

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO PARA MEDICIÓN DE FLUJO DE CALOR APLICANDO CALORIMETRÍA DIRECTA: SENSADO POR FLUJO DE CALOR

## DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PROTOTYPE FOR MEASURING HEAT FLOW USING DIRECT CALORIMETRY: HEAT FLOW SENSING

OSCAR CADENA

*Ingeniero Electrónico, M.Sc, Universidad Industrial de Santander, oscadena@gmail.com*

RODRIGO CORREA

*Ingeniero Químico, Ph.D, Profesor titular, Grupo de Investigación CEMOS, Universidad Industrial de Santander*

Recibido para revisar Octubre 12 de 2007, aceptado Diciembre 06 de 2007, versión final Diciembre 11 de 2007

**RESUMEN:** El presente artículo describe el diseño de un prototipo inalámbrico para la medición de flujo de calor, que permita a futuro aplicar el método de calorimetría directa por gradiente de flujo de calor en el área de la electrónica médica. Esta técnica se desarrolla gracias al avance y creación de sensores que permiten medir este tipo de variables, y se postula como una alternativa a las formas de medición utilizadas actualmente, presentando mejoras en su desempeño y costo. Los resultados obtenidos luego de efectuar la calibración del equipo permiten inferir que la técnica propuesta se adapta de forma eficiente y puede utilizarse como un sustituto significativamente más ventajoso comparado con los métodos existentes en la actualidad y aplicados en el seguimiento metabólico de personas.

**PALABRAS CLAVE:** Calorimetría directa, bluetooth, Flujo de calor, Instrumentación biomédica.

**ABSTRACT:** This article describes the design of a wireless prototype which will be used for heat measurement. This prototype uses the technique known as heat flow gradient which is part of the direct calorimetry. Its immediate application will be in the area of medical electronics. The results after calibration showed that this equipment has several advantages when it is compared to similar equipments used for people metabolic studies.

**KEYWORDS:** Direct calorimetry, bluetooth, heat flow, medical instrumentation.

### 1. INTRODUCCIÓN

El propósito final de este trabajo es diseñar un prototipo que permita, a futuro, implementar una herramienta eficaz y confiable para llevar a cabo el diagnóstico y monitorización de las variaciones metabólicas en personas, medibles a partir de la cuantificación del flujo de calor[1]. Como primer paso para lograr este objetivo, es necesario diseñar un equipo que permita medir

directamente las señales de flujo de calor. Este equipo debe satisfacer criterios como: seguridad, precisión, movilidad, ergonomía y bajo costo. El montaje de este módulo es descrito en el presente artículo. Se utilizaron generadores de calor con propósitos de calibración y puesta a punto.

A continuación se explica el marco teórico que sustenta la realización del presente prototipo. Luego se hace la revisión de la metodología de

diseño criterios de selección de componentes y topologías, incluyendo al final los resultados que se obtienen durante el proceso de calibración del equipo.

## 2. MARCO TEÓRICO

En general, el planteamiento del trabajo pasa por una revisión preliminar de las diferentes técnicas de medición de flujo de calor existentes en la actualidad. Si bien existen diversas técnicas, las más relevantes y a la vez usadas, se explican a continuación:

### 2.1 Fundamentos termodinámicos

La técnica encargada de medir el flujo de calor es lo que se conoce como *calorimetría*. Esta técnica presenta diversos métodos de medición. Particularmente, cuando se hace referencia a su uso en medicina, se cuentan con los métodos descritos en la figura 1.

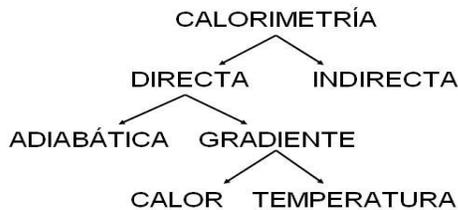


Figura 1 Tipos de calorimetría

Figure 1. Calorimetric Methods

La implementación de un sistema de calorimetría indirecta es aproximado, y además involucra el hecho de requerir un monitoreo constante de la persona[1]. El método de calorimetría directa adiabática es bastante bueno, pero implica grandes costos en la obra civil para la construcción de la cámara, así como en la compra de instrumentación analítica que permita la interpretación de las variables. Detectada la necesidad de contar con un método capaz de ofrecer una precisión aceptable, facilidad de uso y que redujera significativamente los costos, se decidió crear un equipo cuyo principio de funcionamiento fuera el método de calorimetría directa por gradiente,

enfocado al sensado de flujo de calor. En él, se aprovecha el avance en la fabricación de sensores de flujo de calor.

### 2.2 Sensor de Flujo de calor

Un sensor de flujo de calor típicamente consiste en una termopila; en algunos casos se elabora a partir de un par de termocuplas, creando una configuración de *Placas paralelas* [5]. El comportamiento del sensor responde a la ecuación (1):

$$V = \frac{(nS)L_s}{\lambda_s} q \quad (1)$$

donde:

$V$  = Tensión a la salida del sensor (V)

$n$  = Numero de termopilas del sensor

$S$  = Sensitividad de las termopilas ( $\mu V K^{-1}$ )

$L_s$  = Representa el ancho de la placa (m)

$\lambda_s$  = Conductividad térmica del material ( $W m^{-1} K^{-1}$ )

$q$  = flujo de calor ( $W m^{-2}$ )

Realizando un análisis de los anteriores datos se puede concluir que todos los valores que intervienen en dicha ecuación son parámetros físicos derivados de la construcción del sensor, siendo posible conocer de antemano sus valores; se puede concluir entonces que el sensor de flujo de calor genera una señal de tensión a la salida que es proporcional al flujo de calor que se mide.

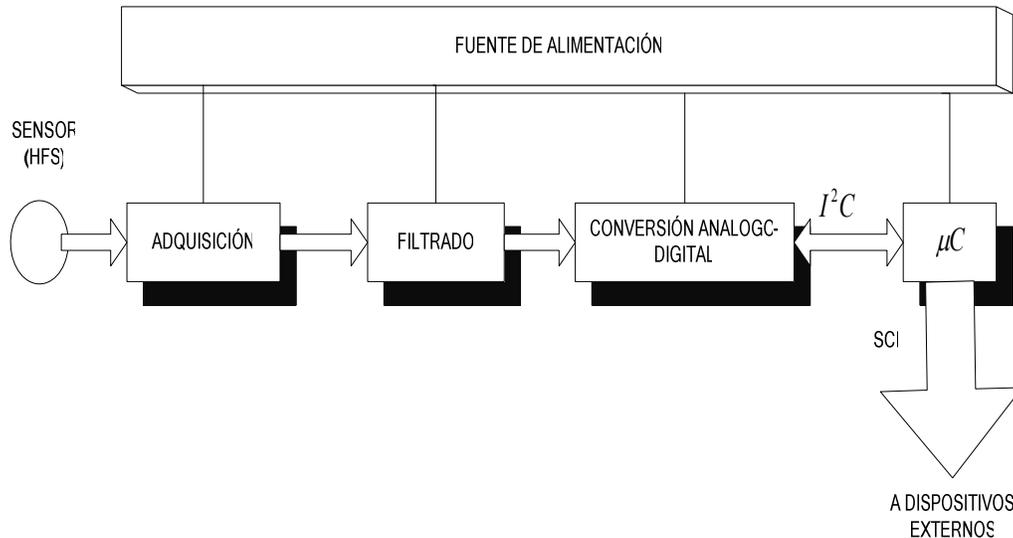
Conociendo claramente el comportamiento del sensor se puede concluir que el objetivo principal del presente trabajo consiste en el diseño y construcción de una herramienta con componente tanto software como hardware que permita adquirir procesar y visualizar la señal emitida por el sensor de flujo de calor,

cumpliendo con parámetros de funcionamiento tales como precisión, facilidad de manejo, y bajo costo.

### 3. METODOLOGIA DE DISEÑO

La metodología a seguir basa su funcionamiento en la división del sistema por etapas. Cada etapa

se encarga de mejorar el rendimiento del sistema para determinado parámetro. El diagrama de bloques se muestra en la Figura 3. El diseño en general se realiza para obtener una herramienta portátil, confiable y con gran autonomía. Como se observa se muestran cinco etapas claramente diferenciadas, las cuales se explican a continuación.



**Figura 2.** Diagrama de bloques del prototipo  
**Figure 2.** Prototype block diagram

#### 3.1 Sensado

La selección del sensor viene dada por una serie de características del cuerpo en el cual se va a utilizar pensando siempre en el objetivo último de lograr la medición en seres humanos. Es por esto que en las pruebas de calibración se usan generadores de calor controlados que emiten niveles de señal cercanos a los que se esperan obtener en personas. Teniendo esto en mente se definen las siguientes características:

- Para la presente aplicación, y basado en estudios realizados [1,6] se obtiene un umbral mínimo de trabajo dado en la ecuación (2):

$$q_{\text{mínimo}} = 29.5 * 1.1587 (Wm^{-2}) = 34.1816 (Wm^{-2}) \quad (2)$$

- El rango de trabajo viene, en general, definido para todos los sensores en función de la temperatura. Teniendo en cuenta los rangos definidos para la temperatura en el cuerpo humano[4], es posible determinar un criterio de selección que consiste en garantizar una zona de trabajo lineal comprendida entre 30 °C y 50 °C.
- Es necesario garantizar que el sensor se adapte a la geometría del cuerpo a medir, por tanto es necesario contar con flexibilidad para que permitan cierto grado de ergonomía en su uso.

- Se requiere una buena precisión para que los cambios registrados sean producto de un delta de la variable, y no de un error inherente al sensor.

Con todos los criterios anteriores se escoge el sensor fabricado por la empresa francesa CAPTEC, cuyas características se listan en la tabla 1.

**Tabla 1** Características del sensor de flujo de calor  
**Table 1.** Heat flow sensor characteristics

PARAMETRO	VALOR
Area	25 cm <sup>2</sup>
Rango de Trabajo	-180 °C hasta 200 °C
Rango De Entrada	-500 kWm <sup>-2</sup> - 500 kWm <sup>-2</sup>
Respuesta En El Tiempo	0.3 segundos
Sensibilidad	(7.5-11.5) $\mu V * (Wm^2)$ en el rango de trabajo (Lineal)

En este trabajo se utiliza un sensor con sensibilidad de  $10,7 \mu V * (Wm^2)$ , de tal forma que se trabaje con el valor medio. Este valor, unido con las herramientas computacionales descritas posteriormente ofrece una herramienta adecuada para la medición de variaciones en el flujo de calor. Tomando este valor en cuenta, y mediante pruebas de laboratorio se tienen caracterizados los niveles de salida del sensor en el rango de los cientos de  $\mu V$ , y las variaciones en las decenas de  $\mu V$ . Estos resultados imponen un reto para el diseño del resto de la topología del módulo, toda vez que hace necesario tener en cuenta una serie de consideraciones que permitan adquirir señales de esta magnitud.

### 3.2 Etapa de adquisición

Las funciones de esta etapa son: llevar la tensión recibida a un nivel aceptable, proteger la señal de interferencia y de señales de modo común. Además, dada la aplicación, se considera conveniente mover el cero de referencia[7] para diferenciar un nivel de señal cero y un cero provocado por malfuncionamiento del equipo. Las anteriores implicaciones llevan a la selección del uso de amplificadores de instrumentación encapsulados, con lo cual se logra las siguientes ventajas de funcionamiento: Alta linealidad y precisión en la ganancia, alto factor de rechazo en modo común CMRR, alto factor de rechazo a variaciones de la Fuente (PSRR), y finalmente bajo consumo de potencia. Todas estas características unidas contribuyen a los criterios generales de diseño expuestos anteriormente. La configuración seleccionada expresa su ganancia por medio de la ecuación 3. En el equipo, el valor de ganancia se fija en 105 V/V, con la que es posible llevar la señal a niveles de decenas de mV. Si bien este valor puede parecer bajo, es necesario tener en mente que ajustar un valor mas grande de ganancia amplifica tanto la señal como el ruido, por ende puede verse comprometida la integridad de la señal.

$$A_v = 5 + \frac{200K\Omega}{R_g} \quad (3)$$

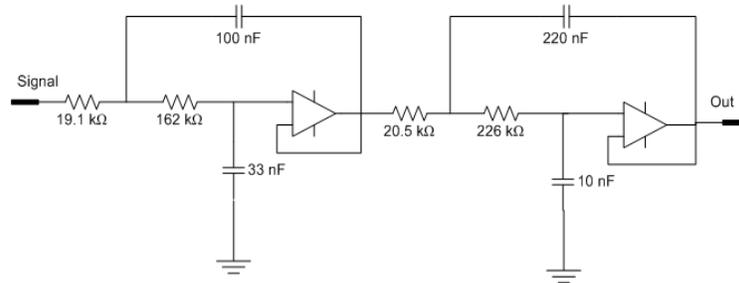
Finalmente se decide ajustar el offset a un valor que permita un amplio rango de excursión a la señal de flujo de calor. Este valor se fija en 1.47 V, permitiendo la máxima excursión de señal posible gracias a que el amplificador seleccionado permite variaciones hasta niveles cercanos al valor de alimentación.

### 3.3 Etapa De Filtrado

Una vez se lleva a cabo la recepción de la señal en la etapa anterior es necesario liberarla al máximo de posibles interferencias externas y ruido presente. Como la señal de flujo de calor trabaja en el rango de bajas frecuencias se

decide implementar un filtro pasabajas de cuarto orden con configuración *Sallen Key*. El parámetro de frecuencia de corte se definió de tal forma que permita el paso de la señal de interés, que se encuentra en la banda de 0 a 10 Hz, y a su vez atenuar el ruido de 60 Hz, presente en cualquier dispositivo electrónico.

Este ruido se presenta debido a la red eléctrica con la que trabajan los aparatos, y si bien el equipo evita ese problema al usar baterías como fuente de alimentación, es posible que funcione en un entorno en el cual el ruido de 60 Hz sea perceptible. La Topología seleccionada es la mostrada en la Figura 4.



**Figura 3** Topología filtro pasabajas

**Figure 3.** Low pass filter topology

Las pruebas de laboratorio arrojan los resultados de la relación salida/entrada cuando se varía la frecuencia de la señal de entrada. Estos resultados muestran una frecuencia de corte 52 Hz, acorde con los criterios de diseño planteados.

### 3.4 Conversión análoga digital

Teniendo en cuenta que el equipo esta pensado para estar en capacidad de interconectarse con un PC de manera inalámbrica y llevar a cabo la visualización de las mediciones realizadas, se hace manifiesta la necesidad de realizar la digitalización de la señal, de tal forma que la misma pueda ser almacenada y posteriormente procesada matemáticamente, ya sea con el fin de visualizar las mediciones obtenidas de flujo de calor o indirectamente la potencia emitida por los equipos de calibración.

Las especificaciones que se tienen en cuenta para el desarrollo de esta etapa son las siguientes:

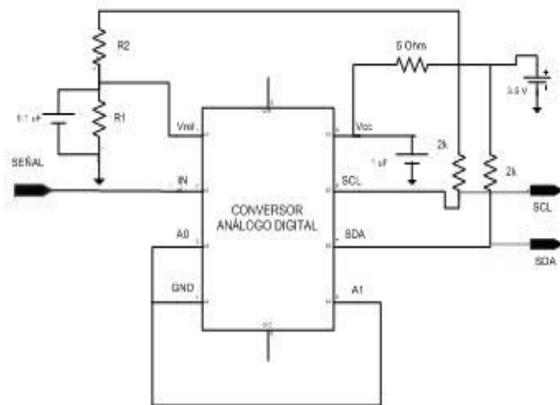
- *Resolución:* Para la aplicación se escoge una resolución de 12. Expresada en porcentaje, se obtiene mediante la ecuación (4).

$$\text{resolución} = \frac{1}{2^{12} - 1} * 100\% = 0.02442\% \quad (4)$$

- *Método de conversión:* Se escoge un conversor que utilice el método por aproximaciones sucesivas (SAR), puesto que tiene un tiempo de conversión mucho menor que otros métodos, y además, dicho tiempo es fijo para cualquier valor de entrada analógica [8].
- *Velocidad de Muestreo:* Intermedia, basado en la premisa de que debido a la naturaleza de la señal, los cambios no se presentan de manera abrupta. El valor a utilizar es de 50 kHz.
- *Posibilidad de expansión:* Es necesario garantizar que el equipo sea compatible tanto para el intercambio de datos con un computador como con dispositivos electrónicos similares. El protocolo a utilizar es el  $I^2C$  [9], que tiene como principales ventajas muy bajo consumo de corriente y alta inmunidad al ruido.

Una vez se selecciona el conversor[11] con los parámetros delimitados anteriormente, se

procede al montaje del circuito correspondiente a partir del diagrama mostrado en la Figura 4.



**Figura 4** Circuito de conexión del convertor análogo digital.

**Figure 4.** Circuitual connection of the A/D converter

Esta topología es diseñada para un voltaje de referencia de 2.5 V, con lo cual el valor del Bit menos significativo es de:

$$LSB = \frac{V_{Ref}}{4095Bit} = 0.6105mV \quad (5)$$

Este valor, con relación directa a la señal del sensor representa un nivel de 6,105  $\mu V$ . En pruebas de laboratorio, el error presentado es, en promedio, de tres LSB. Este es un resultado bastante aceptable, ya que, en función de la señal medida, y teniendo en cuenta la ganancia que se introduce en la primera etapa representa un valor real de aproximadamente 18,31  $\mu V$ , bastante bajo, al punto de ser considerado despreciable en la presente aplicación.

### 3.5 Microcontrolador y funciones

Una vez realizada la conversión es necesario definir las tareas que hacen falta por cumplir en el diseño:

- Realizar la recepción de los datos provenientes de la etapa de conversión análoga digital.

- Proveer el acople con el sistema de comunicación inalámbrica.

Las anteriores funciones son cumplidas en su totalidad por el microcontrolador. La primera función la hace por medio de la implementación del protocolo  $I^2C$ , la última se soluciona realizando la programación del protocolo SCI. Con ello la conexión al computador se realiza por medio de módulos de comunicación bluetooth.

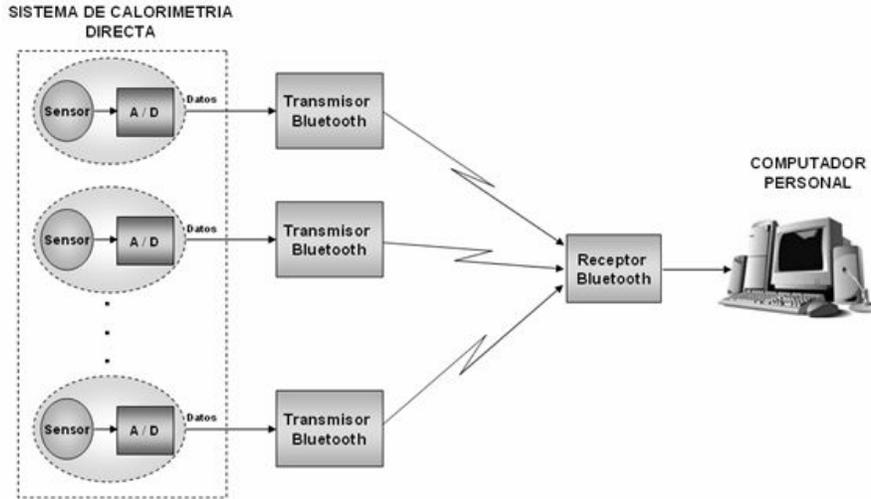
El sistema completo es configurado para trabajar a 9600 Bauds, con un bajo consumo de potencia y una autonomía aproximada de 8 horas, trabajando con una batería recargable protegida contra cortocircuitos con el fin de hacer mas seguro el diseño para su futuro uso en personas. Al momento de realizar medidas con el equipo se logra adquirir un mínimo de señal de 12  $\mu V$ , valor acorde con los resultados esperados para realizar una futura aplicación en pacientes.

### 3.6 Sistema de comunicación

Un componente fundamental en el funcionamiento del equipo es el sistema de comunicación del mismo. LA exploración de diferentes opciones lleva a remitir su uso al cumplimiento de uno de los requerimientos básicos: Versatilidad. El uso de comunicaciones cableadas presenta un inconveniente de tipo ergonómico en el funcionamiento del módulo. Con esto en mente se escoge un sistema de comunicación inalámbrica seguro y asequible. La búsqueda y selección lleva al uso de equipos que trabajan sobre la plataforma Bluetooth.

Otro punto importante a tener en cuenta en esta etapa es la necesidad de crear la opción de una conexión simultánea de múltiples equipos de medición de flujo de calor. Para permitir esta característica se diseña una red con la topología mostrada en la figura 5.

Las pruebas realizadas demostraron la posibilidad de conectar hasta un máximo de seis módulos. Sin embargo, para este trabajo se pusieron en funcionamiento de manera simultánea tres módulos



**Figura 5.** Topología de red de comunicación implementada  
**Figure 5.** Communications network topology

**3.7 Programa de visualización**

El software de visualización se realiza con el objetivo de proveer al proyecto de una herramienta que facilite la interacción con el usuario, así como la calibración del equipo y la visualización y manipulación de los datos obtenidos de las etapas anteriores del proyecto.

El software en mención está realizado mediante la herramienta LabView. Los cálculos realizados para recuperar la señal adquirida por el sensor, se describen a continuación. Primero, se multiplica la señal recibida por el rango de muestreo y luego se divide en 4095 niveles (que corresponden a  $2^{12} - 1$ ). Seguidamente, se le resta el valor de referencia utilizado en el amplificador de instrumentación (1,5) y se divide en la ganancia del módulo de adquisición de la señal (106). En este punto ya se tiene recuperada la señal original arrojada por el sensor, en microvotls.

Los cálculos de flujo de calor y potencia son realizados por el programa. Cabe aclarar, que con este sistema solo se considera un dato válido para ser visualizado aquel que tenga un indicador de sensor igualmente válido. Esta característica permite identificar y eliminar

errores que se presentan en la etapa de comunicación. La interfaz final es la mostrada en la Figura 6.



**Figura 6** Interfaz de visualización en LABVIEW  
**Figure 6.** LABVIEW user interface

**3.8 Pruebas realizadas**

Para el desarrollo de las pruebas de calibración y puesta a punto del equipo se cuenta con generadores controlados de calor[12]. Si se tiene en cuenta que los bombillos de tungsteno transforman casi en su totalidad la potencia

eléctrica que consumen en calor, es posible utilizar estos aparatos para realizar la calibración.

Se toman diferentes valores de potencia suministrada al bombillo. Esto produce una tensión a la salida del sensor, con este valor es posible deducir el flujo de calor mediante la formula dada en (4-1).

$$q = \frac{V_{in}}{S} \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad (7)$$

Donde:

$$S = \text{Sensibilidad del Sensor } \mu V / \left( \frac{W}{m^2} \right)$$

$$V_{in} = \text{Tensión Arrojada en el Sensor (V)}$$

En este punto es necesario tener en cuenta un aspecto fundamental. Tomando como referente que las pruebas de calibración se realizan sin entrar en contacto directo con la superficie, es de esperarse que el flujo de calor medido no corresponda en su totalidad al emitido por el generador de calor. Estos dos valores se encuentran directamente relacionados entre si por medio de la constante de emisividad, de acuerdo a la relación expresada en la ecuación (8). Este valor de emisividad, para los sensores que se utilizan en la presente aplicación viene definido por el fabricante y es de 0.48.

$$q_{incidente} = \varepsilon * q_{Total} \quad (8)$$

Donde:

$$q_{incidente} = \text{Flujo incidente en el sensor } \left( \frac{W}{m^2} \right)$$

$\varepsilon$  = Emisividad

$$q_{total} = \text{Flujo de calor total } \left( \frac{W}{m^2} \right)$$

Una vez se tiene calculado el valor de flujo de calor total, se procede a calcular el valor de la potencia registrada, a fin de realizar análisis comparativo respecto a la potencia suministrada al generador. La ecuación que describe el comportamiento de la potencia en función del flujo de calor, es la dada en (9).

$$W = q_{total} * A \quad (W) \quad (9)$$

A continuación se muestran los resultados obtenidos para las pruebas realizadas:

#### Prueba Uno

Potencia Del Generador: 0,7877 (W)

Duración de la Prueba: 35 minutos

Potencia final medida: 0,75539 (W)

$$Error = 1 - \frac{0,75539(W)}{0,7877(W)} = 0,0427 = 4,27\%$$

#### Prueba Dos

Potencia Del Generador: 1,2253 (W)

Duración de la Prueba: 36 minutos

Potencia final medida: 1,2027 (W)

$$Error = 1 - \frac{1,2027(W)}{1,2253(W)} = 0,0295 = 2,95\%$$

#### Prueba Tres

Potencia Del Generador: 1,5689 (W)

Duración de la Prueba: 32 minutos

Potencia final medida: 1,5375 (W)

$$Error = 1 - \frac{1,5375(W)}{1,5689(W)} = 0,0286 = 2,86\%$$

Estos errores pueden considerarse manejables dado la variable medida y las variaciones esperadas en la futura aplicación.

#### Dispositivo final y especificaciones

A continuación se muestra el resultado final del diseño, junto con la tabla de especificaciones del circuito:



**Figura 7.** Dispositivo final  
**Figure 7.** Final dispositive

**Tabla 2:** Especificaciones del Hardware de adquisición de flujo de calor  
**Table 2:** Hardware specifications

ESPECIFICACIÓN	VALOR
Dimensiones	5cm*6cm*1,2cm
Alimentación	3,7 V
Autonomía	9 horas*-100 Horas
Posibilidad Expansión	Si
Rango de señales de adquisición	0-10 mV*
Error	3% aprox.
Precio	\$3'000.000

#### 4. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en las pruebas de calibración inferimos que es posible utilizar este prototipo para la medición de variaciones de flujo de calor en seres humanos, pasando por un trabajo previo de adecuación del sistema a los materiales que se utilizan a las condiciones higiénicas especificadas para dichas mediciones.

La fortaleza del presente proyecto se basa en la apropiación de tecnologías desarrolladas para diversas aplicaciones. El desarrollo de un sistema con componente hardware y software suficientemente robusto para permitir la medición de variaciones de flujo de calor con el sensor utilizado y sus correspondientes características físicas, consideramos representa un avance en el desarrollo de equipos de instrumentación biomédica y de paso permite pensar, a futuro, en el desarrollo de una metodología válida de diagnóstico de variaciones metabólicas, con la misma o mejor precisión de los métodos existentes pero a un costo significativamente menor; todo basado en la utilización del equipo diseñado. Este trabajo se viene desarrollando actualmente.

#### REFERENCIAS

[1] BARD, PHILLIP, Fisiología Médica. Prensa Libre Mexicana, 1966.

[2] GUYTON, ARTHUR C. Fisiología y Fisiopatologías Básicas. 10ª ED. McGraw-Hill, 2000.

[3] VAN WYLEN, GORDON. Fundamentos de termodinámica, 2º edición. 1993.

[4] ORTIZ J, ALVARO. VALDERRAMA G, LEON. Diseño y construcción De Un Prototipo Para la Medición De Flujo De Calor En Pacientes En Estado Post-Operatorio Mediante Calorimetría Directa: Método De Sensado Por Temperatura. Tesis de Grado, UIS 2006.

[5] VAN DER GRAAF, f. Sensors, Heat flux sensor, Volumen 4, capítulo 8, Editorial VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1989.

[6] VATELL CORPORATION, Heat Flux Unit Conversion Table, Vatel Corp.2005

[7] RONCANCIO, RAFAEL. Instrumentación Electrónica. Universidad industrial de Santander.

[8] FLOYD, THOMAS L. Fundamentos de Sistemas Digitales 7º Edición. Prentice Hall, 2003.

[9] PHILIPS, SEMICONDUCTOR. The I<sup>2</sup>C Bus And How To Use It (Include Specifications), Philips Semiconductor, 1995.

[10] TEXAS INSTRUMENTS. 12-Bit, Sampling A/D Converter UIT I<sup>2</sup>C Interface, ADS7823 Datasheet. Texas Instruments Incorporated, 2003.

[11] MOTOROLA, SEMICONDUCTOR. M68HC08 Microcontrollers, Motorola Semiconductor, 2002.

[12] MARIN, JEISON. Análisis y Medición Del Flujo De Calor Generado En Un Circuito Electrónico. Tesis de Maestría, Universidad Industrial De Santander, 2005.