en los módulos evaluados, a mayor voltaje de operación nominal, la resistencia interna es mayor y diferente a la resistencia indicada por el fabricante operando bajo el principio Peltier. Puesto que el valor total de  $\alpha$  está dado por la suma del valor individual de cada par P-N, nuevamente, mientras más alto sea N, el voltaje de salida será mayor. El valor de  $\alpha$  se obtuvo experimentalmente pues no se cuenta con esta información del fabricante ni del valor de N. Por otro lado, se puede apreciar que la potencia generada por el módulo RC6-6 en la Figura x fue la mayor de todas aún cuando el módulo RC12-4 presenta el mayor coeficiente Seebeck. La razón encontrada es que su valor de  $R_i$  es el más alto de los tres módulos caracterizados. Para un generador termoeléctrico modelado por su equivalente Thévenin, la corriente de salida está dada por:

$$I_{sal} = \frac{V_{OC}}{R_i + R_L} \quad (33)$$

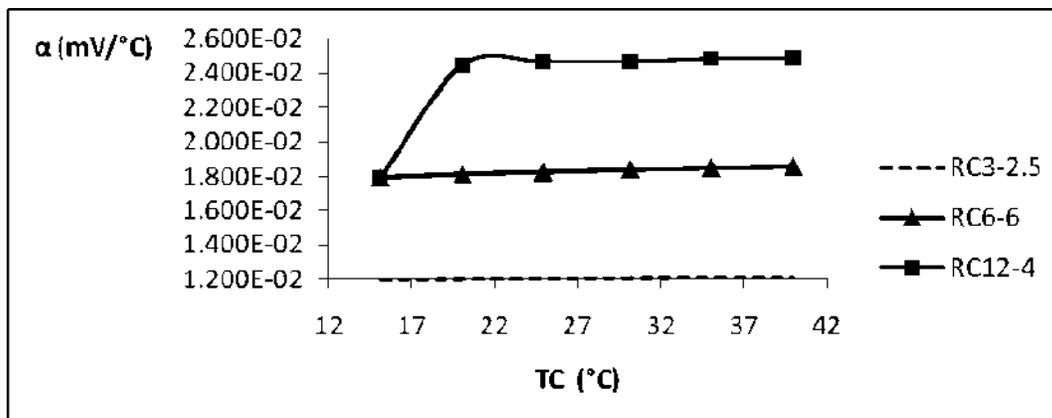
Es decir que, para un valor de  $R_L$  dado, el valor de la corriente circulante es determinado por el valor de  $R_i$ . Mientras más pequeño sea su valor, circulará una corriente más alta y por lo tanto, la potencia entregada a la carga estará dada por:

$$P_{RL} = I_{sal}^2 R_L \quad (34)$$

Por lo tanto, mientras menor sea el valor de  $R_i$ , el valor de  $I_{sal}$  será mayor y por lo tanto se puede entregar mayor potencia a la carga, en proporción al cuadrado de la corriente, esta es la razón por la cual la curva del módulo RC6-6 en la figura 29 crece rápidamente respecto a la de los otros dos módulos. Ahora bien, aunque el valor de  $R_i$  para el módulo RC 3-2.5 es el menor de todos, también lo es su valor de  $V_{oc}$ , que a su vez se debe a un valor de  $\alpha$  menor. A partir de estas observaciones, se desprende que el módulo que puede generar la mayor potencia será aquel que presente la resistencia eléctrica interna más baja y el voltaje de trabajo más alto. El área del módulo demostró no ser determinante, pues a pesar de que los módulos RC12-4 y RC6-6 poseen la misma superficie para la transferencia de calor, el segundo presentó claramente un mejor desempeño.

Otro resultado importante es que, comparativamente, un generador termoelectrico TG12-6 del mismo fabricante [Marlow], capaz de generar hasta 6 W con una salida de 5.1 V a un  $\Delta T$  de 180 °C requiere un  $\Delta T$  mínimo de 20 °C para generar aproximadamente 0.8 Volts y un total de 180 mW, de acuerdo a la hoja de datos del dispositivo. Resulta interesante que este valor corresponde a la misma potencia generada por el módulo RC6-6 para el mismo gradiente de temperatura, aunque su voltaje de salida es de aproximadamente la mitad. La diferencia radica en que el módulo RC6-6 genera mayor cantidad de corriente debido a su resistencia interna menor, de 1.77 Ohms contra 8.75 Ohms del termo generador. La ventaja entonces es que el módulo Peltier puede operar desde gradientes más pequeños y su costo es de aproximadamente un 30% menor al del termo generador, además de que la misma potencia se genera a partir del RC6-6 con una superficie de captación de 10.2 cm<sup>2</sup> contra 17.93 cm<sup>2</sup> del TG12-6.

Por otro lado, la hoja de datos muestra que la resistencia interna del TG12-6 varía hasta un 20% con diferentes gradientes de temperatura. Se realizaron pruebas al módulo RC6-6, mostradas en la figura 31, manteniendo un gradiente de 20 °C y modificando la temperatura en el lado frío de 15 a 40 °C, simulando elevaciones de la temperatura ambiente de operación. Se observa que el cambio en el coeficiente Seebeck es menor al 2%, por lo que es de esperar una variación similar en su resistencia interna. Nuevamente, la evidencia muestra que el empleo de módulos Peltier como generadores presenta ventajas respecto a un termo generador propiamente diseñado para generación de energía. La razón fundamental es que estos termogeneradores se diseñan para proporcionar voltajes de salida lo más altos posible, a fin de alimentar directamente una carga que opera a voltajes estándar, a expensas de una corriente más reducida y gradientes de temperatura más altos, presentes en la quema de combustibles o algún otro proceso de alta temperatura.



**Figura 4.20.** Variación del coeficiente  $\alpha$  a diferentes temperaturas en el lado frío, con un diferencial constante de 20 °C.

La caracterización muestra que es posible generar energía a partir de gradientes relativamente bajos si se selecciona el módulo Peltier adecuado, con ventajas sobre los termogeneradores comerciales; sin embargo, aún es necesario acoplar la potencia generada a las necesidades de la aplicación que se ha propuesto, para lo cual es necesario caracterizar el comportamiento del convertidor de potencia.

#### 4.4. Diseño del convertidor

El análisis de la hoja de datos, como se ha mencionado anteriormente, muestra que mientras menor sea la relación de transformación, se obtiene mayor potencia de salida en el convertidor debido a que su eficiencia aumenta; sin embargo, esto no ocurre de forma lineal y depende en gran medida de los valores de los componentes periféricos del convertidor, así como del voltaje de entrada aplicado, como puede verse en las figura 32 (a), (b) y (c). Es importante señalar que las condiciones que aparecen en la hoja de datos no corresponden a las de una aplicación real, ya que establecen eficiencias a un voltaje de salida de 4.5V, el cual no es posible obtener, pues las salidas programables son de 2.35, 3.3, 4.1 ó 5 VDC, pero proporciona una idea de lo que puede esperarse en forma general.

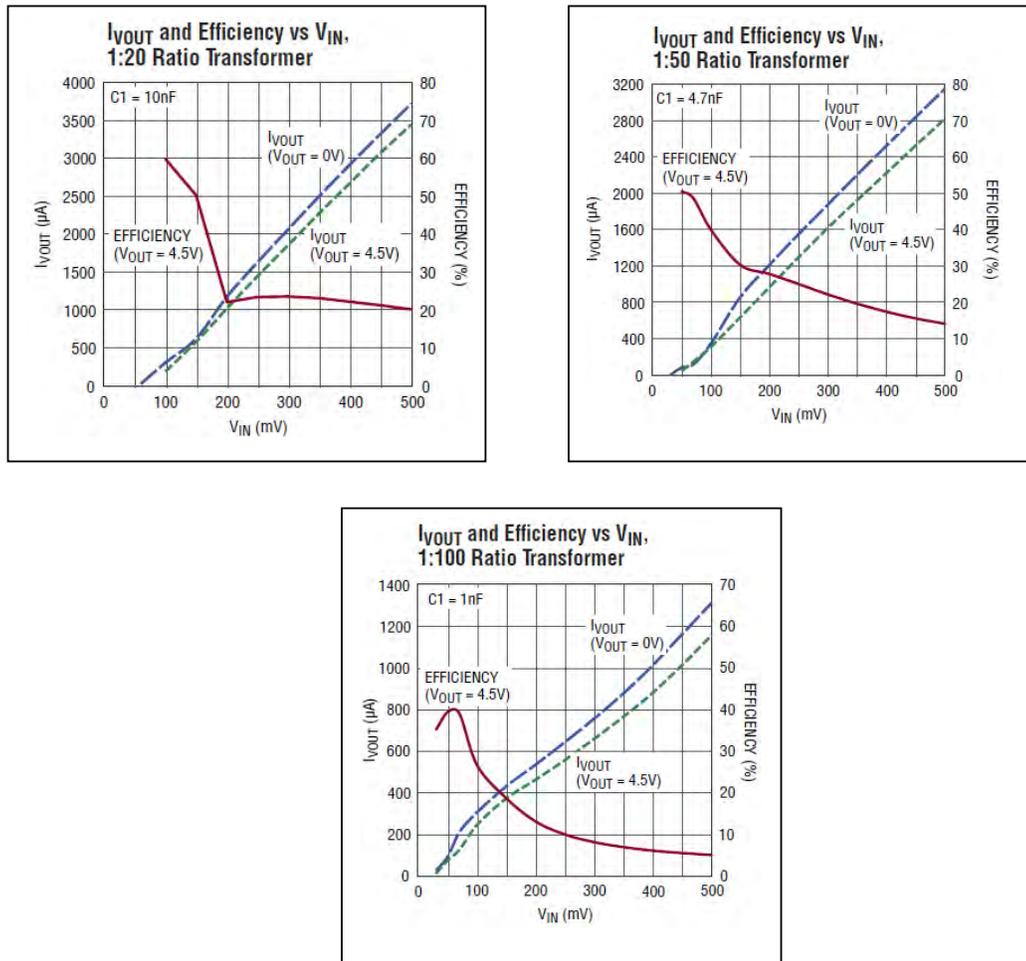


Figura 4.21. Eficiencia del convertidor con diferentes relaciones de transformación. (a): 1:20, (b):1:50 y (c): 1:100.

El producto del voltaje de entrada  $V_{IN}$  con la relación de transformación (RT) debe ser menor a 50, según recomendaciones del fabricante, es decir:

$$V_{in,max} \cdot RT \leq 50 \quad (35)$$

Aunque la mayor parte de la información del desempeño del convertidor en la hoja de datos se referencia a una relación de transformación de 1:100 y un voltaje de salida programado de 3.3 V, en realidad, para cualquier salida, el diseño debe balancear una eficiencia lo más alta posible con una relación de transformación adecuada para los niveles de potencia de entrada esperados y de salida requeridos. El transformador utilizado debe ser de muy alta eficiencia, soportar corrientes de pico altas y ofrecer una resistencia de entrada suficientemente pequeña, para minimizar las pérdidas por caída de tensión y por disipación de calor. Existen muy pocos transformadores que cumplen con estos requisitos. Se consideraron los dispositivos mostrados en la tabla 19, disponibles del fabricante Coilcraft, el cual accedió a enviar muestras, ya que no fue posible obtenerlos por otros medios. Estos transformadores presentan un factor de acoplamiento  $k = 0.95$ ; es decir, una eficiencia de 95% [Coilcraft, 2010].

**Tabla 4.7. Características de transformadores para el convertidor de potencia.**

<b>Inductor</b>	<b>Relación de transformación</b>	<b>Inductancia del primario (<math>\mu</math>H)</b>	<b>Inductancia del secundario (mH)</b>	<b>SRF (Self Resonant Frequency, KHz)</b>	<b>Resistencia DC del primario (Ohms)</b>	<b>Isat (A)</b>
<b>LPR6235-752SML</b>	1:100	7.5	75	244	0.085	0.7
<b>LPR6235-123QML</b>	1:50	12.5	31.25	382	0.08	0.9
<b>LPR6235-253PML</b>	1:20	25	10	580	0.2	1.6

Las inductancias del secundario no se encuentran reportadas en la hoja de datos, sin embargo, se calcularon a partir de la ecuaciones generales para un transformador, donde:

$$\frac{L_{\text{primario}}}{L_{\text{secundario}}} = \left( \frac{N_{\text{primario}}}{N_{\text{secundario}}} \right)^2 \quad (36)$$

Para seleccionar el más adecuado, se comparó la eficiencia que es posible lograr considerando las características del módulo RC6-6 y el rango de posibles gradientes de temperatura de operación con la información de referencia. Esta información se resume en la tabla 20:

**Tabla 4.8. Voltajes y eficiencias esperados para las diferentes relaciones de transformación.**

<b>Relación de transformación (RT)</b>	<b>Voltaje de entrada mínimo</b>	<b>Voltaje de entrada máximo</b>	<b>ΔT mínimo (RC6-6)</b>	<b>ΔT máximo (RC6-6)</b>	<b>Eficiencia esperada a 500 mV (%)</b>
<b>1:100</b>	20 mV	500 mV	1.03 °C	25.77 °C	5
<b>1:50</b>	40 mV	1 V	2.06 °C	51.54 °C	15
<b>1:20</b>	100 mV	2.5V	5.15 °C	128.8 °C	20

Se puede ver que el voltaje de entrada necesario se incrementa a medida que la relación de transformación disminuye, permitiendo operar desde gradientes de temperatura pequeños, pero de igual manera, los rangos en el gradiente de temperatura se incrementan también. Por lo tanto, una relación de transformación baja significa también que los gradientes de temperatura aplicados deberán ser más altos. Se decidió elegir la relación de transformación 1:50, ya que balancea un nivel de eficiencia tres veces mayor al de la relación 1:100 para un voltaje de referencia de 500 mV (figura 31 (b)), no requiere voltajes de entrada tan altos como la relación 1:20 (que se traduce en gradientes más altos) y permitiría operar desde un gradiente de temperatura mínimo de solamente 2.06 °C, con un máximo que coincide con el gradiente máximo de 50 °C con el cual se caracterizó el módulo RC6-6.

El diseño, con estos datos, debe también garantizar un arranque o inicio del sistema suficientemente rápido en caso de que la fuente de energía no esté disponible durante un cierto tiempo previo. Es importante recordar que el orden en el que se establecen los voltajes en sus niveles adecuados son:

1. VAUX
2. VLDO
3. VOUT

#### 4. VSTORE

Es decir que existirá un retraso en la aparición de la potencia disponible a la salida que dependerá tanto de la potencia aplicada a la entrada como de los valores de los componentes periféricos del convertidor.

A pesar de que la fuente de entrada es de bajo voltaje, las corrientes de salida de los transductores deben ser relativamente altas. De acuerdo a la hoja de datos, con una relación 1:100, a una entrada de 20 mV la corriente consumida por la entrada puede ser tan alta como 3 mA; a medida que aumenta el voltaje de entrada, la resistencia interna del convertidor disminuye entre 2 y 10 Ohms, lo que significa que se consumirá cada vez mayor cantidad de corriente mientras mayor sea el gradiente de temperatura. Afortunadamente, el módulo seleccionado produce niveles de corriente relativamente altos, del orden de 6.3 mA/°C según la figura 27. Aún así, hay que considerar que las corrientes de arranque o inicio son especialmente altas; esto se debe principalmente a que mientras el voltaje acumulado en VAUX sea menor a 2 V, el voltaje del secundario del transformador se rectifica a través de diodos semiconductores estándar; una vez excedido ese límite, entran en operación los rectificadores síncronos, que mejoran la eficiencia. El único lineamiento existente es que el valor del capacitor conectado en VAUX debe ser de al menos 1 uF para asegurar estabilidad; valores más altos proporcionan una mejor estabilidad y respuesta a transitorios, pero afectan el tiempo de encendido.

Otros lineamientos utilizados como guía son que el valor de C1 es parte de la bomba de carga directamente, por lo que en conjunto con el transformador, afectan la resistencia de entrada del convertidor y limitan la cantidad de corriente máxima disponible a la salida. C2, por su parte, afecta directamente el tiempo de encendido del conmutador del oscilador. Su valor afecta el punto de operación del mismo; si es demasiado grande, puede hacer que se detenga la oscilación o se presente saturación y si es demasiado bajo, puede producir oscilaciones incompletas.

El capacitor CIN tiene un factor determinante en el momento del arranque del convertidor, al igual que afecta la estabilidad de la operación. Su valor debe ser suficiente para proporcionar potencia en periodos cortos en los cuales el transductor, por la propia naturaleza de la fuente

de energía, no produzca energía suficiente. Igualmente, afecta el tiempo de encendido del convertidor.

El siguiente paso es determinar la frecuencia de resonancia del convertidor, a partir del valor de  $L(sec)$ , que es la inductancia del secundario del transformador y  $C$  es la capacitancia de entrada en el pin C2, que, según la hoja de datos, es típicamente de 30 pF. Esta frecuencia debería encontrarse entre 10 KHz y 100 KHz. Para este caso, la frecuencia será de:

$$f_{resonancia} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(sec)C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{31.25mH \cdot 30 pF}} = 161.371 KHz \quad (37)$$

Es decir que la frecuencia estará 64% por encima de lo recomendado; sin embargo, la misma hoja de datos recomienda el uso del mismo transformador utilizado.

Por otro lado, el producto:

$$(R_i + ESR_{C_{in}})C_{in} \quad (38)$$

Debe ser mucho mayor al periodo de la frecuencia de oscilación del convertidor, donde  $R_i$  es la resistencia interna del módulo Peltier,  $C_{in}$  es el capacitor de entrada y  $ESR_{C_{in}}$  es la resistencia serie equivalente del mismo.

En este punto del diseño resultó obvio que es necesario un método iterativo que permita optimizar los valores de los componentes periféricos para balancear una salida de potencia suficiente con una eficiencia adecuada, evaluando el comportamiento con diferentes combinaciones de los mismos. Se decidió utilizar simulación electrónica, para lo cual se descargó el modelo SPICE del dispositivo del sitio web del fabricante Linear semiconductors, así como la herramienta de simulación LTSPICE IV [Linear technology, 2008], optimizada para la simulación de convertidores de potencia de este fabricante. La figura 33 muestra una captura de pantalla de los resultados de una simulación típica.



el modelo con salida de 3.3 V y se observó el comportamiento para encontrar lineamientos generales para la mejor combinación posible de valores de los componentes periféricos del convertidor, dejando fijos todos los componentes excepto uno y comparando con la información de la hoja de datos para determinar si los resultados eran razonablemente apegados a la realidad. Esto se repitió para cada componente y posteriormente se probaron las combinaciones encontradas.

Para evaluar físicamente los datos obtenidos en simulación, se diseñó una placa de circuito impreso para alojar los componentes, optimizada para poder medir fácilmente las diferentes señales generadas y probar con diferentes valores de carga y capacitores de salida y almacenamiento, así como poder configurar el voltaje de salida del integrado. Debido a las limitaciones en las simulaciones, se procuró también contar con espacio suficiente para sustituir físicamente los componentes críticos (C1, C2, CIN, CAUX y transformador) con el menor esfuerzo posible, ya que se físicamente se sustituyeron componentes iterativamente hasta optimizar el diseño. Debido a que todos los componentes son de montaje superficial, fue necesaria una gran cantidad de trabajo y atención al detalle. La figura 34 muestra la apariencia del circuito impreso, el cual se realizó en una placa de doble cara.

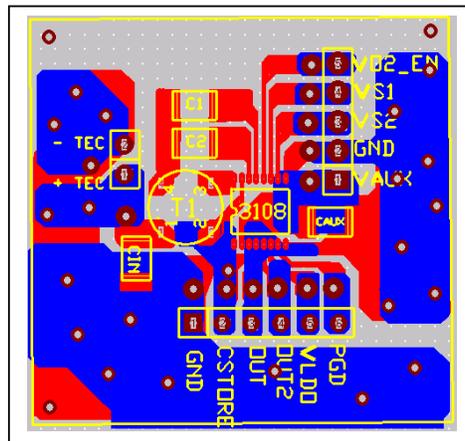


Figura 4.23. Circuito impreso diseñado.

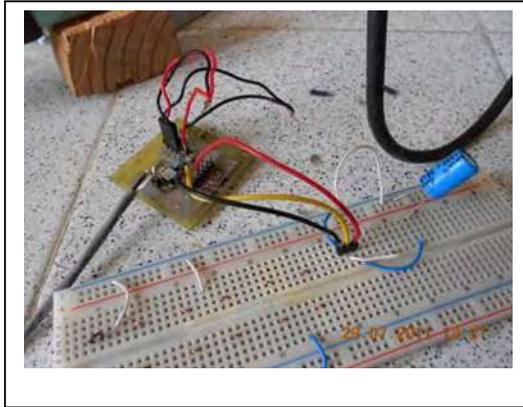
Los lineamientos para el diseño de esta placa, fueron los siguientes:

- Utilizar el menor espacio posible, pero de forma que se puedan manipular las conexiones y componentes periféricos con relativa facilidad.

- Mantener los trazos lo mas cortos y anchos posible, para reducir las pérdidas de energía por caídas de tensión parásitas.
- Evitar bordes agudos ( $\geq 90^\circ$ ) que generen interferencia electromagnética.
- Evitar lazos de corriente (ground loops).
- Crear pads para alojar el transformador, siguiendo los lineamientos del fabricante.
- Mantener planos de tierra suficientemente gruesos, ya que las corrientes pico, aunque son ocasionales y de corta duración, pueden verse limitadas por trazos de alta resistencia que provocarían pérdidas y funcionamiento incorrecto.

Los capacitores a utilizar deben poseer varias características indispensables para un diseño de alta eficiencia: una resistencia serie equivalente (ESR) reducida, poca variación en el valor nominal de capacitancia, tamaño pequeño para minimizar los efectos inductivos y un rango de temperaturas de operación adecuado. Para los capacitores menores a  $20 \mu\text{F}$ , se optó por utilizar capacitores cerámicos tipo COG (NP0) fabricados con Neodimio, Samario otras tierras raras. De acuerdo a la información del fabricante, estos componentes tienen una variación en la capacitancia nominal menor a 0.3% en todo el rango de temperaturas de de  $-55$  a  $125 \text{ }^\circ\text{C}$ ; esta formulación prácticamente no presenta envejecimiento, por lo que se asume que sus características permanecerán sin cambio durante toda su vida útil y por lo tanto, son una mejor opción para obtener un comportamiento estable, predecible y sin pérdidas. Para capacitancias mayores, se eligieron capacitores de tantalio de muy baja ESR. Los capacitores de almacenamiento de energía, tanto para  $V_{\text{OUT}}$  como para  $V_{\text{STORE}}$  fueron supercapacitores de aerogel. Una vez elegidos los componentes, sus valores de ESR comerciales se incluyeron en la simulación para comparar los resultados reales con los simulados. Todos los capacitores reportaron diferencias relativamente pequeñas, del orden del 7.56 al 12.55%; sin embargo, el valor del capacitor  $C_{\text{IN}}$  presentó diferencias hasta del 78% en cuanto al comportamiento real.

El circuito terminado se muestra en la figura 35. A través del protoboard pueden sustituirse fácilmente los valores de la resistencia de carga y de los capacitores  $C_{\text{OUT}}$  y  $C_{\text{STORE}}$ , que por su tamaño y capacidad no pueden ser de montaje superficial, para su evaluación bajo diferentes condiciones de carga.



**Figura 4.24. Circuito terminado.**

Una vez construido el circuito impreso, se realizaron pruebas para determinar:

- La potencia consumida por el convertidor y entregada a la carga, para calcular la eficiencia del convertidor.
- Variación de la resistencia interna del circuito.
- Similitud de los resultados obtenidos con la información de la hoja de datos.
- Determinar cuánta energía de entrada será necesaria para alimentar el datalogger de referencia.

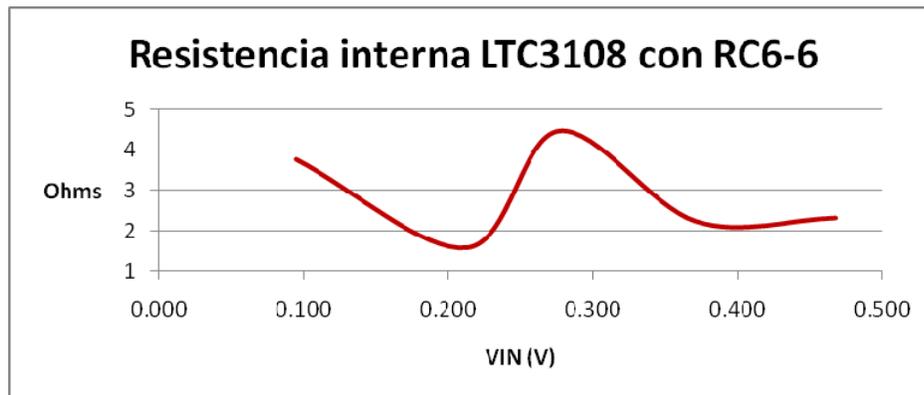
El desempeño del circuito se evaluó de la siguiente manera:

1. Se evaluó el desempeño tanto con el módulo RC6-6 como con el módulo RC12-4 para fines comparativos y para determinar la forma en la que el voltaje de entrada del convertidor afecta su desempeño, además de verificar las variaciones en la resistencia de entrada del convertidor.
2. Una vez aplicado y estabilizado el diferencial de temperatura en el módulo, se tomaron lecturas del voltaje a circuito abierto y bajo carga, para determinar el valor de la resistencia de entrada del convertidor.
3. Se conectó a la salida un capacitor de almacenamiento sólo lo suficientemente grande para reducir el rizo debido a que la salida es conmutada, esto se repitió para cada uno

de los voltajes de salida programables en el convertidor. El valor del capacitor se ajustó para tener un rizo de 20 mV pico a pico.

4. En la salida se conectaron resistores variables ajustados hasta alcanzar el equilibrio entre carga/descarga del capacitor de salida, manteniendo el voltaje regulado.

Las figuras 36 y 37 muestran un comparativo entre la resistencia interna del convertidor tanto para el módulo RC6-6 como para el RC12-4 a un voltaje de salida de 3.3 V. En el primer caso, en la figura 36 se puede ver que la resistencia de entrada del convertidor oscila dependiendo del valor del voltaje de entrada del TEC a circuito abierto. La resistencia esperada, de acuerdo a la hoja de datos, debería tener una variación no lineal en un rango entre 2.5 y 3 Ohms para el rango de voltajes esperado, dentro del rango de diseño de 2 a 10 Ohms; en cambio, puede verse que en la práctica osciló entre 1.5 y 4.6 Ohms. Es importante recordar que estos valores dependen de el valor de C1 y de las impedancias del primario y secundario del transformador. Se observa un decremento en la resistencia hasta los 10 °C, donde vuelve a crecer (disminuye el consumo de corriente) y posteriormente vuelve a disminuir.



**Figura 4.25. Resistencia de entrada del convertidor con el módulo RC6-6.**

La respuesta para el módulo RC12-4, mostrada en la figura 37 es mas aproximada a lo indicado por la hoja de datos, aunque la resistencia interna es de alrededor de 2.5 Ohms, un poco menor a los 3 Ohms esperados.

## Resistencia interna LTC3108 con RC12-4

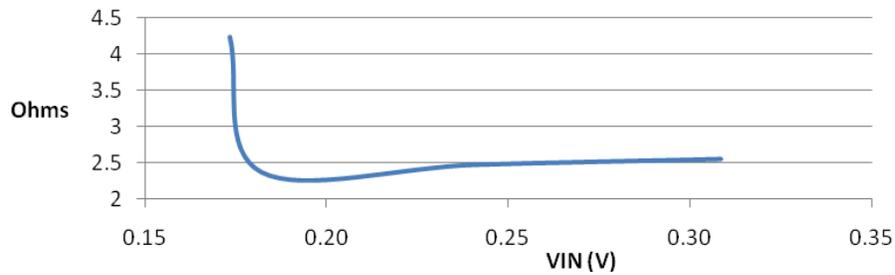


Figura 4.26. Resistencia de entrada del convertidor con el módulo RC12-4.

Las figuras 38 y 39 muestran un comportamiento típico del comportamiento del circuito; en este caso, con un gradiente de 20 °C, a un voltaje de salida de 3.3 V y con una carga de 10 Kohms, equivalente a 1 mW de consumo, para ambos transductores.

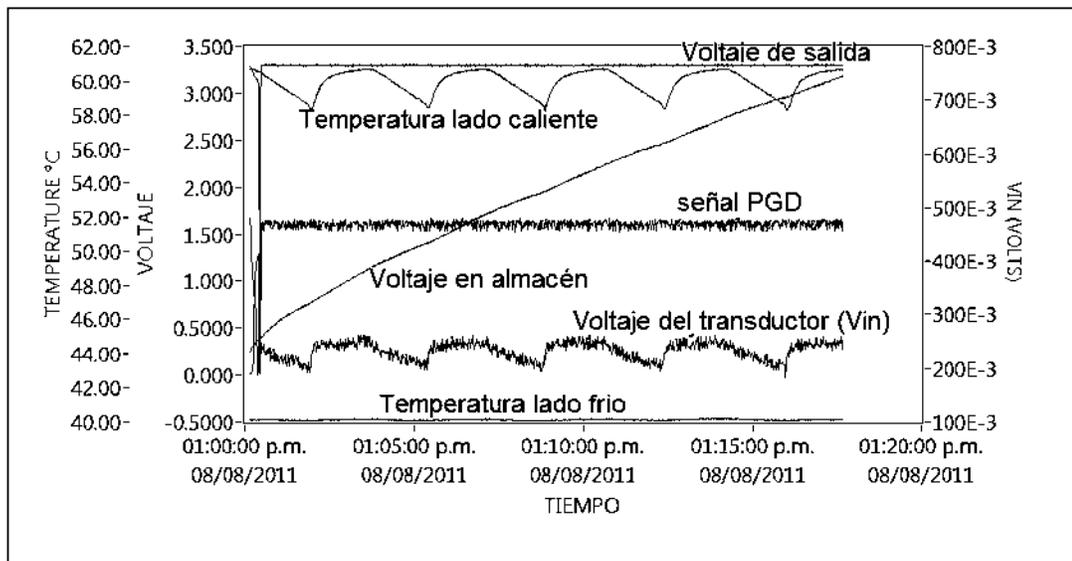


Figura 4.27. Comportamiento del convertidor con módulo RC12-4 y gradiente de 20 °C.

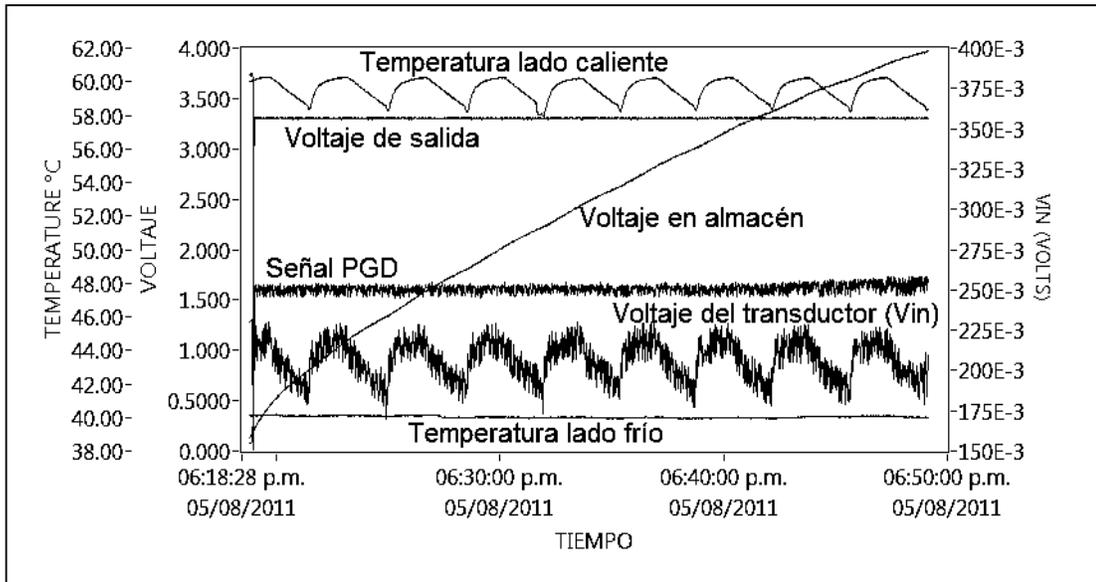
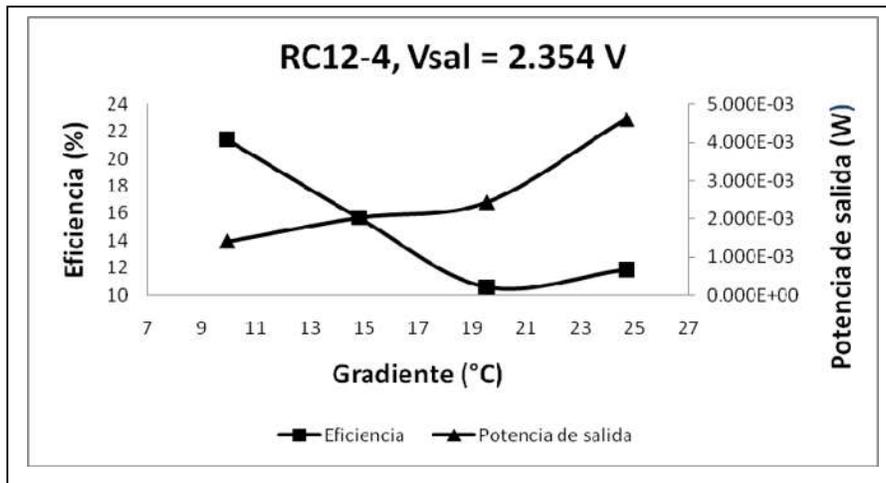
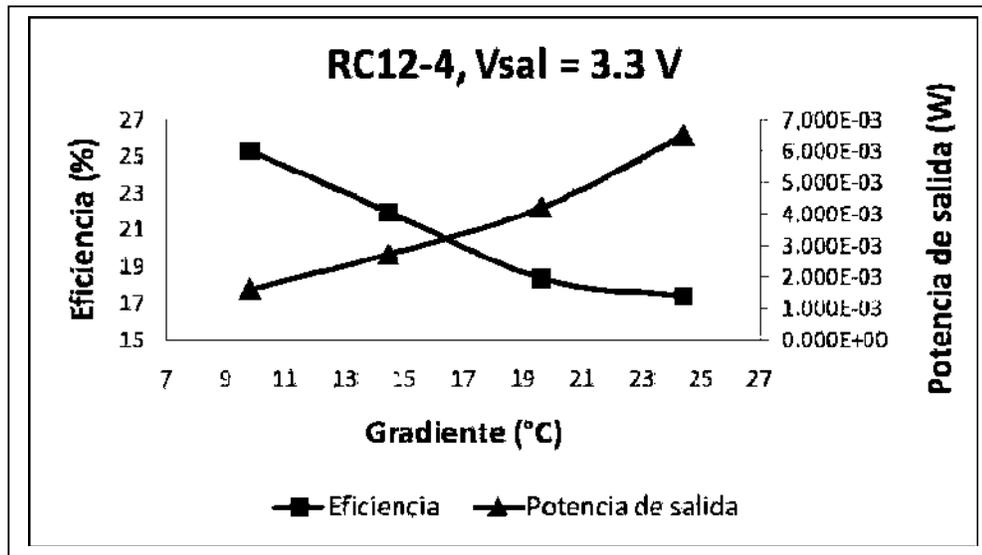
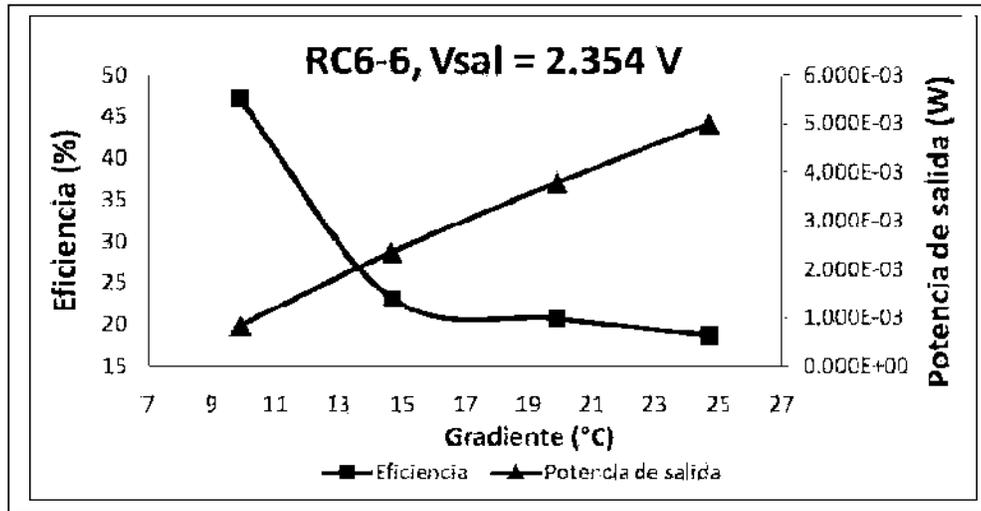
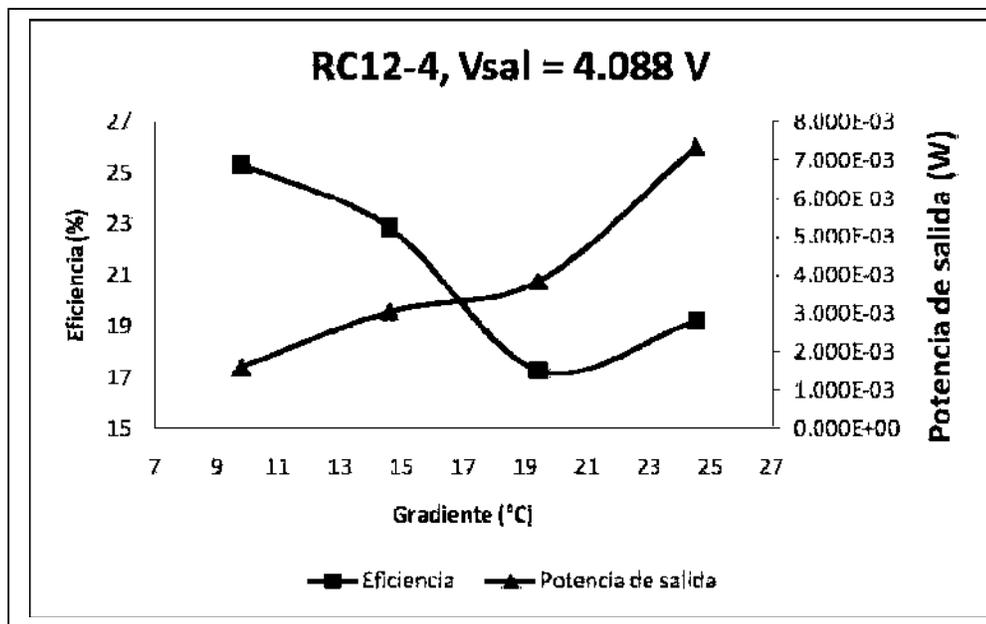
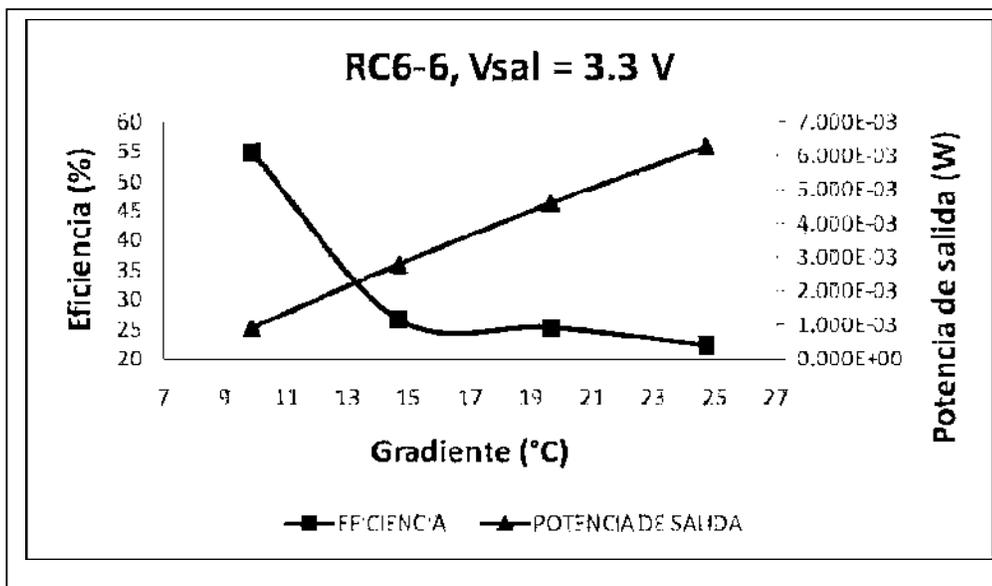


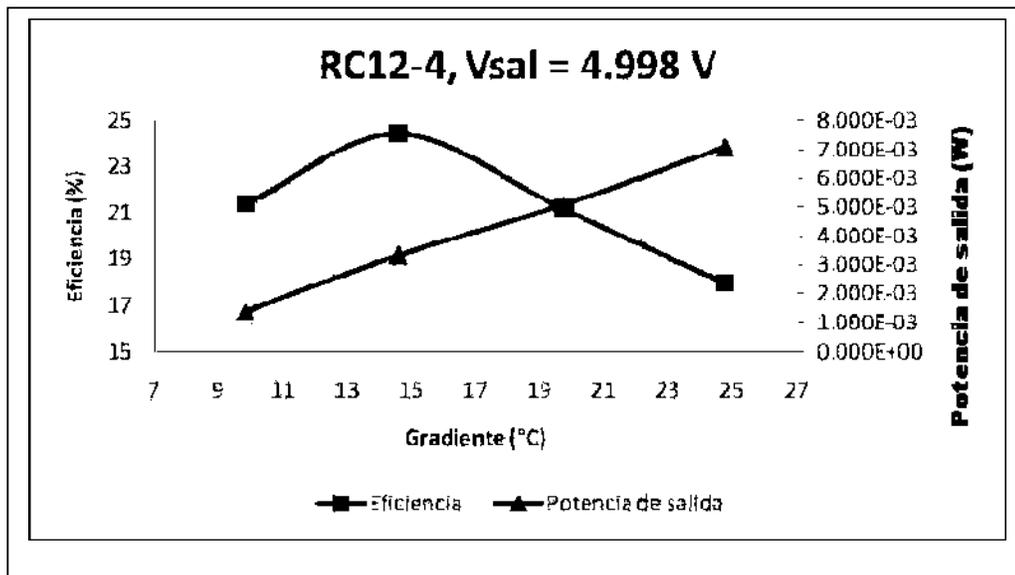
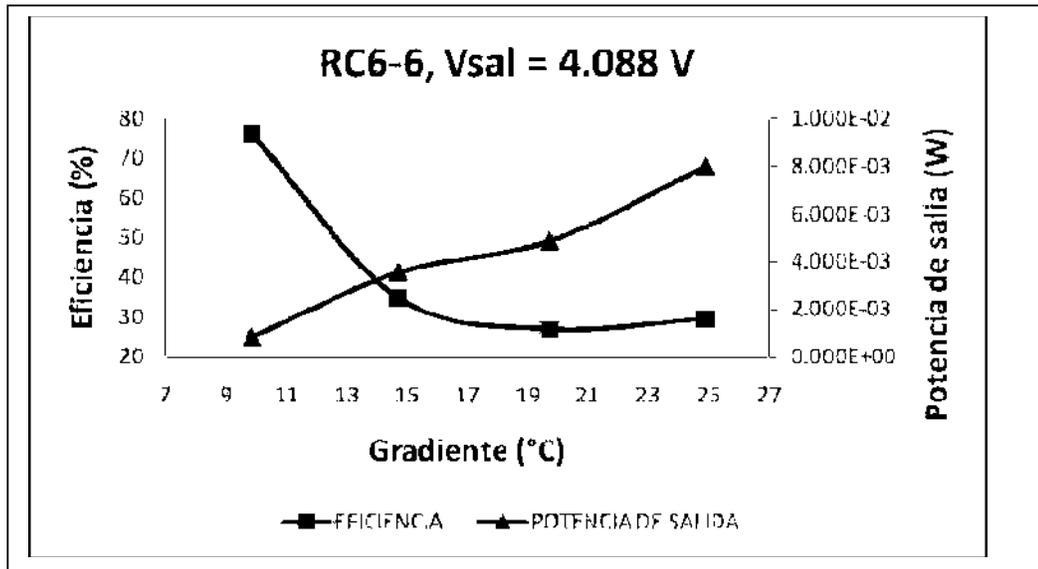
Figura 4.28. Comportamiento del convertidor con módulo RC6-6 y gradiente de 20 °C.

Los resultados en cuanto a potencia generada y eficiencia, tanto para el módulo RC6-6 como para el RC12-4, se muestran en las figura 40, para cada una de las salidas programadas, agrupadas para fines comparativos. Puede verse en forma general que, para ambos módulos, la eficiencia se reduce a medida que el voltaje de entrada aumenta, debido a un mayor gradiente de temperatura, mientras que la potencia de salida se incrementa, aunque ambas lo hacen de forma no lineal. Por otro lado, la eficiencia para el módulo RC12-4 presenta poca variación con los diferentes voltajes de salida programables, mientras que se incrementa para el módulo RC6-6.









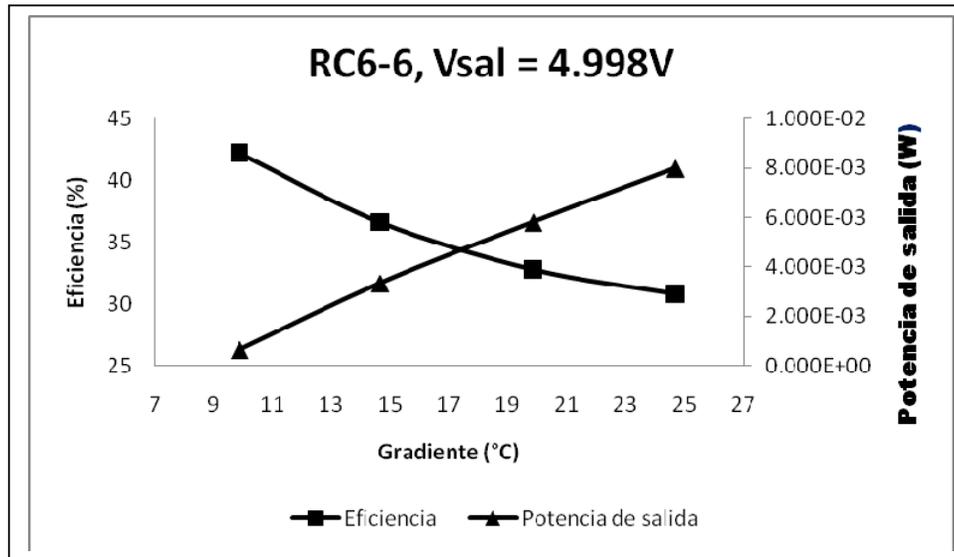


Figura 4.29. Comparativo de potencias y eficiencias para ambos módulos a diferentes voltajes de salida.

La información de la figura 40 se resume en la tabla 21; la cual muestra que, en general, a 25 °C, para compararlo con la información de la hoja de datos, el módulo RC6-6 ofrece una mejor eficiencia y una mayor salida de potencia en comparación con el módulo RC12-4, excepto para el caso de la salida de 3.3 V. Las figuras 36 y 37, relativas a la resistencia de entrada del convertidor, muestran que el rango de valores con este diferencial de temperatura es similar al de la resistencia interna del módulo RC6-6, mientras que es bastante menor a la del RC12-4, lo que explica que la transferencia de potencia sea menor.

Tabla 4.9. Comparativo de eficiencias y potencia del convertidor.

	Eficiencia (%) $\Delta T=25^{\circ}\text{C}$				Potencia (mW) $\Delta T=25^{\circ}\text{C}$			
	2.35 V	3.3V	4.1V	5 V	2.35 V	3.3V	4.1V	5 V
<b>RC12-4</b>	11.87	17.89	19.22	17.98	4.62	6.5	7.34	7.08
<b>RC6-6</b>	18.74	22.37	29.61	30.81	4.99	6.28	7.97	7.99
<b>DIFERENCIA ENTRE MÓDULOS (%)</b>	6.87	4.48	10.39	12.83	7.41	-3.50	7.90	11.39

Al comparar estos resultados con el gráfico de la hoja de datos bajo voltajes de entrada similares mostrados en la figura 40, se aprecia que aún para el módulo RC12-4 la eficiencia es mayor al 15% esperado, mientras que se duplica para el rango de voltajes de salida entre 4.1 y 5 V para el módulo RC6-6, es decir que los componentes seleccionados fueron adecuados para alcanzar el objetivo deseado.

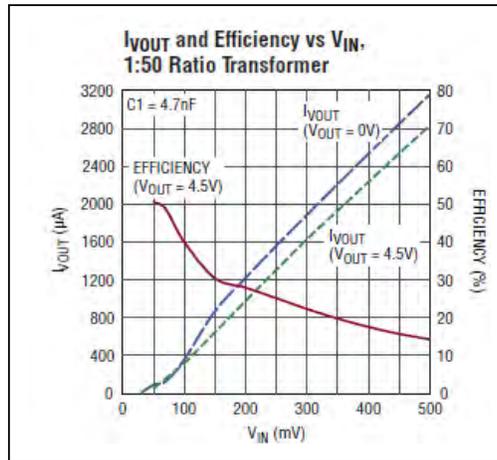


Figura 4.30. Eficiencia del convertidor con relación 1:50 según hoja de datos.

A partir de estos datos experimentales, debería ser posible predecir la eficiencia y la cantidad de potencia, así como determinar el gradiente de temperatura mínimo necesario para mantener operando el equipo de interés. Dado que es claro que no existe una relación lineal entre estas variables, se probaron inicialmente ajustes a curva exponencial para la eficiencia y logarítmico para la potencia de salida como variables dependientes, siendo la variable independiente el gradiente de temperatura, mediante el software LabVIEW, debido a la apariencia que se pueden ver en la figura 39; sin embargo, no se logró un buen ajuste. En cambio, ambas variables demostraron un excelente ajuste a un polinomio de orden 3 descrito por:

$$y = \alpha \Delta T^3 + b \Delta T^2 + c \Delta T + d \quad (39)$$

Las tablas 22 y 23 muestran un comparativo de los coeficientes determinados mediante el ajuste a curva tanto para la eficiencia como para la potencia para el convertidor con los módulos RC6-6 y RC12-4. El valor de  $R^2$  es un indicador del método de ajuste a curva que indica que todos los puntos considerados en el análisis a partir de los datos experimentales

ajustan exactamente con los coeficientes del polinomio, es decir que esta es una aproximación válida.

**Tabla 4.10. Coeficientes de ajuste para el ajuste a curva de la eficiencia y potencia del convertidor para el módulo RC12-4.**

RC12-4	Coeficientes de eficiencia				Coeficientes de potencia			
	2.35 V	3.3V	4.1V	5 V	2.35 V	3.3V	4.1V	5 V
<b>a</b>	0.0084	0.0034	0.0151	0.0086	2.591E <sup>-6</sup>	998.551E <sup>-9</sup>	4.497E <sup>-6</sup>	849.572E <sup>-9</sup>
<b>b</b>	-0.3609	-0.1470	-0.7267	-0.5083	-119.18E <sup>-6</sup>	-38.972E <sup>-6</sup>	-211.225E <sup>-6</sup>	-44.444E <sup>-6</sup>
<b>c</b>	3.8588	1.3462	10.4055	9.1671	1.872E <sup>-3</sup>	737.892E <sup>-6</sup>	3.421E <sup>-3</sup>	1.109E <sup>-3</sup>
<b>d</b>	10.4864	23.0471	-21.0078	-27.7627	-7.963E <sup>-3</sup>	-2.805E <sup>-3</sup>	-15.861E <sup>-3</sup>	-6.049E <sup>-3</sup>
<b>R<sup>2</sup></b>	1	1	1	1	1	1	1	1

**Tabla 4.11. Coeficientes de ajuste para el ajuste a curva de la eficiencia y potencia del convertidor para el módulo RC6-6.**

RC6-6	Coeficientes de eficiencia				Coeficientes de potencia			
	2.35 V	3.3V	4.1V	5 V	2.35 V	3.3V	4.1V	5 V
<b>a</b>	-0.0299	-0.0405	-0.0329	-0.0008	153.09E <sup>-9</sup>	-38.453E <sup>-9</sup>	4.264E <sup>-6</sup>	455.88E <sup>-9</sup>
<b>b</b>	1.7779	2.3628	2.1559	0.0786	-11.058E <sup>-6</sup>	-1.244E <sup>-6</sup>	-218.99E <sup>-6</sup>	-29.465E <sup>-6</sup>
<b>c</b>	-34.9403	-45.2882	-46.3228	-2.7434	517.189E <sup>-6</sup>	440.928E <sup>-6</sup>	3.981E <sup>-3</sup>	1.081E <sup>-3</sup>
<b>d</b>	247.4758	310.5728	354.4622	62.3848	-3.345E <sup>-3</sup>	-3.278E <sup>-3</sup>	-21.192E <sup>-3</sup>	-7.602E <sup>-3</sup>
<b>R<sup>2</sup></b>	1	1	1	1	1	1	1	1

A pesar de lo anterior, es claro que los coeficientes cambian con el tipo de transductor utilizado, mas aún, el voltaje de salida programado produce coeficientes muy diferentes aún con el mismo transductor; es decir que para este convertidor en particular, no parece existir forma de generalizar o predecir mediante alguna aproximación promedio cuál será la salida de potencia. Según muestran los datos, cada caso será particular y deberá caracterizarse y analizarse de manera independiente.

Según muestra la tabla 21, aunque la eficiencia se incrementa con el voltaje de salida, a 4.1 Volts programados en la salida del convertidor, el módulo RC6-6 produce la mayor potencia y eficiencia de los voltajes de salida disponibles; a 5V el incremento en ambos parámetros es muy pequeño, por lo que esta sería la mejor condición de operación. Con este nivel de salida, mediante regresión y utilizando los coeficientes de la tabla 23, el gradiente necesario calculado para obtener 3.276 mW promedio, necesarios para operar el datalogger, es de 13.8772 °C y la eficiencia presentaría un valor de 38.9 %.

#### 7.4.1. Cálculo del almacén eléctrico.

Se realizó el cálculo del capacitor COUT siguiendo los lineamientos de dos diferentes fuentes: [Linear technology Corporation, 2010] y [Cooper Bussmann, 2007], mediante las ecuaciones. (21), (22) y (40):

$$C_{OUT} = \frac{I_L T_{pulse}}{\Delta V} \quad (40)$$

Donde:

$C_{OUT}$  = Capacitor de almacenamiento

$I_L$  = Corriente promedio en la carga

$T_{pulse}$  = Duración del pulso de corriente consumido

$\Delta V$  = Caída de voltaje máxima permisible

Es importante recordar que el capacitor COUT debe absorber las variaciones de corriente existentes en cada perfil de consumo del equipo y permitirle operar durante 24 horas. Se pudo determinar que, en general, las tres ecuaciones permiten llegar al mismo mismo resultado. A partir de la caracterización del convertidor y suponiendo un voltaje de salida de 4.1 V con una caída máxima permisible de 0.4 V, se determinaron los valores de capacitancia necesarios para cada perfil de consumo, que se muestran en la tabla 24.

**Tabla 4.12. valores del capacitor de salida (COUT) necesarios para cada perfil de consumo del registrador de datos**

<b>Perfil</b>	<b>Corriente promedio</b>	<b>Duración (segs)</b>	<b>COUT</b>
<b>standby</b>	196uA	86400	42.3 F
<b>Activar sensores</b>	18.53mA	0.120	5.56 mF
<b>Envío de datos</b>	101.9 mA	51.4	13.1 F
<b>Arranque</b>	2.1 A	7.6 ms	39.9 mF
<b>Ventana de comunicaciones</b>	46.228mA	310.6	35.9 F

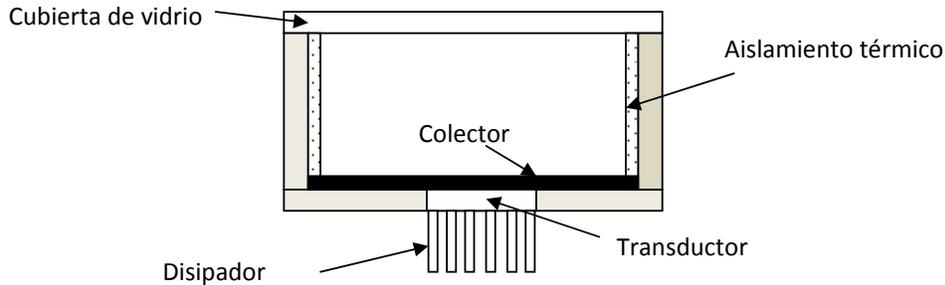
El total de capacitancia necesaria es de 91.3456 F. Este es un valor extremadamente alto. El voltaje de trabajo más común para supercapacitores de valor alto va de 2.5 a 2 V. Para operar a voltajes mayores, como sería este caso, es necesario conectarlos en serie, lo que significa que la capacitancia se reducirá, siendo necesario un arreglo serie-paralelo para poder operar a voltajes mayores y mantener un valor alto de capacitancia. Es importante señalar que éste es el valor mínimo de capacitancia necesario; para poder compensar las posibles pérdidas, su valor debería ser al menos un 20% mayor a este valor [Mars, 2012].

### **Pruebas con radiación solar**

Para realizar estas pruebas se construyó un colector solar cuyo esquema se muestra en la figura 42. El colector consistió en una placa de aluminio pintada de color negro de 0.01274 m<sup>2</sup> con una masa de 0.0692 Kg. El lado caliente del transductor RC6-6 se fijó a esta placa, mientras que en el lado frío se instaló un disipador de calor de aluminio, ambos con grasa térmica para mejorar la transferencia de calor. Para el aislamiento se utilizó poliestireno de alta densidad de 100 mm de grosor.

Mediante este esquema, se alcanzaron temperaturas más altas en el colector solar, con un pico máximo de alrededor de 60 °C; es decir, casi 20 °C más alto que en el caso de las primeras pruebas con el colector abierto al aire libre. El diferencial de temperatura producido promedio después de varias pruebas, fue de 9.926 °C, casi el doble que en los experimentos anteriores.

Para determinar la cantidad de potencia incidente y la eficiencia del transductor, se utilizó la ec. (42):



**Figura 4.31. Colector solar para prueba del convertidor.**

$$Q = mc \cdot (t_f - t_i) \quad (42)$$

Donde:

$Q$  = cantidad de calor absorbida por el colector solar, en Watts

$m$  = masa del colector; en este caso, corresponde a la masa del aluminio utilizado

$c$  = es el calor específico del aluminio, en este caso es de 0.897 KJ/Kg°C

$t_f$  = Temperatura final en el colector solar

$t_i$  = Temperatura inicial (temperatura ambiente)

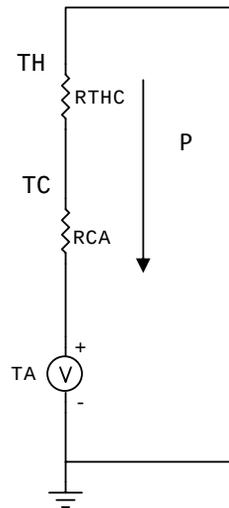
Mediante un programa realizado en labview, se calculó continuamente el calor absorbido aplicando (42) en intervalos de 10 segundos, tomando lecturas de la temperatura en la superficie del colector y la del medio ambiente. El valor promedio determinado fue de 616.13 J, colectados en un área de 0.01274 m<sup>2</sup>, lo que arroja un valor de 48.361 KJ/m<sup>2</sup>. El área efectiva de conversión termoeléctrica corresponde a la del propio transductor, la cual es de sólo 1.02 E<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>, significando un total de potencia de entrada de 49.329 Joul. Esto representa la energía colectada a lo largo de un intervalo de tiempo determinado. A partir de este dato, se calcula la potencia instantánea entrando en el lado caliente, utilizando (ecuación de potencia y energía), que da un total de 5.458 mW. La potencia promedio instantánea generada por el

módulo con este diferencial de temperatura es de 5.07 mW, por lo que la eficiencia termoelectrica promedio del módulo es de:

$$\eta = \frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{entrada}}} \times 100 \quad (43)$$

$$= \frac{5.07 \text{ mW}}{5.458 \text{ W}} \times 100 = 0.093\%$$

El equivalente eléctrico del modelo térmico en estado estable es el mostrado en la figura 43:



**Figura 4.32. Modelo térmico del transductor termoelectrico con el colector solar.**

Donde:

$TH$  es la temperatura en el lado caliente

$TC$  es la temperatura en el lado frío

$TA$  es la temperatura ambiente

$P$  es la potencia que ingresa de la fuente solar, la cual ya ha sido determinada (5.458 W).

$RTHC$  es la resistencia térmica del lado frío del módulo hasta la superficie del captador solar y está dada por (44):

$$\frac{T_H - T_C}{P} \quad (44)$$

$$= \frac{A''}{P} = 18186 \frac{C}{W}$$

RCA es la resistencia térmica del lado frío hacia el disipador de calor y de éste al ambiente y está dada por:

$$RCA = \frac{T_C - T_A}{P} \quad (45)$$

$$= 0.7610 \frac{C}{W}$$

RCA es la principal limitante para lograr una mayor generación de potencia. Idealmente, la temperatura del lado frío debería ser la misma del ambiente, lo cual solo puede ocurrir si RCA tuviera un valor de cero; de este modo se podrían generar diferenciales de temperatura desde 15 hasta 35 °C utilizando la radiación solar, de acuerdo a las temperaturas alcanzadas. Desafortunadamente, para reducir su valor es necesario aplicar energía para bombear el calor de la cara fría hacia el ambiente, lo cual no es posible dada la baja potencia disponible. En este punto es claro que sin este mecanismo de bombeo, eventualmente el calor del lado caliente se transferirá hacia el lado frío por conducción a través del material del transductor, reduciendo cada vez más el gradiente de temperatura hasta alcanzar alguna condición de equilibrio que dependerá de las condiciones atmosféricas. En los experimentos realizados, el gradiente inicialmente es alto e incluso mayor al alcanzado en los primeros experimentos con radiación solar, pero a medida que el calor se acumula en la cara fría, se reduce hasta llegar a un valor en equilibrio de 9.926 °C promedio en este caso. Para incrementar este diferencial y poder generar mayor potencia, es necesario encontrar formas de enfriar la cara fría solamente con la misma energía disponible, que no podrá ser eléctrica, dada la muy baja potencia del convertidor.

Es claro también que utilizar mecanismos para elevar la temperatura en el lado caliente tampoco son la solución al problema, ya que eventualmente aparecerá el mismo problema. Inicialmente se consideró utilizar un almacén termoquímico por medio de zeolita, para disminuir el tamaño del almacén eléctrico, el cual, para la aplicación de referencia, sería muy

costoso y de gran volumen, pues la tecnología de supercapacitores aún es relativamente costosa, con un promedio de 2.4 dólares estadounidenses/Faradio. Tras realizar una investigación, se pudo averiguar que la zeolita posee otras características, además de funcionar como almacén de calor, que pueden acoplarse a las necesidades de este proyecto; entre ellas, la capacidad de enfriar sin necesidad de mecanismos externos.

#### **4.6. Microcontrolador**

PICs serie nanoWatt XLP eXtreme. Los plantean para durar hasta 20 años alimentándose de una batería. Según esto tienen las corrientes mas bajas para modo RUN y SLEEP de la industria. Ventajas:

- Corrientes de sleep debajo de 20 nA
- Reset brown-out (creo que es por voltaje bajo) hasta 45 nA
- Watchdog timer hasta 220 nA
- Reloj de tiempo real/calendario hasta 470 nA
- Corrientes en modo RUN hasta 35 $\mu$ A/MHz
- Operación completa hasta voltajes tan bajos como 1.8 V.

Corriente de fuga de  $\pm 5$  nA. A menor voltaje de operación, menos pérdidas, pero se reduce la frecuencia de operación también.

Además de consumir poco, tienen características que permiten administrar la energía del propio dispositivo.

Hay dos tipos de consumo en una MCU:

- Dinámico, por conmutación de cargas; principalmente se controla controlando la velocidad de reloj.
- Estático: con el reloj deshabilitado, es el consumo por pérdidas en el material semiconductor, así como otros periféricos que “despiertan” al dispositivo, como timers watchdog. Depende del voltaje de alimentación y de la temperatura.

Debería trabajar en modo deep sleep, que es para baterías, epro solo es para PIC18 y PIC24, yo tengo el 16f1827. En modo sleep Los relojes activos en este modo son Timer1/SOSC,

INTRCL/LPRC y A/D RC. Los periféricos activos son: RTCC, WDT, ADC, comparadores, BOR, HLVD, timer1, Cvref, INTx. Se puede usar cualquiera de las fuentes para despertar, el consumo es de 50 a 100 nA. Se recomienda para cualquier aplicación si los tiempos de sleepo son de menos de 1 s y despertares rápidos. Se puede usar el ADC o comparadores en este modo, OJO.

Los pins de los micros pueden suministrar hasta 20 mA

Pines no usados, puede quedar desconectado pero se debe configurar como entrada o salida, con pull up de 10 K, solo fluye la corriente de fuga. En modo analogico las entradas son de muy alta impedancia, recomiendan configurar asi las no usadas.

El timer/oscilador 1 está optimizado para bajo consumo (2 a 23 uA)

Opción low voltage detect (LVD) es una interrupcion que se puede usar para reducir la frecuencia de reloj y asi baja el consumo de energía y no se necesita canal analógico aparte.

Despartar de sleep: 1 a 5 ms.

Dice que poner resistor de 4.7 K a 10 K entre VPP/Mclr y VDD para programar. El pickit puede proporcionar un máximo de 30 mA.

Terminales del pickit 3:

1. MCLR/Vpp (Pin 4 PIC16F1827)
2. VDD del dispositivo a programar (Pin 14)
3. VSS (tierra, Pin 5)
4. PGD (In Circuit Serial Programming ICSPDAT), Pin 13
5. PGC (ICSPCLK), pin 12
6. PGM (LVP), no utilizado

Vdd y Vss se recomienda que sean de la alimentación del micro, aparte, para poderlo programar.

Cómo programar en la pagina 6 de la progrmaacion PICS oct 11

Datos PIC16F1826/27

- 49 instrucciones, 14 de las cuales son “compiler-friendly” para “C”
- Stack de hardware de 16 niveles de profundidad.

- Oscilador interno de precisión, rango de frecuencia seleccionable por software de 32 MHz a 31 KHz (con oscilador interno de baja potencia).
- Monitor de reloj fail-safe
- Arranque (startup) de 2 velocidades
- Power up timer (PWRT)
- Oscilator startup timer (OST)
- Brown Out reset (BOR) con nivel seleccionable
- Watchdog Timer (WDT) extendido
- In circuit Debug (ICD)
- Voltaje de alimentación de 1.8 a 5.5V
- Self programmable under software control (auto programable bajo el control de software)
- Corriente de standby de 100 nA a 1.8 V.
- Corriente de operación de 150 uA
- 15 pins de E/S y uno que es solo entrada
- Corriente máxima sink/source por pin de E/S: hasta 25 mA.
- Pins individualmente programables interrupción por cambio de nivel
- Pull ups débiles programables individualmente.
- Timer0: temporizador/contador de 8 bits con prescalador de 8 bits
- Timer1 expandido: 16 bits (contador/temporizador) con prescalador
- Timers 2, 4 y 6: temporizador/contador con registro de periodo de 8 bits, prescalador y postescalador.
- Hasta 2 módulos mejorados para captura/comparación/PWM con bases de tiempo seleccionables, auto apagado y auto-restart.
- Hasta 2 módulos de captura/comparación/PWM. Con bases de tiempo seleccionables por software.
- Puerto sincrónico (SPI, I2C)

- Puerto asíncrono (USART) RS-232, RS-485 y LIN
- Latch RS (timer 555 integrado) con múltiples opciones de set/reset
- Hasta 12 ADCs
- 2 comparadores rail to rail con control de modo de potencia e histéresis controlada por software.
- Referencia de voltaje (FVR) con 1.024V, 2.048 y 4.096 V.
- DAC resistivo rail-to rail de 5 bits con selección de referencia positiva y negativa
- Módulo oscilador para sensado mTouch (hasta 12 canales)

El PIC16F1827: 4K de memoria de programa, 256 bytes de EEPROM, 384 bytes de SRAM, 4 timers de 8 bits, 1 de 16, módulos PWM/Captura, etc completos, latch SR.

#### **4.7. Enfriamiento evaporativo y almacenamiento de energía térmica.**

Para mantener un gradiente de temperatura alto, es necesario utilizar algún mecanismo de enfriamiento simple y eficiente, como el caso del enfriamiento evaporativo de ciclo cerrado. La idea general es utilizar un fluido que entre en contacto con el objeto o medio que se desea refrigerar. El calor de este medio se transfiere al fluido, provocando que se evapore y transportando el calor hacia un disipador, que a su vez lo transfiere al ambiente; es decir, que opera como bomba de calor llevándolo hacia la atmósfera. Al disminuir la temperatura del vapor, éste regresa a estado líquido y debe recircularse nuevamente para volver a empezar el ciclo. En un refrigerador convencional, se utiliza un fluido que ebulle a baja temperatura, el cual toma el calor de lo que se desea enfriar. Posteriormente, este gas se comprime; cuando esto ocurre, pasa a un estado de menor energía (líquido) y la energía excedente liberada en forma de calor se bombea eléctricamente hacia a un disipador de calor, el cual lo transfiere a la atmósfera. El líquido condensado posteriormente se envía a una válvula de expansión, que permite que el gas se expanda y comience nuevamente el ciclo.

Para el caso de una aplicación de recolección de energía, no existe suficiente energía para implementar un ciclo de enfriamiento como el anteriormente descrito, pues se requiere de

equipo para bombear y comprimir el fluido de enfriamiento, por lo que deben encontrarse alternativas para llevar a cabo este trabajo. Debido a que la única fuente de energía capaz de lograr este trabajo es el calor mismo, se investigaron opciones relacionadas al movimiento natural de fluidos impulsados por éste, tales como termosifón [Borno et al, 2009], [Singh et al, 2011] y [Yazawa & Shakouri, 2010] ó chimenea solar [Baharvand, 2010], [Bernardes & Weinrebe, 2003] y [Koonsrisuk & Chitsomboon, 2007]. Finalmente, se determinó experimentar con un concepto llamado: “bomba de calor por adsorción” [Ruzhu, 2005]. La adsorción es una reacción termoquímica 100% reversible que consiste en la adhesión de una sustancia refrigerante (sorbato) a la superficie de otro sólido o líquido llamado sorbente, pero sin que se genere un nuevo compuesto; la afinidad del sorbente por el sorbato debe ser muy alta. Para el caso de los sorbentes sólidos, éstos toman la humedad existente en un gas producto de la evaporación, lo que lleva a un enfriamiento adiabático; es decir, donde no hay transferencia de calor al entorno, sino que ocurre dentro de la propia sustancia. Por ejemplo, el enfriamiento adiabático en el agua ocurre cuando sus moléculas adquieren suficiente energía (sin llegar a la temperatura de ebullición), ya sea por agitación térmica o una baja en la presión atmosférica suficiente para que éstas se liberen, lo cual disminuye la temperatura interna del líquido porque éste ha perdido energía. Si más y más moléculas se liberan por este mecanismo, mayor será el enfriamiento alcanzado en el líquido. Si la adsorción ocurre con suficiente velocidad, se puede llegar a producir hielo instantáneamente [Anyanwu, 2005] y [Kim & Infante, 2008] lo cual ocurre entre un sorbente y sorbato con alta afinidad.

Una bomba de calor por adsorción consta esencialmente de tres partes:

1. Un adsorbedor o sorbente, que actúa como “bomba” impulsora del fluido, adsorbiendo fuertemente el vapor y enfriando el volumen de interés al reducir su energía interna.
2. Un evaporador. Esencialmente es un recipiente que contiene el objeto a enfriar y permite el paso libre del fluido de enfriamiento ya condensado para su posterior evaporación.
3. Condensador. Para reiniciar el ciclo, es necesario aplicar calor al sorbente, con la finalidad de que libere el vapor atrapado durante el ciclo de adsorción y pueda reabsorber más. Una vez liberado, se lleva a un serpentín donde el incremento en la presión parcial de vapor a cierta temperatura provoca que libere el calor y al perder

energía, se condense nuevamente. Este condensado se aplica al evaporador y el ciclo comienza de nuevo.

En resumen, en cada ciclo, el calor se retira del volumen refrigerado a través del evaporador y es rechazado al ambiente por medio del condensador, todo impulsado solamente por la fuerza de adsorción y el calor aplicado al sorbente. Las ventajas de estos sistemas son: ahorro de energía, control sencillo, no producen ruido y su costo de operación es muy bajo. La principal desventaja es que su COP (coeficiente de operación o eficiencia) es bajo y comparativamente con los medios de enfriamiento tradicionales, requieren mayor volumen y peso [Anyanwu, 2005]. La diferencia entre utilizar sorbentes sólidos o el líquido radica en que en el primero requiere cierto tiempo para completar un ciclo, por lo que se considera discontinuo, mientras que el segundo se puede bombear continuamente. Puesto que, como ya se ha mencionado, no existe energía para ello, se optó por utilizar un sorbente sólido, debido a la naturaleza intermitente del proceso, lo que los hace ideales para aplicaciones solares.

En el capítulo 6 se describieron algunas ventajas de las zeolitas. Adicionalmente, estos materiales pueden adsorber diferentes gases refrigerantes como vapor de agua, amoníaco u óxidos de carbono, con un porcentaje de entre un 20% y hasta un 30% en peso [Cortés, 2009], Gopal et al., 1982] y [Simonot-Grange, 1979] y presentan la propiedad única de que la capacidad de adsorción disminuye poco con la presión de vapor, como muestra la figura 44, según [Tchernev, 1977].

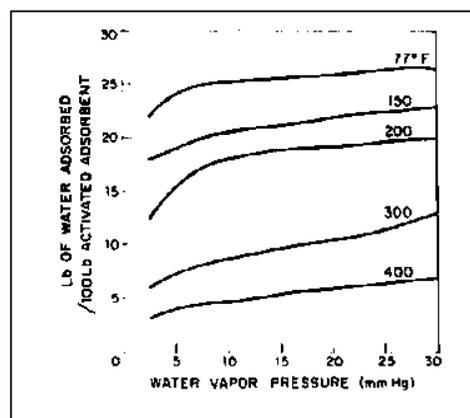
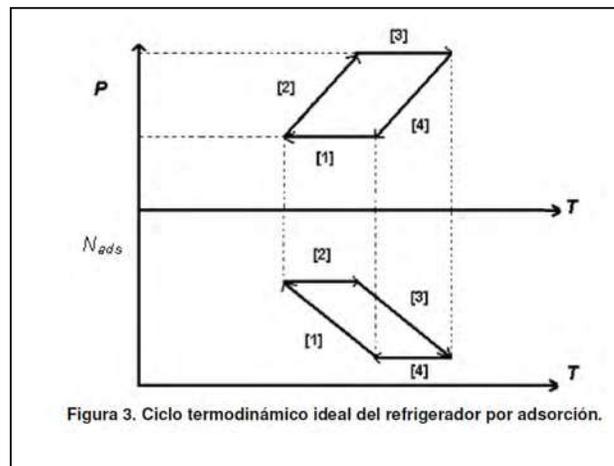


Figura 4.33. Isotermas de adsorción de la zeolita (adsorción vs presión de vapor y temperatura).

Para la mayoría de los sorbentes, la cantidad de agua adsorbida se incrementa de forma prácticamente lineal con la presión de vapor hasta alcanzar un nivel de saturación, debido a que la presión actúa como una fuerza que ayuda a introducir el vapor refrigerante en la estructura del sorbente; sin embargo, en el caso de la zeolita, a 25 °C (77 °F) y por encima de 0.0136 Kg/cm<sup>2</sup> (10 mmHg) como puede verse en la figura 43, la cantidad de agua adsorbida cambia muy poco, estabilizándose a valores de 25 a 33 g de agua/Kg de zeolita. Esto indica que la zeolita tiene una gran afinidad por el vapor de agua, en especial a temperaturas relativamente bajas, por ello requiere poca energía externa para lograr el enfriamiento y se puede utilizar en aplicaciones de baja temperatura.

La figura 45 muestra el ciclo ideal de enfriamiento por adsorción. Considerando un sistema calentado por el sol, la etapa 2 correspondería a la mañana, cuando el sol comienza a calentar el adsorbente, que se supone inicialmente saturado de humedad. A medida que transcurre el día y aumenta la temperatura, aumenta también la presión parcial P, ya que el fluido refrigerante se libera del adsorbente en forma de vapor. La relación masa de refrigerante/masa de adsorbente (N<sub>ads</sub>) permanece constante porque en estas condiciones la zeolita no puede adsorber agua fácilmente, según se muestra en la figura 45, ya que a mayor temperatura, su capacidad de adsorción disminuye.



**Figura 4.34. Ciclo ideal de la refrigeración por adsorción.**

La etapa 3 corresponde a la condensación, donde la presión parcial, al ir aumentando la temperatura, se iguala con la presión de saturación del fluido en el condensador, por lo tanto la

presión permanecerá constante. Como el sorbente continúa elevando su temperatura mientras transcurre el día solar y perdiendo cada vez mas humedad, su capacidad de adsorción de agua disminuye hasta llegar al valor mínimo. En este momento el refrigerante permanece perdiendo calor en el condensador, convirtiéndose en líquido.

En la etapa 4, al disminuir la radiación solar durante la tarde, el adsorbente comienza a enfriarse, por lo que el vapor desorbido disminuye su presión parcial. La combinación en la disminución de la presión y la temperatura mantiene a la zeolita en el estado de mínima adsorción.

En la etapa 1, la presión interna llega a un valor mínimo, mientras que la temperatura en el sorbente continúa disminuyendo; esto ocurre durante el periodo de disminución de radiación solar al caer la tarde y continúa durante la noche. En este momento, al refrigerante condensado se le permite entrar en contacto con el volumen a enfriar, que debe estar a temperatura suficiente para que pueda evaporarse. Ya que el adsorbente ha perdido todo el refrigerante durante las etapas 2 y 3, es en esta etapa realmente donde se lleva a cabo la producción de frío, pues rápidamente se adsorbe el vapor generado en el evaporador. Es interesante recalcar que este sistema produce frío durante la noche, etapa en la que no hay radiación solar, siendo posible alcanzar temperaturas por debajo de la temperatura ambiente, por lo que, aplicando este proceso a las caras de un termo generador, debería ser posible producir energía durante el periodo nocturno, el cual siempre es más largo que el periodo diurno, disminuyendo así el tamaño necesario en el almacén de energía y constituye una solución a la generación de energía cuando no existe radiación solar. Bajo condiciones óptimas, podría llegarse a un valor de 0 °C en el lado frío, de acuerdo a [Solmus et al, 2011] y [Tchernev, 1978]. Durante el día, podría operarse en forma normal, recibiendo el calor de la radiación solar.

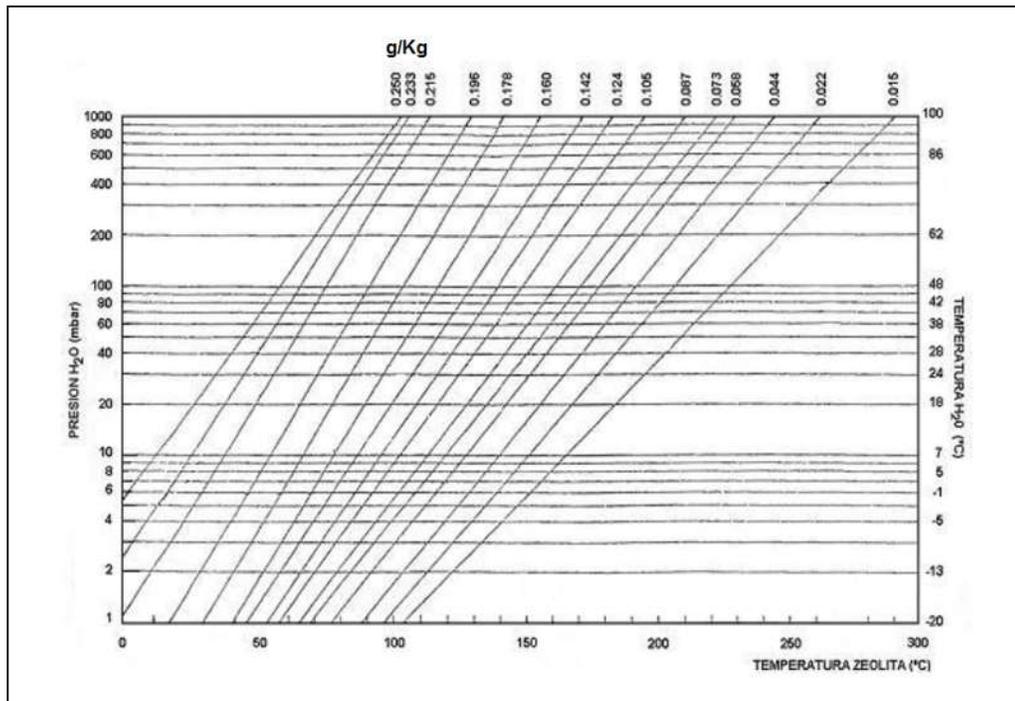
Los sistemas de refrigeración con zeolita como adsorbente y agua como fluido de trabajo se consideran adecuados para alcanzar temperaturas por encima de los 0°C , mientras que otras combinaciones como carbón activado/metanol alcanzan temperaturas de enfriamiento por debajo de los 0 °C [Anyanwu, 2005] y son más adecuados para la producción de hielo. En este caso, se utilizará zeolita ya que no se pretende llegar al congelamiento y además, es más segura y sin ningún riesgo de toxicidad. Como ya se ha visto, este sistema posee la ventaja de

no requerir mecanismos externos para bombear el calor, sin embargo, existen diversos factores a considerar:

1. La temperatura del adsorbente (zeolita en este caso) debe ser suficiente durante el periodo diurno para extraer la humedad y llevarla hacia el condensador. A presión atmosférica, es necesario alcanzar los 100 °C para que el vapor atrapado en la zeolita pueda liberarse. Esto es un inconveniente para sistemas de baja temperatura operados a partir de radiación solar sin concentradores solares.
2. La temperatura que puede alcanzar el condensador y su capacidad para transferir el calor excedente al medio ambiente determinan también la eficiencia del sistema. En ambientes de alta humedad y temperatura, puede dificultarse alcanzar el nivel óptimo de presión necesario para precipitar el vapor de agua.
3. La temperatura que alcanzará el lado frío (el cual, en este caso, es el volumen que se desea enfriar), debería ser suficiente para evaporar el agua y facilitar su flujo hacia el sorbente seco. De igual modo, determinar la cantidad de refrigerante y adsorbente es esencial.

Para evaluar la posibilidad de cumplir estas condiciones, se utiliza un diagrama de isósteras, como el de la figura 45, donde puede verse la relación que existe entre la presión de vapor del agua, la relación refrigerante/adsorbente (en g/Kg) y la temperatura que el agua debe alcanzar para ebullición, así como la temperatura de la zeolita para que esto pueda ocurrir. Este diagrama se traza en condiciones en las que las fases líquida y gaseosa están en equilibrio.

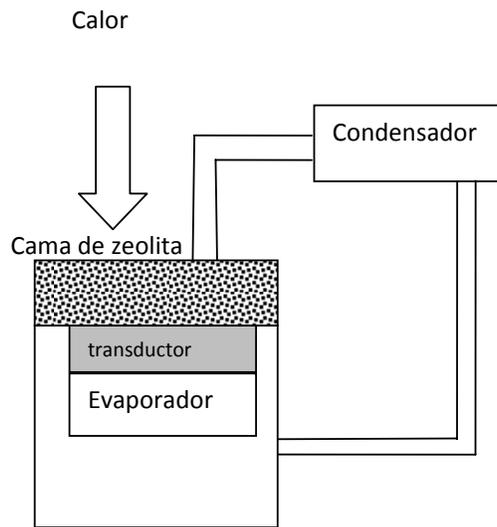
Como ya se había mencionado, el límite de adsorción se muestra alrededor del 25% en peso a presión de 1 atmósfera (1013.2 mbar), alcanzable cuando la temperatura de la zeolita es superior a 90 °C, mientras que la temperatura del agua debe alcanzar 100 °C para poderse evaporar. Para poder alcanzar temperaturas bajas, ya que se desea la mayor adsorción posible al igual que no depender de fuentes externas para vaporizar el agua mientras se opera a temperaturas relativamente bajas, según muestra el diagrama, es necesario disminuir la presión de vapor, lo cual significa que debe practicarse el vacío en el sistema.



**Figura 4.35. Diagrama de isósteras del par zeolita-agua.**

Por ejemplo, con una presión de 10 mBar y una temperatura en la zeolita de 10 °C, aún es posible alcanzar la máxima adsorción, requiriendo sólo 7 °C para evaporar el agua, según muestra el diagrama de la figura 45. La temperatura mínima y máxima que el adsorbente puede alcanzar, en este caso, dependerá exclusivamente de las condiciones meteorológicas, ya que tanto la temperatura ambiente como el contenido de humedad del mismo determinan la capacidad de enfriamiento. Un ambiente saturado de humedad y con temperaturas relativamente altas carece de capacidad de enfriamiento. Esta misma consideración aplica para el condensador. Para el caso de la Ciudad de Morelia, esta situación es peor en el mes de agosto, de acuerdo a la figura (variables climatológicas Morelia), donde la humedad relativa alcanza hasta el 69% en promedio y una temperatura máxima 26.2 °C. El ciclo de enfriamiento mostrado en la figura 45, debe proyectarse sobre el diagrama de isósteras de la figura 46 para determinar las condiciones de operación del sistema.

El sistema considerado es del tipo cerrado, es decir, que ni el refrigerante ni el adsorbente se exponen a la atmósfera, el esquema conceptual se muestra en la figura 47 y se basa en el trabajo de [Li et al, 2004], entre otros autores:



**Figura 4.36. Sistema cerrado de refrigeración por adsorción.**

En este esquema, el transductor debería insertarse dentro de un recipiente al vacío, con el lado caliente en contacto con la cama de zeolita y el lado frío en contacto con el evaporador. La idea fundamental es que durante el periodo nocturno, con la zeolita seca, el calor transferido desde ésta hacia el lado frío a través del transductor, entre en contacto en el evaporador con el refrigerante, retirando el calor de la cara fría del transductor. Este vapor de agua sería adsorbido por la zeolita, que al llevar a cabo el intercambio de vapor y calor, elevaría su temperatura. Mientras mayor cantidad de vapor sea adsorbido, se incrementaría también la temperatura en la zeolita y se produciría un enfriamiento mayor. En la práctica, deben resolverse varios aspectos para que este esquema pueda funcionar, como la eficiente transferencia de calor de la cama de zeolita hacia el lado caliente, pero sin obstruir el flujo de refrigerante, el aislamiento efectivo entre las caras caliente y fría, el diseño del condensador para diferentes combinaciones posibles de temperatura y humedad ambientales y el nivel de vacío requerido, así como el sellado y aislamiento correctos para evitar pérdidas en el sistema. El diseño de un sistema de refrigeración de este tipo es tan complejo que es tema de tesis de posgrado, como en el caso de [Trujeque, 2010] ó [Cortés, 2009]; a pesar de ello, se consideró que determinar si es factible aplicar los principios de enfriamiento evaporativo para incrementar la potencia generada en un transductor termoeléctrico sería otra aportación importante al tema. Por razones de tiempo fundamentalmente, se estudió exclusivamente la

etapa 1 del ciclo refrigeración por adsorción (enfriamiento). La experimentación se llevó a cabo siguiendo algunos lineamientos en [Wang, 2005], [Hemigway & Robie, 1984] [Trujeque, 2010] y [Cortés, 2009].

El primer paso fue determinar el calor sensible del agua  $Q_s$ , que es la energía que se debe extraer para llevar el objeto de interés a la temperatura de refrigeración; esta agua estará en contacto con el objeto a enfriar; mediante (46):

$$Q_s = Cm(T_1 - T_2) \quad (46)$$

Donde:

$C$  es el calor específico del agua (4.18 KJ/Kg°C)

$m$  la masa de la misma

$T_1$  es la temperatura de lo que se desea enfriar

$T_2$  la temperatura que se desea alcanzar:

Se planteó una temperatura  $T_1$  de 35 °C. ésta sería la temperatura en el lado frío del transductor debida a la transferencia de calor desde el lado caliente, fácilmente alcanzable mediante el colector solar. La temperatura de enfriamiento planteada es de 10 °C, lo que daría un gradiente de a 25°. Suponiendo 100 g de agua, la energía total necesaria sería de: 10.45 KJ.

El siguiente paso es calcular el calor sensible  $Q_R$  en el recinto de refrigeración, de manera similar al paso anterior. Ya que este recinto estará lleno de aire, se utilizó el calor específico del mismo a 25 °C (1.005 KJ/Kg°C) y su densidad (1.145 Kg/m<sup>3</sup>) a la misma temperatura. La masa será el producto del volumen donde se va a encerrar el aire por la densidad. El recipiente utilizado presenta un volumen de 0.000125 m<sup>3</sup> (5 cm por lado), lo que da una masa de 140 mg; sustituyendo estos valores en (46), se obtiene un calor sensible de:

$$Q_R = 3.5175 \text{ Joul}$$

La suma de las 2 anteriores será la carga total de refrigeración, agregando un 14% adicional para compensar las pérdidas. Esto es:

11.917 KJ

Sabiendo que la entalpía de vaporización del agua es de 2257 KJ/Kg, para calcular la masa de refrigerante que debe evaporarse, se despeja con los datos del punto, 5.28 gramos de agua (5.28 % del total).

Para determinar la cantidad de zeolita necesaria, se usa la relación (47):

$$m_{ref} = m_{ads} (X_i - X_f) \quad (47)$$

Donde:

$m_{ref}$  es la masa de refrigerante

$m_{ads}$  es la masa de sorbente

$X_i$  es la máxima relación refrigerante/adsorbente esperada, cuando la zeolita está completamente seca y fría

$X_f$  es la mínima relación refrigerante/adsorbente esperada, cuando la zeolita se encuentra a su máxima temperatura y por lo tanto, no puede adsorber refrigerante.

Como ya se ha mencionado y a partir del diagrama de la figura 45,  $X_i$  y  $X_f$  dependen, tanto de la temperatura alcanzada por la zeolita, como de las condiciones de presión. Asumiendo temperaturas en la zeolita de 40 a 65 °C, se alcanzarían presiones de 10 a 20 mBar debidas a la expansión del vapor. Para ello, es necesario evacuar el sistema, idealmente a una presión de 0 Bar. Al trazar el ciclo de enfriamiento sobre el diagrama de isósteras con estos datos, se obtiene:

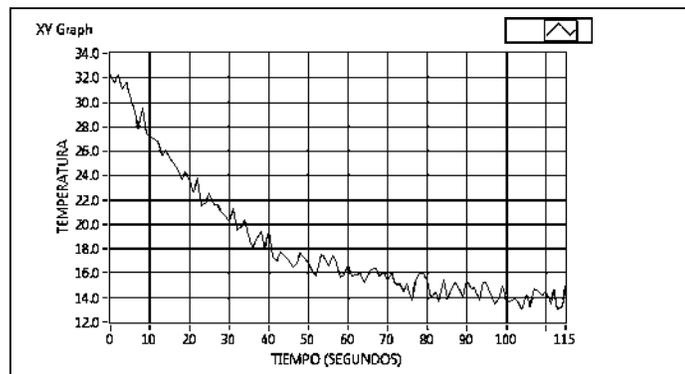
$$X_i = 0.233 \text{ g/Kg}$$

$$X_f = 0.196 \text{ g/Kg}$$

$$Y \ m_{ads} = 2.7 \text{ Kg}$$

Con estos datos, se experimentó de manera simple, llevando a cabo el vacío en un recipiente conteniendo agua a una temperatura inicial de 35 °C. En la práctica, lograr el vacío y al mismo tiempo efectuar mediciones de temperatura tanto en la zeolita como en el refrigerante y el aire

dentro del recipiente resultó una tarea sumamente difícil. Finalmente, solamente se logró medir la temperatura del recipiente, que sería la misma que se alcanzaría en el lado frío del transductor, de acuerdo a los resultados experimentales con radiación solar. La figura 47 muestra una de las mediciones más consistentes que pudo lograrse, en un periodo de casi dos horas, con una temperatura ambiente promedio de 26.75 °C. En la mayoría de las pruebas realizadas, se perdía el vacío en solamente algunos minutos, siendo necesario reiniciar la experimentación, ya que no solo se modificaban las condiciones de presión, sino también las de temperatura al ingresar aire ambiental en el recipiente con contenido de humedad variable.



**Figura 4.37. Enfriamiento alcanzado con una temperatura ambiente promedio de 26.75 °C.**

Claramente, se logró un enfriamiento evaporativo, puesto que la temperatura final alcanzada fue menor a la de la temperatura ambiente. El diferencial de temperatura alcanzado fue de solo 20.1 °C, en lugar de los 25°C esperados. Esto se atribuye al bajo nivel de vacío alcanzado, el cual tampoco pudo medirse; por otro lado, el ciclo de refrigeración se ve modificado por las condiciones del medio ambiente; sin embargo, los resultados mostraron que es posible lograr un enfriamiento en el transductor bajo las condiciones de operación alcanzadas experimentalmente.

#### **4.8. Conclusiones del capítulo.**

Se puede concluir que, en el caso de un equipo que transmite datos y opera a baterías, la duración de las mismas puede ser muy variable, dependiendo de las condiciones de operación; la información de la disponibilidad energética de las baterías no es muy representativa de la realidad. Para este caso en específico, utilizar los datos técnicos de consumo constituyen una

buena aproximación; sin embargo, los perfiles de operación pueden ser muy complejos, por lo que la mejor opción será siempre medir el consumo de energía real.

En cuanto a los transductores, la caracterización demostró que, en realidad, más que sostener un gradiente de temperatura, es necesario proporcionar las condiciones para que exista flujo de calor a través del dispositivo, para que éste flujo, a su vez, produzca una mayor salida eléctrica. La caracterización muestra que es posible generar energía a partir de gradientes relativamente bajos si se selecciona el módulo Peltier adecuado, con ventajas sobre los termogeneradores comerciales. Mediante la simulación y pruebas del convertidor, es posible, en cierta medida, predecir la eficiencia y la cantidad de potencia que es posible generar, así como determinar el gradiente de temperatura mínimo necesario para mantener operando el equipo de interés, de esta forma es más sencillo evaluar rápidamente si una aplicación es posible o no. En cuanto al almacén de energía, éste resultó ser de un valor muy alto, debido a las altas exigencias de la carga utilizada. El empleo de enfriamiento evaporativo por adsorción, de acuerdo a los datos obtenidos, es muy probable que permita alcanzarr un enfriamiento en el transductor bajo las condiciones de operación alcanzadas experimentalmente.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJO FUTURO

### 5.1. Conclusiones generales.

Los resultados obtenidos en este proyecto se consideran importantes como contribución al tema de Recolección de energía; fundamentalmente para ofrecer alternativas al empleo de baterías como fuente de energía principal, las cuales, como ya se ha mencionado, tienen el principal inconveniente de ser altamente contaminantes una vez que su vida útil termina, además de los altos costos o dificultad técnica que representa su reemplazo. Las aplicaciones presentes y futuras son muchas; vislumbrándose un extenso uso para el monitoreo ambiental, debido a que cada vez es más necesario llevar un control de los recursos naturales tales como agua, niveles de contaminación, variables meteorológicas, monitoreo de cultivos y otros similares, que requieren redes de sensores y otro tipo de equipos autónomos.

Autores como [Das, 2011] resaltan claramente la necesidad de desarrollo en esta área, para la cual se proyecta un mercado sumamente importante proyectado al año 2015, el cual se encuentra muy cercano. La evidencia muestra que existen fabricantes especializados ya sea en el transductor, en el convertidor, etc.; pero el problema fundamental es que todas estas partes no se han integrado para dar solución a la problemática práctica. Al desarrollar este trabajo, es claro que cada caso debe analizarse por separado, ya que las condiciones operativas, aún cuando la fuente energética sea la misma, pueden ser diferentes; por ejemplo, un sistema operando con energía solar puede verse afectado por los objetos del entorno que en determinadas horas disminuyen o bloquean la colecta de energía [Penella & Gasulla, 2007] y [Kompis, 2008], es decir que no existen soluciones universales, sino que es necesario analizar cada caso. El panorama es de poca estandarización, esto dificulta e hizo necesaria mucha experimentación.

El análisis del estado del arte demostró que existe una gran cantidad de experimentación, siendo orientados los esfuerzos principalmente a determinar cuánta energía se produce y posteriormente se selecciona una carga que se acople a esta disponibilidad. En este trabajo se ha planteado el problema inverso: una vez determinada la demanda energética de la carga, ¿cómo proceder para establecer si la aplicación es viable y bajo que condiciones lo es?. Al ser fuentes de energía limitada, es crucial tomar en cuenta todas las restricciones posibles en todas las etapas que conforman un sistema basado en el concepto de recolección de energía: fuente energética, transductores, acondicionamiento de señales y almacén de energía. Establecer las condiciones mínimas y el porcentaje de pérdidas es fundamental.

La operación de este tipo de sistemas es muy diferente de las aplicaciones estándar que se utilizan cotidianamente; es importante resaltar que la operación es intermitente y que fundamentalmente el objetivo es mantener cargado un almacén en periodos en los que la energía se encuentra disponible, a partir del cual la carga se alimentará. La eficiencia debe ser suficientemente alta y el almacenaje suficientemente eficiente y rápido para captar y proporcionar energía en los periodos en los que ésta no está presente en la entrada o es demasiado reducida.

La carga elegida en este caso como referencia para el diseño, aunque muy demandante en energía, demostró que aún cuando se presentan picos muy altos de consumo de energía, alcanzando hasta 2 A, éstos no representan la mayor parte del consumo (36%), sino que esto corresponde a la operación continua en modo de bajo consumo (43%). Los equipos susceptibles de ser alimentados bajo este esquema utilizan actualmente baterías; la experimentación mostró que éstas presentan desempeños diferentes a los valores nominales y su duración es menor a la estimada, esto concuerda con algunas fuentes de información consultadas, en este caso se observaron diferencias superiores al 500% en los estimados de energía; claramente, además de los problemas ya mencionados de las baterías, el hecho de que no es posible extraer toda la energía contenida en éstas obliga a utilizar variedades de alta capacidad energética, lo que impacta en el costo. Por otro lado, incluso con los valores nominales, se observaron diferencias de un 57% entre ésta información y los valores reales medidos. Los perfiles de consumo, de igual manera, presentaron tiempos de duración diferentes a los esperados; dado que cada micro Watt es esencial en estas aplicaciones, es claro

que debe caracterizarse el comportamiento de la carga que se desea alimentar y bajo las condiciones operativas esperadas.

En cuanto a los transductores, aún cuando los fotovoltaicos presentan densidades energéticas altas, de hasta  $100 \text{ mW/cm}^2$  y puede ser solución para muchas aplicaciones, se decidió experimentar con transductores termoeléctricos (que ofrecen densidades de sólo  $25 \mu\text{W}$  a  $10 \text{ mW/cm}^2$ ) con la finalidad de realizar una aportación en este campo, ya que existe relativamente poco trabajo con fuentes de baja temperatura; por otro lado, la energía térmica está presente también como resultado de la conversión de la radiación solar y en general, en prácticamente cualquier medio, con la ventaja de que es susceptible de ser almacenada y liberada cuando se requiera de manera relativamente simple y económica y puede ser una alternativa al no uso de baterías, además de que la tecnología actual de supercapacitores no permite operar directamente a voltajes de trabajo superiores a los 2 Volts sin que esto impacte fuertemente en el costo del sistema, por ello se buscaron alternativas para disminuir el tamaño del almacén eléctrico una vez establecido este problema.

Experimentalmente, se demostró que utilizar módulos Peltier en lugar de dispositivos generadores termoeléctricos presenta ventajas en cuanto a tamaño y costo, al ser mas adecuados para gradientes de temperatura bajos; el inconveniente encontrado es que al no existir información técnica del desempeño bajo este esquema, fue necesario caracterizar y experimentar con los dispositivos. Se observó un menor corrimiento por temperatura de operación, menor área superficial necesaria y mejores niveles de potencia de potencia de salida, así como costos menores. Los factores más determinantes para una primera selección aproximada demostraron ser la combinación de un coeficiente Seebeck alto, un voltaje de trabajo alto como módulo Peltier y una resistencia eléctrica interna pequeña. Algunos autores como [Dalola et al, 2009] y el propio fabricante del convertidor de potencia [Linear Technology, 2010], indican que la superficie del transductor es determinante; sin embargo, el trabajo experimental demostró que este no es un factor crucial. Como era de esperarse, la eficiencia del transductor es muy reducida, siendo menor al 0.1 %.

En cuanto al convertidor, ya que se generan unos cuantos mV, se decidió utilizar un dispositivo comercial diseñado para este tipo de aplicaciones. La revisión del estado del arte mostró que, aún en fechas recientes, el nivel tecnológico actual en semiconductores hace

imposible construir un convertidor para niveles de voltaje tan reducidos a partir de dispositivos discretos, además de que su operación no es estándar, debido a la naturaleza intermitente. La única opción viable sería el desarrollo de un circuito integrado especializado, para el cual no se cuenta con la infraestructura a desarrollar ni era el objetivo de esta investigación e incluso en estos casos, la bibliografía encontrada mostró que los trabajos en este campo presentan problemas de baja eficiencia, voltajes generados no compatibles con la mayoría de los voltajes comerciales y bajas potencias generadas; con el inconveniente fundamental de que en general, requieren de un mecanismo de arranque inicial con energía externa para que el convertidor comience a operar (kickstart). El diseño del convertidor demostró no ser una labor trivial, pues fueron necesarias varias iteraciones, tanto de simulación como experimentales para alcanzar una eficiencia y potencia de salida balanceadas, logrando superar la expectativa de la información presentada en la hoja de datos, ya que con el módulo RC6-6 se logró el doble de la eficiencia estimada. Debido a que no se han reportado a la fecha aplicaciones con este convertidor, la experimentación mostró que el principal lineamiento a seguir en el diseño es utilizar la menor relación de transformación posible que se acople al máximo voltaje esperado de entrada, a fin de mantener una eficiencia lo más alta posible. Los valores de los capacitores periféricos deben determinarse en forma experimental, pues distintas combinaciones producen resultados diferentes y deben acoplarse a las características eléctricas del transductor para obtener la mejor respuesta posible.

La no linealidad del convertidor, que se ve afectada por los valores de sus componentes periféricos, hace difícil predecir la potencia generada a menos que se realicen pruebas experimentales. Tanto la eficiencia como la potencia de salida pudieron aproximarse mediante polinomios de orden 3, pero los valores de los coeficientes son muy variantes, demostrando que solo experimentalmente se puede determinar el desempeño del circuito. Las simulaciones realizadas, aún cuando se efectuaron en un simulador que, de acuerdo a la información del fabricante está optimizado para simular dispositivos que operan en forma discontinua [Linear Technology, 2008], mostraron que el modelo disponible sólo es válido para una salida programada de 3.3 Volts; fuera de este parámetro, se observaron resultados inconsistentes. Esta constituye otra aportación en el sentido de que cada aplicación debe probarse experimentalmente.

En cuanto a la radiación solar como fuente de calor, se efectuó el diseño general a partir de datos históricos recopilados durante 20 años para la Ciudad de Morelia, que se contrastaron con los datos de cálculo de [Collares & Perira, 2003] por ser más restrictivos. Este trabajo llevó a investigar también acerca de la metodología de captación y almacenamiento de calor. Con estos datos, se observó un incremento del 100% en la captación de energía solar respecto a la primera aproximación con un colector plano expuesto al aire libre, mediante la construcción de un captador solar con aislamiento y con mejores características para la captación. A lo largo de este trabajo, se buscó fundamentalmente elevar la temperatura en el captador, en contacto con el lado caliente del transductor para lograr un diferencial de temperatura más alto que, a su vez, produjera mayor cantidad de potencia en el transductor; sin embargo, se encontró que cada vez que se eleva la temperatura, aunque se produce un incremento en el gradiente, resulta cada vez más difícil mantenerlo debido a la transferencia de calor de la cara caliente hacia la cara fría, lo cual ocurre de manera natural, haciendo necesario encontrar mecanismos para remover el calor eficientemente en el lado frío del transductor, ya que se determinó que la generación de potencia en realidad depende del flujo de calor a través del dispositivo y no propiamente de un diferencial de temperatura estático aplicado en las caras del mismo.

Inicialmente se planteó el uso de zeolitas como medio de almacenaje termoquímico a fin de reducir el tamaño del almacén eléctrico, el cual debería ser superior a los 100 F, lo que impacta en el costo; sin embargo, se encontró que sus características pueden utilizarse también para la remoción de calor para que el dispositivo pueda operar durante el periodo nocturno, aún cuando no existe energía calorífica solar disponible.

A pesar de las dificultades en la parte experimental, se logró un gradiente de 20.1 °C en el empleo de los principios de enfriamiento evaporativo, lo que indica que, bajo las condiciones operativas existentes durante la experimentación con energía solar, al menos la fase de enfriamiento es posible.

## **5.2. Propuestas y trabajo futuro.**

El trabajo futuro que se recomienda realizar es el de caracterizar más transductores, con la finalidad de generar una teoría más generalizada en cuanto a la selección de módulos Peltier como generadores de energía eléctrica. Por otro lado, ya se ha mencionado que es sumamente importante retirar el calor del lado frío para favorecer el flujo de calor y crear un gradiente de temperatura suficiente para generar mayor cantidad de energía. En este trabajo solamente se experimentó con la fase de enfriamiento; sin embargo, es necesario llevar a cabo el diseño completo del sistema de refrigeración, incluyendo el evaporador y condensador, e introducir el transductor dentro del sistema para evaluar su comportamiento.

# REFERENCIAS

- [Advanced Linear devices, 2007] "EH300/EH301 EPAD® RECOLECCIÓN DE ENERGÍATM Modules". Advanced Linear devices. 2007
- [Agbossou et al, 2010] "Solar micro-recolección de energía based on thermoelectric and latent heat effects. Part I: Theoretical analysis. Sensors and Actuators A 163. Elsevier. 2010.
- [Alippi & Galperti, 2008] "An Adaptive System for Optimal Solar Recolección de energía in Wireless Sensor Network Nodes". IEEE Transactions on circuits and systems —I: Regular Papers, Vol. 55, No. 6, July 2008.
- [Amataya & Ram, 2010] "Solar Thermoelectric Generator for Micropower Applications". Journal of Electronic materials, Vol. 39, No. 9, 2010
- [Anyanwu, 2005] "Thermodynamic design procedure for solid adsorption solar refrigerator" Renewable Energy 30 . 2005.
- [Arms et al, 2005] "Power Management for Recolección de energía Wireless Sensors" SPIE Int'l Symposium on Smart Structures & Smart Materials San Diego, CA.9 March 2005.
- [Ataer, 2006] "Storage of thermal energy, in Energy Storage Systems" Encyclopedia of Life Support Systems. 2006.
- [Baharvand, 2010] "How to model a wall solar chimney? Complexity and Predictability". Master final Thesis, Technical University of Eindhoven. Department of Architecture, Building and Planning. 2010.
- [Bernardes & Weinrebe, 2003] "Thermal and technical analyses of solar chimneys". Solar Energy. Elsevier. Vol 9, No. 12. 2003
- [Borno et al, 2009] "Charge-pumping in a synthetic leaf for harvesting energy from evaporation-driven flows". Applied Physics Letters 95, 013705, 2009
- [Buist & Lau, 1977] "Thermoelectric Power Generator Design and Selection from TE Cooling Module Specifications". Disponible en web:  
<<http://www.tetech.com/publications/pubs/ICT97RJB.pdf>> 1977
- [Buist & Nagy, 1996] "Thermoelectric heat sink modeling and optimization". TE Technology, Inc. 1996
- [Cap-XX, 2001] "Current-Limit and Low-Voltage Lockout Circuit for Portable Devices". Application note No. 1001. CAP-XX. 2001
- [Cap-XX, 2001] "Pulsed Load Applications". Application brief No. 1006. Cap-XX, 2001.
- [Cap-XX, 2002] "Effect of Supercapacitor Distance from a Load". cap-XX APPLICATION BRIEF 1013. Cap-XX. 2002.

- [Cap-XX, 2002] "Powering GPRS/GSM Devices on CompactFlash Cards with cap-XX Supercapacitors". cap-XX Application brief 1010. Cap-XX, 2002.
- [Cap-XX, 2009] "Simple Measurement of Supercapacitor Parameters" Application Note AN1005 ,revision 2.2 Cap-XX. 2009
- [Carlson et al, 2010] "A 20 mV input boost converter with efficient digital control for thermoelectric recolección de energía". IEEE Journal of solid-state circuits. April 2010.
- [Carmo et al, 2010] "Thermoelectric Microconverter for energy harvesting Systems". IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 57, No. 3, March 2010
- [Castro & Arias, 2000] "La contaminación por pilas y baterías en México". Reporte Técnico, Gaceta Ecológica INE-Semarnat. 2000.
- [Chávez-Urbiola et al, 2012 ] "Solar hybrid systems with thermoelectric generators". Solar Energy 86. 2012
- [Champier et al, 2009] "Thermoelectric power generation from biomass cook stoves". D. Champier a,b,\* , J.P. Bedecarrats c, M. Rivaletto a,b, F. Strub. Energy 2009. Article in press p. 1 – 8.
- [Chen et. Al, 2011] "Solar Thermoelectric Energy Conversion". 2011 Thermoelectrics Application Workshop. San Diego, January 3-6, 2011
- [Cohen, 2007] "Top 10 reasons for using ultracapacitors in your system designs". White paper. Maxwell technologies, Inc. 2007.
- [Coilcraft, 2010] "Coupled Inductors – LPR6235. For Step-Up, Resonant & Flyback Applications. Document 752-1. Coilcraft, 2010
- [Collares y Pereira, 2003] "Irradiaciones global, directa y difusa en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, para la República Mexicana". Solartronic, S.A. de C.V. 2003.
- [Cooper Bussmann, 2007] "Design Considerations In Selecting Aerogel Supercapacitors". Cooper Bussmann. 2007
- [Cooper Bussmann, 2007] "High power aerogel supercapacitors enable new pulse, bridge and main power applications". Cooper Bussmann. 2007
- [Cooper Bussmann, 2007] "Methods for Measuring Capacitance, Inflow Current, Internal Resistance and ESR". Cooper Bussmann, 2007.
- [Cooper Bussmann, 2007] "Aerogel supercapacitors Application Guidelines". Cooper Bussman. 2007.
- [Cortés, 2009] "Adsorción de agua en materiales compuestos y en zeolita. Memoria presentada para optar al grado de Doctor en Ingeniería – Sistemas Energéticos. PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA SISTEMAS ENERGETICOS ESCUELA DE PROCESOS Y ENERGÍA. FACULTAD DE MINAS UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.MEDELLIN. 2009

- [Curtis, 2008] "Replacing chemical battery storage with supercapacitors into your embedded design". Power management design line. 2008
- [Dalola et al, 2009] "Characterization of thermoelectric modules for powering autonomous sensors". IEEE transactions on instrumentation and measurement. January 2009. Vol. 58-1.
- [Dalola; Ferrari et. al, 2009] "Autonomous Sensor System With Power Harvesting for Telemetric Temperature Measurements of Pipes" Ferrari, V. ; Guizzetti, M. ; Marioli, D. ; Sardini, E. ; Serpelloni, M. ; Taroni, A. Volume: 58 , Issue: 5 Page(s): 1471 - 1478
- [Das, 2011] "Short term challenges in the recolección de energía market". IDTech ex recolección de energía journal. May 27, 2011.
- [Deng, 2009] "DC/DC converters: regulated charge-pump vs. inductor-based". Analogue and interface products division. Microchip technology inc. 2009
- [Dziurdzia & Stepien, 2011] "Autonomous Wireless Link Powered with Harvested Heat Energy" Piotr Dziurdzia and Jacek Stepien. Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems (COMCAS), 2011 IEEE International Conference on, Tel Aviv.7-9 Nov. 2011  
Author(s): Dziurdzia, P. Page(s): 1- 4.Conference Publications.
- [Eggborn, 2005] "Analytical Models to Predict Power Harvesting with Piezoelectric Materials". Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University In partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science In Mechanical Engineering. 2005
- [Eisenhut & Bitschi, 2006 ] "Thermoelectric conversion system based on geothermal and solar heat". IEEE 2006 international conference on thermoelectrics. 2006
- [Ercan, 2006] O. Ercan Ataer, (2006), STORAGE OF THERMAL ENERGY, in Energy Storage Systems, [Ed. YalcinAbdullah Gogus], in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford ,UK.
- [Fan et al, 2007] "Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications" Renewable and Sustainable Energy Reviews 11. 2007.
- [Farmer, 2007] "A comparison of power harvesting techniques and related energy storage issues". Thesis Submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering. 2007

- [Fernández y Estrada-Cajigal, 1983] "Cálculo de la radiación solar instantánea en la república mexicana". Instituto de Ingeniería. UNAM. 1983
- [Fernández, 1986] "Modelo simplificado para calcular pérdidas térmicas de captadores solares planos". UNAM. Series del instituto de Ingeniería No. D-25. Diciembre de 1986.
- [Gopal et al., 1982] "The rates of solar energy storage and retrieval in a zeolite-water system". Solar Energy Vol. 28, No. 5. 1982
- [Guevara, 2003] "Diseño de colectores solares". Unidad de apoyo técnico para el saneamiento básico del área rural. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Oficina Sanitaria Panamericana – Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud. 2003
- [Harb, 2011] "Recolección de energía: state of the art". Renewable Energy. 2011.
- [He et al, 2012] "A study on incorporation of thermoelectric modules with evacuated-tube heat-pipe solar collectors". Wei He a.\*, Yuehong Su b, Y.Q. Wang a, S.B. Riffat, Jie Ji . p 142-149.
- [Hemigway & Robie, 1984] "Thermodynamic properties of zeolites: low-temperature heat capacities and thermodynamic functions for phillipsite and clinoptilolite. Estimates of the thermochemical properties of zeolitic water at low temperature". American Mineralogist, Volume 69. 1984
- [Hoang et al, 2009] "Thermal energy harvesting From Human Warmth For Wireless Body Area Network In Medical Healthcare System". PEDS 2009.
- [Hsu et. al, 2006] "Adaptive duty cycling for energy harvesting systems". Jason Hsu, Sadaf Zahedi, Aman Kansal, Mani Srivastava, Vijay Raghunathan. ISLPED'06, October 4-6, 2006, Tegemsee, Germany. P. 180-185.
- [Hsu et al, 2011] "Experiments and simulations on low-temperature waste heat harvesting system by thermoelectric power generators" Cheng-Ting Hsu, Gia-Yeh Huang, Hsu-Shen Chu, Ben Yu , Da-Jeng Yao. Applied Energy 88 (2011) p. 1291–1297
- [Hurtado et al, 2008] "Modelización numérica del proceso de transferencia de calor, del flujo convectivo inducido y de la potencia generada en una central eólico solar" XIV Congreso Ibérico y IX Iberoamericano de energía solar. Vigo, España, 17 a 21 de junio de 2008.
- [Ibramigov et. al, 2012] "A Thermoelectric Energy Harvester Directly Embedded Into Casted Aluminum". Azat Ibragimov, Hermann Pleiteit, Christoph Pille, and Walter Lang. IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 33, NO. 2, FEBRUARY 2012 p. 233-235.
- [Kadirvel et al, 2012] Power management functions for energy harvesting. Texas instruments.

- [Kansal & Mani, 2005] "Distributed energy harvesting for energy neutral sensor networks". IEEE CS and IEEE ComSoc Pervasive Computing. 2005
- [Kansal et al, 2006] "Power Management in energy harvesting Sensor Networks". ACM Journal Name, Vol. V, 2006
- [Khattab, 2004] "A novel solar-powered adsorption refrigeration module". Applied Thermal Engineering 24. 2004.
- [Kheng & Kumar, 2011] "Energy harvesting From Hybrid Indoor Ambient Light and Thermal Energy Sources for Enhanced Performance of Wireless Sensor Nodes". IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 58, No. 9, september 2011
- [Kim & Infante, 2008] "Solar refrigeration options – a state-of-the-art review" international journal of refrigeration 31 . 2008
- [Kimball et al, 2009] "A System Design Approach for Unattended Solar energy harvesting Supply. IEEE Transactions on power electronics, vol. 24, no 4. april, 2009.
- [Kompis, 2008] "Energy harvesting technologies to enable remote and wireless sensing". Sensors and instrumentation KTN Report. June 2008.
- [Koonsrisuk & Chitsomboon, 2007] "Dynamic similarity in solar chimney modeling" Solar Energy vol 3 No. 3. Elsevier. 2007
- [Laird technologies, 2010 ] "The thermoelectric handbook". 2010. THR-BRO-THERMOELECTRIC-HNDBK0110. Disponible en web:www.lairdtech.com
- [Lang et al, 1999] "Development of a modular zeolite-water heat pump". Heat and Mass Transfer 35. 1999
- [Lawrence & Snyder, 2002] "A Study of Heat Sink Performance in Air and Soil for Use in a Thermoelectric energy harvesting Device". E. Lawrence, E. and J. Snyder, G.. In D. Chandra, G. Bautista, R., and L. Schlapbach, editors, Proceedings ICT'02, 2002
- [León & Pina, 2006] "Development of a Small Energy Scavenger" Florida International University. Florida Conference on Recent Advances in Robotics, FCRAR 2006 Miami, Florida, May 25-26, 2006
- [Leonov et al, 2007] "Thermoelectric converters of human warmth for self-powered wireless sensor nodes". IEEE sensors journal. May 2007. Vol. 7
- [Li et al, 2004] "Development of no valve solar ice maker". Applied Thermal Engineering 24. 2004
- [Lienhard & Lienhard, 2004] "A heat transfer textbook, third edition". Phlogiston Press. Cambridge, Massachussets, U.S.A. 2004.

- [Linear technology Corporation, 2010] "LTC3108 Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager datasheet". Linear technology Corporation 2010
- [Linear technology, 2008] "SwitcherCAD III/LTspice Getting Started Guide". Linear Technology, 2008.
- [Linear technology, 2010] "Ultralow Voltage 20mV Step-Up Converter & Power Manager for energy harvesting Applications datasheet". 2010.
- [Lineykin & Yaakov, 2005] "modelling and analysis of thermoelectric modules". IEEE Applied power electronics conference and exposition 2005.
- [Lineykin & Yaakov, 2004] "PSPICE- compatible equivalent circuit of thermoelectric coolers". IEEE convention of electrical an electronics engineers in Israel, 2004.
- [Lu & Yang 2010 ] "Thermal energy harvesting for WSNs". 2010 IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics (SMC), Istanbul. October 10 to 13, 2010.
- [Lu, et al, 2010] "Analysis and Design of Ultra Low Power Thermoelectric Energy harvesting Systems". ISLPED'10, August 18-20, 2010, Austin, Texas, USA.
- [Marlow] "TG Technical Data Sheet Guidelines" Marlow Industries, Inc.
- [Mars, 2012] "Coupling a supercapacitor with a small recolección de energía source". Capp-XX Ltd. 2012
- [Mateu et al, 2007] "Human Body energy harvesting Thermogenerator for Sensing Applications". 2007 International Conference on Sensor Technologies and Applications. 2007
- [Matheu, 2004] "Recolección de energía from Passive Human Power". PhD Thesis Project. Electronic Engineering. 2004
- [Maxim Inc, 2000] "DC-DC Converter Tutorial" APPLICATION NOTE 2031. Maxim integrated products, oct.19, 2000.
- [Maxwell Technologies Inc., 2004] "How to Determine the Appropriate Size Ultracapacitor for Your Application" Application note Doucment 1007236, Rev 2. Maxwell Technologies, Inc. 2004.
- [Maxwell technologies Inc., 2005] "Charging of Ultracapacitors". Application note document 1008981, Rev 1. Maxwell Technologies. 2005
- [Mc Carty, 2010] "Energy harvesting for wireless sensors, synergistic analysis of thermoelectric devices, heat sinks and associated electronics for optimized recolección de energía systems". Marlow Industries, Inc. 2010
- [McGarry & Knight, 2011] "The Potential for Harvesting Energy from the Movement of Trees" Sensors 11. 2011.
- [Meehan et al, 2007] "Energy harvesting with microbial fuel cell and power management system". IEEE transactions on power electronics. January 2011 Vol. 26-1
- [Microchip Technology Inc., 2009] "MPLAB® IDE User's Guide with MPLAB Editor and MPLAB SIM Simulator" Microchip Technology Inc. 2009

- [Microchip Technology Inc., 2009] "nanoWatt and nanoWatt XLP™ Technologies: An Introduction to Microchip's Low-Power Devices
- [Microchip Technology Inc., 2010] "HI-TECH C® for PIC10/12/16 User's Guide. Microchip Technology Inc. 2010.
- [Microchip Technology Inc., 2010] "PICkit 3 Programmer/Debugger User's Guide". Microchip Technology Inc. 2010
- [Microchip Technology Inc., 2011] "PIC16(L)F1826/27 Data Sheet 18/20/28-Pin Flash Microcontrollers with nanoWatt XLP Technology" Microchip Technology Inc. 2011
- [Miljkovic & Wang, 2011] "Modeling and optimization of hybrid solar thermoelectric systems with thermosyphons". Solar Energy 85. 2011.
- [Mitcheson & Toh, ] "Energy harvesting for autonomous....." CHAP T E R 6. Power Management Electronics.
- [Monser et al, 2007] "Adaptive Power Management in Recolección de energía Systems". EDAA 978-3-9810801-2-4/DATE07 © 2007
- [Morais et al., 2008] "Sun, Wind and water flow as energy supply for small stationary data acquisition platforms". Computers and electronics in agriculture magazine. 2008. Elsevier.
- [Musiani et al, 2007] "Active Sensing Platform for Wireless Structural Health Monitoring" IPSN'07, April 25–27, Cambridge, Massachusetts, USA.2007.
- [National Instruments, 2003] "CompactRIO cRIO-9211 4-Channel Thermocouple Input Module Operating Instructions". National Instruments, 2003
- [National Instruments, 2005] "USB-6008/6009 User guide and specifications". National Instruments, 2005
- [National Instruments, 2008] "Field Wiring and Noise Considerations for Analog Signals" National Instruments, Jan 2, 2008
- [Ottman, 2002] "Adaptive Piezoelectric Energy harvesting Circuit for Wireless Remote Power Supply". Geoffrey K. Ottman, Member, IEEE, Heath F. Hofmann, Member, IEEE, Archin C. Bhatt, and George A. Lesieutre. 42<sup>nd</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, Adaptive Structures Forum, Seattle, WA, April 16–19, 2001. P. 669-676.
- [Park & Chou, 2006] "AmbiMax: Autonomous Energy harvesting Platform for Multi-Supply Wireless Sensor Nodes". Chulsung Park and Pai H. Chou. IEEE SECON 2006 proceedings
- [Penella & Gasulla, 2007] "A Review of Commercial Energy Harvesters for Autonomous Sensors". Instrumentation and Measurement Technology Conference - IMTC 2007 Warsaw, Poland, May 1-3, 2007

- [Raghunatan et al, 2005] "Design Considerations for Solar Energy harvesting Wireless Embedded Systems". Networked and Embedded Systems Lab (NESL) Department of Electrical Engineering. University of California, 2005
- [Raju, 2008] "Energy harvesting ULP meets energy harvesting: A game-changing combination for design engineers". White paper. Texas Instruments Inc. 2008.
- [Ramadass & Chandrakasan, 2011] "A battery-less thermoelectric energy harvesting interface circuit with 35 mV startup voltage". IEEE Journal of solid-state circuits. January 2011.
- [Ramos et al, 2003] "Evaluation of a zeolite-water solar adsorption refrigerator" ISES Solar World Congress 2003 June 14-19,2003, Göteborg, Sweden.
- [Randall et al, 2005] "Power and data with recolección de energía technology". IEEE CS and IEEE ComSoc PERVASIVE computing. 2005
- [RC12-4] "RC12-4 Single-Stage Thermoelectric Cooler Technical datasheet". Marlow Industries, Inc.
- [RC6-6] "RC6-6 Single-Stage Thermoelectric Cooler Technical datasheet". Marlow Industries, Inc.
- [Riemer & Shapiro, 2011] "Biomechanical recolección de energía from human motion: theory, state of the art, design guidelines, and future directions". Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation 2011.
- [Ritzar et al, 1997] "A critical evaluation of today's Thermoelectric modules". international conference on thermoelectrics IEEE. TE technology, Inc, 1997. 16
- [Roundy et al, 2008] "Recolección de energía for tire pressure monitoring systems: Design considerations". Proceedings of PowerMEMS 2008+ microEMS 2008, Sendai, Japan, November 9-12, 2008.
- [Roundy et al, 2003] "A 1.9GHz RF Transmit Beacon using Environmentally Scavenged Energy". Shad Roundy†, Brian P. Otis\*, Yuen-Hui Chee\*, Jan M. Rabaey\*, Paul Wright† DIG. IEEE INT. SYMPOSIUM ON LOW POWER ELEC. AND DEVICES, SEOUL, KOREA , 2003
- Ruzhu, 2005] "Adsorption refrigeration, green cooling driven by low grade thermal energy" Chinese Science Bulletin Vol. 50. 2005
- [Sanchez, 2008] "Energía solar térmica". Editorial LIMUSA. 2008.
- [Schenck, 1999] "A demonstration of useful electric energy generation from piezoceramics in a shoe". Nathan S. Shenck, master of science in electrical engineering thesis. Massachusetts Institute of Technology. May 1999.
- [Schindall, 2008] "The charge of ultracapacitors". IEEE spectrum magazine. March 2008.

- [Shigesish, 1979] "Solar energy storage using chemical potential changes associated with drying of zeolites" Solar Energy, Vol. 23. 1979
- [Shukla et al., 2000] "Electrochemical supercapacitors: Energy storage beyond batteries". Current science, Vol. 79, No. 12, December, 2000.
- [Simonot-Grange, 1979] "Thermodynamics and structural features of water sorption in zeolites". Clays and Clay Minerals, Vol. 27, No. 6, 1979.
- [Singh et al, 2011] "Electric power generation from solar pond using combined thermosyphon and thermoelectric modules". Solar Energy 85. 2011.
- [SMN-CNA, 2000] "Normales climatológicas en Morelia, Michoacán 1981 - 2000". Comisión Nacional del Agua. Observatorio sinóptico. Sistema Meteorológico Nacional. 2000
- [Sodano & Inman, 2004] "A Review of Power Harvesting from Vibration using Piezoelectric Materials". The Shock and Vibration Digest, 36(3), 2004.
- [Sodano et. al, 2007] Recharging Batteries using Energy Harvested from Thermal Gradients. Henry A. Sodano. Garnett E. Simmers, Remi Dereux, Daniel J. Inman. Journal of Intelligent Material Systems and Structures January 2007 vol. 18 no. 1 3-10
- [Solmus et al, 2011] "Experimental investigation of a natural zeolite–water adsorption cooling unit". Applied Energy 88 2011.
- [Tchernev, 1978] "Solar energy application of natural zeolites". Natural zeolites: Occurrence, properties, use. Oxford, Pergamon Press, Ltd., 1978
- [Tellurex, 2006] "An Introduction to Thermoelectrics". Tellurex Corporation. 2006
- [TG12-6] "TG12-6 Thermoelectric Generator datasheet". Marlow Industries, Inc.
- [Tritt &Subramanian, 2006] "Thermoelectric Materials, Phenomena, and Applications: A Bird's Eye View". MRS Bulletin Volume 31. 2006.
- [Trujeque, 2010] "Diseño de refrigerador solar por adsorción para clima cálido húmedo". Tesis para obtener el grado de doctorado en tecnología avanzada. CINVESTAV Unidad Querétaro. 2010
- [Uniross, 2007] "UNIROSS Study on the Environmental Impact of Batteries". Uniross study carried out by Bio Intelligence Service
- [Valenzuela, 2009] "Batteryless recolección de energía for embedded designs In the era of 32- and 64-bit multicore behemoths, 8- and 16-bit MCUs get new respect for power management". Green supply line. Texas instruments. August 2009
- [Van Helden, 2010] "Materials for Compact Seasonal Heat Storage" IEA Solar Heating & Cooling workshop. Capetown, South Africa. 15 November 2010

- [Van Sark, 2011] "Feasibility of photovoltaic – Thermoelectric hybrid modules". Applied Energy 88. Elsevier. 2011.
- [Vullers, et al, 2009] "Micropower recolección de energía". Solid-State Electronics. 2009. No. 53
- [Wang, 2005] "Thermodynamics of Dehydration and Rehydration of Zeolites for Energy Storage and Heat Pump Applications". International Sorption heat pump conference. June 22-24. Denver, Co. USA. 2005
- [Watkins et al, 2005] "Low-grade-heat recolección de energía using superlattice thermoelectrics for applications in implantable medical devices and sensors". IEEE 2005 International Conference on Thermoelectrics. 2005
- [Yang & Yin, 2011] "Energy Conversion Efficiency of a Novel Hybrid Solar System for Photovoltaic, Thermoelectric, and Heat Utilization". IEEE Transactions on energy conversion, vol. 26, No. 2, June 2011
- [Yazawa & Shakouri, 2010] "System Optimization of hot water concentrated solar thermoelectric generation". Thermal Issues in Emerging Technologies, ThETA 3, Cairo, Egypt, Dec 19-22nd 2010
- [Zhang et al, 2010] "Solar micro-recolección de energía based on thermoelectric and latent heat effects. Part II: Experimental analysis. Sensors and Actuators A 163. Elsevier. 2010.