

LA CALORIMETRÍA DIRECTA COMO HERRAMIENTA PARA LA MEDICION DE FLUJO DE CALOR EN CIRCUITOS ELECTRÓNICOS



AUTOR

Jeison Marin Alfonso

Ingeniero Electrónico
MS(C) en Ingeniería.
Investigador Grupo de investigación en control, modelado y simulación CEMOS
Universidad Industrial de Santander
Docente Unidades Tecnológicas de Santander.
jeisonmarin@hotmail.com
COLOMBIA

AUTOR

Carlos Rodrigo Correa Cely

Ingeniero Químico
Ph.D.(Polimeros, USA), Posdoc.(U. Stuttgart, Alemania)
Investigador Grupo de investigación en control, modelado y simulación CEMOS
Docente Titular Escuela de Ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones
Universidad Industrial de Santander
crcorrea@uis.edu.co
COLOMBIA

Fecha de Recepción del Artículo marzo 24 de 2006 Fecha de Aceptación del Artículo Abril 17 de 2006
Artículo Tipo 1

RESUMEN.

La gran influencia que tienen las altas temperaturas en el comportamiento de los circuitos electrónicos, y por lo tanto, la necesidad que existe en determinar de una forma cuantitativa la efectividad que estos tienen en disipar el calor generado durante su funcionamiento, motivaron la realización de este proyecto. El proyecto consiste en el planteamiento de una alternativa para dicha medición la calorimetría directa y el diseño y construcción de un prototipo que ajuste esta alternativa dentro de las características propias de los circuitos electrónicos, es decir tamaño y potencia generada. El prototipo realizado, CALPAC (calorímetro para circuitos electrónicos), mide el flujo de calor a través de un circuito, en unidades de potencia. Este artículo presenta el desarrollo de las cuatro principales etapas para la realización del proyecto. La primera, un análisis del marco teórico sobre el cual se justifico la alternativa elegida para medir calor; la segunda, el diseño y construcción del equipo; la tercera, el diseño y construcción del sistema de adquisición de datos, llamado módulo electrónico del CALPAC; y finalmente, la calibración y pruebas del prototipo y resultados. Este proyecto muestra como la unión de conocimientos de diversas áreas, en este caso, termodinámica, electrónica y diseño industrial, permiten la generación de ideas y construcción de equipos de gran utilidad dentro del marco investigativo.

PALABRAS CLAVES

Calor
Potencia
Circuitos Electrónicos
Calorímetro
Disipación de Calor
Medición de Calor.

ABSTRACT

The big influence that high temperatures have on the behavior of the electronic circuits and therefore the existent necessity to determine in a quantitative form the effectiveness these have dissipating the heat generated during its functioning, motivated the realization of this project. It consists on the establishment of an alternative for such

measuring the direct calorimetry and the development of a prototype that would fit this alternative within the proper characteristics of the electronic circuits. The prototype, CALPAC (Calorimeter for electronic circuits), measures the heat flow through a circuit in power units. This article presents the development of the four main stages in the realization of the project. The first one is the analysis of the theoretical framework in which was justified the chosen alternative to measure heat; the second one is the design and construction of the equipment; the third one is the design and construction of the data acquisition system called the electronic model of the CALPAC; and finally, the calibration and testing of the prototype and the results. This project shows how the union of diverse areas, in this case, thermodynamics, electronics and industrial design, allows the generation of ideas and the construction of high utility equipment within the investigative framework.

KEY WORDS

Heat
Power
Electronic Circuits
Calorimeter
Heat Dissipation
Heat Measurement

INTRODUCCION

Dentro del campo de la electrónica, el estudio de las características térmicas de los circuitos ha llegado a ser de suma importancia, debido a la influencia que las altas temperaturas tienen en su comportamiento [1]. Todos los dispositivos electrónicos son diseñados para operar correctamente mientras se encuentren a ciertos rangos específicos de temperatura, por lo que es tarea del diseñador garantizar esto mediante un manejo adecuado de la energía que interviene durante su funcionamiento. Puesto que la manera de evitar incrementos de temperatura en estos dispositivos es disipando el flujo de calor generado por la potencia que consumen, en los últimos años el estudio de métodos y técnicas efectivas de disipación de calor ha tenido ocupados a muchos de los ingenieros de la rama [2].

Como resultado de esto, hoy se cuenta con diferentes tipos de dispositivos disipadores, como heat pipes, termopilas, ventiladores, aletas entre otros [3]; además, los materiales de fabricación de algunos circuitos integrados son elegidos de tal forma que tengan una alta conductividad térmica para que faciliten el flujo de calor hacia su exterior.

El comportamiento ideal de cualquier circuito, supone que su flujo calor sea igual a la potencia activa que consume, para que se cumpla así en este sistema la primera ley de la termodinámica, que establece que la energía consumida (como trabajo) debe ser igual a la liberada (como calor) mientras sea despreciable la energía cinética, potencial e interna del sistema [4], condiciones que un circuito electrónico generalmente cumple o bajo las cuales fácilmente se puede definir. Así, por ejemplo, si una carga consume 1 watt de potencia eléctrica, debe disipar 1 watt de flujo calorífico. Sin

embargo, estas condiciones ideales de equilibrio termodinámico en la práctica no se dan y el desequilibrio se manifiesta en incrementos de temperatura en los dispositivos, en algunos casos tolerables, pero en otros casos fatales. Si se conoce la potencia que un circuito consume y también el calor que disipa, entonces la diferencia dará un buen estimativo de los incrementos de temperatura que se pueden presentar y afectar a futuro el equipo y se puede caracterizar su comportamiento térmico.

La potencia activa que consume un circuito es relativamente sencilla de medir, pero ¿Cómo medir cuantitativamente su flujo de calor?. Si bien, los elevados incrementos de temperatura en los dispositivos de alguna manera avisan que la disipación de calor es deficiente, la información térmica por sí sola no permite determinar una medida exacta de flujo calorífico; para hacerlo se necesita de alguna técnica que lo mida directamente y es precisamente en eso en lo que consiste la calorimetría directa. También existen herramientas de software que permiten simular este comportamiento pero que requieren como sucede en general, una validación frente a realidad física.

1. CALORIMETRÍA DIRECTA

La calorimetría tiene como objetivo medir el calor liberado por un sistema en un determinado rango de tiempo. Se habla de calorimetría directa cuando la variable monitoreada es el calor que libera el sistema, y no cualquier otra variable diferente cuya medida permita, por medio de alguna relación física o matemática, hallar el calor liberado; en este caso se denomina calorimetría indirecta. Convencionalmente la calorimetría directa consiste en colocar el objeto a ser medido en una cámara que internamente debe estar bien aislada térmicamente (adiabática) de cualquier fuente de calor diferente al objeto, y que esté rodeada en su exterior por un fluido, también aislado térmicamente; esta cámara exterior debe disponer de un sensor para medir la temperatura, que se incrementará por causa del calor generado por radiación del objeto, por convección del aire dentro de la cámara y por conducción a través de sus paredes. Se conoce la masa del fluido, su calor específico y el gradiente de temperatura entre su estado inicial y su estado final después de cierto tiempo; de esta manera se puede cuantificar las calorías generadas por radiación, convección y conducción [5], por medio de la ecuación (1), donde Q con unidades de Julios (J) es la energía calorífica que intervino en el cambio de temperatura, T es dicho cambio y se da en grados Kelvin (K), C_p es el calor específico del fluido (J/Kg K) y m es su masa (Kg):

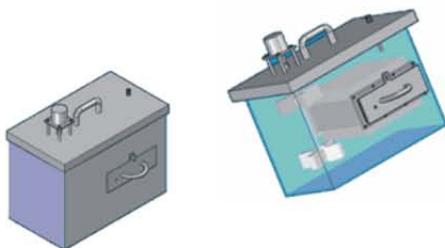
$$Q = mC_p \Delta T \quad (\text{Kg})$$

Si además se puede conocer el tiempo durante el cual se dio el cambio de temperatura, se puede hallar el flujo de calor por unidad de tiempo que sencillamente se nombra como flujo de calor a través del objeto y se da en unidades de Watts (W).

Figura 1. Diseño preliminar del calorímetro para circuitos electrónicos

Esta técnica ha sido usada en diferentes sistemas donde estimar la energía que liberan es una labor complicada; por ejemplo, se ha usado para determinar la energía metabólica de los seres humanos [6], en reacciones químicas, la energía que liberan los alimentos en combustión, etc.; obviamente con equipos diseñados de acuerdo a las características propias de cada sistema en particular. Algunas empresas se especializan en construir equipos para medición de flujo de calor, debido a la importancia que tiene esta variable en el comportamiento y caracterización de un sistema [7]; sin embargo en nuestro medio no están disponibles tales equipos. El objetivo entonces fue construir un equipo que acondicionara esta técnica a las características propias de los circuitos electrónicos.

La figura 1 muestra el diseño preliminar del calorímetro para circuitos electrónicos.



2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

2.1. DISEÑO

El circuito a medir se coloca dentro de una cámara "portacircuitos" hecha de un material con alta conductividad térmica con una puerta frontal que lo aísla térmicamente del exterior. Para alimentarlo eléctricamente los cables salen al exterior por un orificio en la puerta. El circuito comienza a disipar calor, el cual debe transferirse fuera de la cámara, pero dentro del equipo. Para ayudar a una máxima transferencia, se implementan en la cámara aletas disipadoras de calor. En el exterior de la cámara hay un recipiente, el cual es llenado de agua u otro liquido con calor específico conocido. En este diseño preliminar, las aletas disipadoras de aluminio aparecen colocadas al exterior de la cámara; sin embargo, debido a los efectos que pueda tener la convección del agua sobre ellas, y a que el calor que se interesa transferir se genera es en el interior de la cámara, en el diseño final se colocaron estas aletas en su interior, para aumentar la transferencia de calor aumentando el área superficial interna y disminuyendo la resistencia térmica por convección dentro de la caja.

Se tiene entonces un sistema de calorimetría directa similar al descrito. Durante el momento de la medición, el equipo se cierra en su parte de arriba con una tapa aislada térmicamente; además, todo el sistema debe tener también en sus paredes una gran capa de aislante, para garantizar que el calor del agua no se transfiera al exterior y tener así una medición efectiva del circuito. Para garantizar que la temperatura del agua sea homogénea, se coloco un agitador que se mueve por acción de un motor.

Toda la energía disipada en forma de calor por el circuito, va a manifestarse en un aumento de temperatura del agua, y mediante un balance de energía (ecuación (1)) se calcula de una forma cuantitativa la cantidad de energía que intervino en el proceso, y junto con el tiempo, la potencia que el circuito disipa. Esta medida sería exacta si los aislantes involucrados convirtieran al sistema en un sistema adiabático y si el material conductor de calor del cual está hecha la cámara portacircuitos, tuviera conductividad térmica infinita. Obviamente ninguna de las dos condiciones se puede cumplir en la realidad, pero se construyó el equipo para que se acercara a estas restricciones.

2.2. CONSTRUCCIÓN

En la tabla 1 aparece un resumen de las características mecánicas del equipo. La caja portacircuitos es de aluminio, material con una conductividad térmica de 237 W/mK a 240 W/mK entre 0 y 100°C.

En la figura 2-a se pueden observar las aletas disipadoras de calor, también de aluminio, en la parte interna de la cámara. Esta cámara se ajustó dentro de un recipiente de vidrio templado figura 2-b - que será el portador del agua que absorberá la energía calorífica del circuito.

El recipiente tiene capacidad de almacenar 27,9 litros de agua. Esta gran capacidad de almacenamiento permite que el calorímetro pueda servir para circuitos de elevado consumo de potencia, debido que se requiere de bastante energía para cambiar la temperatura de tanta masa de agua; pero a su vez, por la misma razón, dificulta el análisis de circuitos electrónicos de poco consumo de potencia.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de la parte mecánica del calorímetro

Nombre: Calorímetro Para Circuitos Electrónicos (CALPAC).	
Tamaño: 0.4 x 0.53 x 0.34 m.	
Volumen Total: 0.07208 m ³ .	
Capacidad de almacenamiento de Agua: 27,9 Litros.	
Tamaño máximo del circuito a analizar: 0.5 x 0.18 x 0.18 m.	
Temperatura máxima del agua: 90°C.	
Máxima capacidad de absorción de energía: 8100 K J	
Motor: 115 AC. 8.5 Watts.	
Velocidad de los agitadores: 20 RPM	
Color exterior: Blanco, pintura metalizada.	
Materiales:	
Aislantes:	Placas de asbesto cemento. Poliuretano espumado
Caja portacircuitos:	Aluminio.
Recipiente porta-fluido:	Vidrio templado.
Caja Exterior:	Metal
Agitador:	Baquelita
Orificios para entrada de cables y/o sensores: 2	
Máximo diámetro para entrada de cables: 0.01m	

Figura 2. a. Recipiente de vidrio templado b. Caja port:



(a)



(b)

Debido a que se debe garantizar que la transferencia de calor sea mínima desde el agua al exterior del equipo; el recipiente de vidrio se cubrió con tres aislantes térmicos: Asbesto, Polietileno y Poliuretano. Una cubierta de polietileno espumado cubre el recipiente de vidrio, le sigue un baño de espuma de poliuretano y finalmente placas de asbesto cemento fijan todo el conjunto a la caja exterior de metal. En la figura 3 se puede observar una vista superior de la parte aislante y el diseño por capas.

El polietileno tiene una conductividad de 0.33 W/mK , el poliuretano de 0.026 W/mK , y el asbesto de 0.09 W/mK . Las paredes laterales se pueden modelar como una pared con tres resistencias térmicas en serie, donde $R=L/kA$, siendo L el grosor de la capa en metros, k la conductividad térmica del material en W/mK y A , el área lateral de conducción de calor.

Estos mismos materiales fueron usados para aislar térmicamente la tapa frontal y superior del equipo.

Después de hacer los respectivos acabados conforme al diseño propuesto, la figura 4 muestra el aspecto final del calorímetro.

Figura 3. Capa aislante

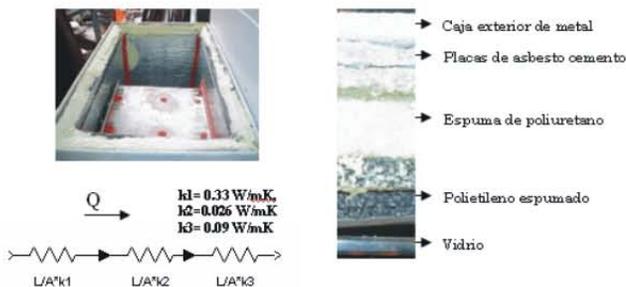


Figura 4. Aspecto final del calorímetro



2.3 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Para poder obtener la energía calorífica que el circuito disipa usando la ecuación (1), es necesario monitorear el gradiente de temperatura del agua entre su estado térmico inicial y final, para lo cual se necesitaba de un equipo electrónico que sensara con una muy alta resolución la temperatura del agua durante el proceso de medición. Como se necesitan detectar cambios mínimos de temperatura, se escogieron los termistores como los transductores de temperatura, debido a sus características de sensibilidad [8]. Estos, cambian la resistencia eléctrica de sus terminales con la temperatura.

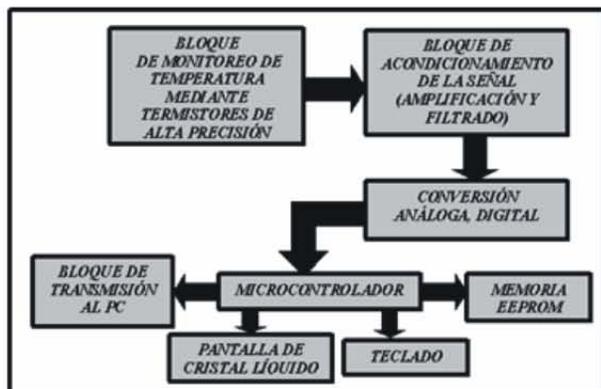
En la figura 4, se alcanza a observar en el interior la ubicación de los tres termistores dentro del equipo. Estos están a diferentes niveles de profundidad. Otro termistor se encuentra en el interior de la cámara portacircuitos para poder monitorear su temperatura ambiente.

Se diseñó un equipo electrónico que realiza el procesamiento de las señales térmicas y detecta cambios de la temperatura del agua de hasta 0.02°C . El diagrama de bloques del equipo se muestra en la figura 5. Las principales funciones del equipo son:

- Monitoreo de temperatura en tiempo real.
- Promediar los sensores habilitados.
- Almacenamiento de datos térmicos de hasta 200 muestras por sensor (o el promedio de los 3).
- Configuración de la rata de muestreo de temperatura desde 1 segundo hasta 60 minutos.
- Habilitar/deshabilitar los sensores que toman parte en la medición.
- Envío de datos al PC, ya sea por una aplicación realizada en LabView, o por otra desarrollada en el hiperterminal en tiempo real, o posterior al análisis.

La apariencia externa del equipo se muestra en la figura 6. La fuente de alimentación del equipo fue diseñada especialmente para que tenga salidas de niveles de voltaje de -15V , 15V , 12V , 8V , 5V y una variable, con el fin de alimentar los circuitos que puedan ser analizados con el calorímetro, sin necesidad de otra fuente externa independiente.

Para mayor detalle del diseño del equipo se remite al lector a la referencia [9].

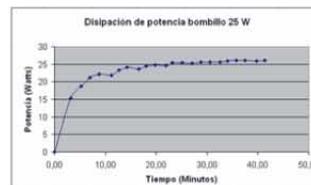
Figura 5. Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos**Figura 6. Sistema de adquisición de datos del calorímetro**

3. CALIBRACION

Para calibrarlo, se hizo una prueba con bombillos de 25W y 40W. Estos permiten calibrar el equipo debido a que están diseñados para consumir una potencia fija y a que sus características de transferencia de calor son ideales dado que más del 85% es por radiación de luz, por lo que teóricamente la rata de disipación de calor debe ser equivalente a la potencia consumida. La figura 7 muestra las curvas de potencia calorífica calculada por el calorímetro.

Los puntos de las gráficas corresponden a la potencia instantánea cada vez que el módulo electrónico detectó un incremento en la temperatura del agua. Esta potencia es el producto de la masa del agua por su calor específico y por el gradiente de temperatura desde el inicio de la prueba, dividido entre el tiempo transcurrido hasta el momento de la muestra. La prueba fue realizada con 23.5 litros de agua, que equivale a una masa de agua igual a: $996.5833 \text{ Kg/m}^3 * 0,0235 \text{ m}^3 = 23.4197 \text{ Kg}$. El calor específico del agua se tomó como 4186 J/KgK .

Las gráficas muestran que la potencia calorífica medida por el calorímetro converge a la potencia eléctrica que los bombillos consumen. El transitorio inicial corresponde al periodo en el que el bombillo cambia de 0W de potencia calorífica disipada (apagado) a su valor nominal. Si bien, el bombillo consume potencia desde el mismo momento en que se enciende, la disipación de calor llega a su máximo valor después de un tiempo. Esto sucede también con cualquier otro circuito electrónico, donde la transferencia de calor aumenta paulatinamente hasta encontrar su estado estable (tiempo mientras que los dispositivos alcanzan su máxima temperatura de operación). Los resultados obtenidos son muy satisfactorios; en la tabla 2 se muestran exactamente los valores de flujo de calor medidos, y el error con respecto a la potencia eléctrica consumida del bombillo de 40 W.

Figura 7. Curvas de potencia disipada calculadas por el equipo con bombillos de a) 25W b) 40W**Tabla 2. Tabla de mediciones de flujo de calor de un bombillo de 40 W**

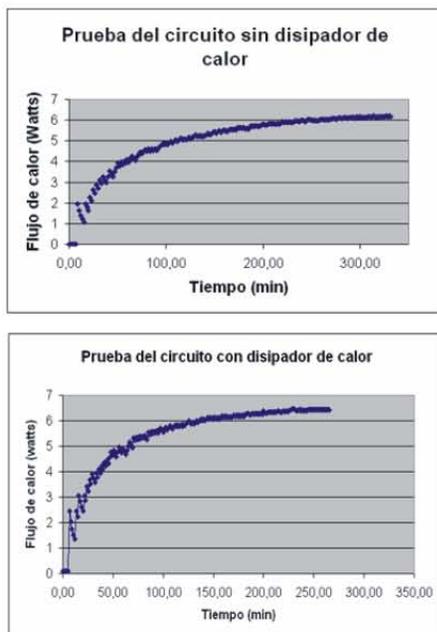
FLUJO DE CALOR MEDIDO CON EL CALORIMETRO A UN BOMBILLO DE 40 W											
Flujo de Calor (Watts)	Tiempo (Min)	Potencia Bombillo (Watts)	Error	Flujo de Calor (Watts)	Tiempo (Min)	Potencia Bombillo (Watts)	Error	Flujo de Calor (Watts)	Tiempo (Min)	Potencia Bombillo (Watts)	Error
0,00	0,00	40	100,00%	38,35	17,89	40	4,12%	40,76	33,67	40	1,90%
26,40	1,86	40	34,00%	38,13	19,28	40	4,67%	41,28	34,43	40	3,21%
27,72	3,54	40	30,71%	39,50	19,86	40	1,25%	41,49	35,45	40	3,72%
30,45	4,83	40	23,87%	39,35	21,18	40	1,63%	41,29	36,80	40	3,23%
30,56	6,42	40	23,59%	40,42	21,83	40	1,06%	41,51	37,78	40	3,78%
31,90	7,68	40	20,26%	40,05	23,26	40	0,12%	41,20	39,26	40	3,00%
33,26	8,84	40	16,86%	40,12	24,43	40	0,31%	41,41	40,25	40	3,53%
33,82	10,15	40	15,45%	39,81	25,85	40	0,46%	41,82	41,02	40	4,55%
34,94	11,22	40	12,66%	40,44	26,67	40	1,09%	41,40	42,62	40	3,51%
35,24	12,52	40	11,90%	40,61	27,76	40	1,53%	41,21	44,01	40	3,03%
36,34	13,49	40	9,16%	40,72	28,89	40	1,81%	41,78	44,58	40	4,46%
37,15	14,51	40	7,12%	41,21	29,74	40	3,03%	41,57	45,98	40	3,93%
38,67	15,21	40	3,33%	40,52	31,45	40	1,30%	41,73	46,98	40	4,34%
38,55	16,53	40	3,63%	41,31	32,04	40	3,28%				

4. PRUEBA CON UN CIRCUITO ELECTRONICO.

Finalmente se realizaron pruebas con un circuito electrónico cuya función es controlar la potencia entregada a unas resistencias calefactoras de un equipo en el laboratorio de carbones de la escuela de metalúrgica en la UIS. Este circuito controla una carga de 8A por medio de un TRIAC, cuya temperatura se aumenta considerablemente durante su operación, por lo que lleva un disipador de calor. Debido a la dificultad que implicaba llevar dicho equipo al laboratorio donde estaba el calorímetro, el circuito electrónico se desconectó, se llevó al laboratorio y se probó con una carga acondicionada que consume 6A. Con este consumo de corriente y una caída de voltaje en los terminales del TRIAC de aproximadamente 1,8 volts, la potencia que el TRIAC consume es de 10,8 Watts [10]. Las pruebas se realizaron con el TRIAC sin disipador de calor, y con disipador. La Figura 8 muestra los resultados de la potencia disipada por el circuito, donde se observa que con disipador de calor, la potencia converge más rápidamente a un valor estable y además el flujo de calor es ligeramente mayor.

También se puede observar que el valor medido en su estado estable es alrededor de 6 Watts. Dado que el circuito está consumiendo 10,8 watts de potencia, aplicando la primera ley de la termodinámica, se infiere que la energía interna del sistema es de aproximadamente 4,8 Watts, la cual se manifiesta en un incremento de temperatura considerable en el TRIAC. A diferencia de las pruebas con bombillos, el TRIAC no cuenta con una forma de disipación de calor efectiva. Mientras que un bombillo disipa calor por radiación [11], el TRIAC lo hace en mayor medida por conducción y convección, lo que hace que no se disipa totalmente la potencia consumida.

Figura 8. Curvas de potencia disipada calculadas por el equipo con un circuito electrónico



5. CONCLUSIONES

- Se diseñó un equipo que aplica los fundamentos de la calorimetría directa para el análisis energético de circuitos electrónicos.
- En la tabla 2 se puede observar que el error de medición cuando alcanza el estado estable, no sobrepasa el 5%. Se asume como referencia la potencia emitida por el bombillo de 40w.
- Al comparar el tiempo en que alcanza el estado estable la medición del equipo entre un sistema de 40 Watts (Figura 7) y uno de 6 Watts de disipación de calor (figura 8), se puede ver que entre menor sea el flujo de calor medido el equipo toma más tiempo en que la medición se estabilice. Esto es comprensible, debido a que entre menor flujo de calor haya, más tiempo se va a demorar 23,5 litros de agua en incrementar su temperatura. Se observa también una mayor pendiente (flujo de calor/tiempo) cuando existe el disipador (Figura 8).
- Hasta ahora, la calorimetría directa se había usado para medir flujo de calor en otro tipo de sistemas, como seres vivos, reacciones químicas, metabolismo, etc. Mediante este prototipo se adecuó esta técnica para ser usada en un campo específico (la electrónica), y produjo resultados satisfactorios.
- Este es un primer prototipo, el cual puede ser mejorado en futuros trabajos principalmente en lo relacionado con el desarrollo de un módulo electrónico de transmisión inalámbrica de los datos térmicos. Para una información más detallada sobre el tema, el lector se puede remitir al grupo de investigación CEMOS de la escuela de ingeniería eléctrica de la UIS y la referencia [9].

AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen al DIF de Fisicomecánicas de la Universidad Industrial de Santander por su soporte financiero.

6. REFERENCIAS

- [1] <http://www.ajou.ac.kr/mems/detail.htm>. Demand of cooling for microelectronics devices.
- [2] <http://www.iis.ee.ethz.ch/csyun/papers/Thesis/node8.html>. Why is thermal management needed?.
- [3] J. Legierski, B. Wiecek. Heat Pipe applications for effective cooling of high power electronic circuits. Institute of Electronics, Computer Thermography Group, Technical University of Lodz, Poland.
http://www.univ-reims.fr/Labos/LEO/Qirt_2000/docs/7-12Legierski.htm.
- [4] Van Wylen Gordon J., Sonntag Richard E. Fundamentos de Termodinámica. Segunda Edición. Capítulos 1-5. Editorial Limusa Wiley. 1999.
- [5] J. P. Holman. Transferencia de calor. 8° edición. Capítulos 1 y 2. Editorial Mc Graw Hill. 1998.
- [6] Isaias Martinez Sisternes. La monitorización del metabolismo. Publicación de Dantex-Ohmeda.
<http://www.dantex-ohmeda.es/default.htm>.
- [7] Thermo-netics Corporation
http://www.electriciti.com/thermo/about_tc.html.
- [8] Pallás Areny Ramon. Sensores y acondicionadores de

Señal. 3º edición. Pp. 72-83. Editorial Alfaomega marcombo. 2001.

[9] Marín A. Jeison. Análisis y medición de flujo de calor generado por un circuito electrónico. Tesis de Maestría en Ingeniería, escuela de Ingeniería Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones, 2005, UIS.

[10] Muhammad H. Rashid. Electrónica de potencia. Segunda edición. Capítulo 4. 1993.

[11]<http://www.ngasis.com/Articulos/Refrigeracion/>.Refrigeración.

