

ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DEL CPU DE UNA COMPUTADORA EMBEBIDA POR MEDIO DE UNA CELDA PELTIER

Víctor Daniel Tejeda Mejía

Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME Culhuacán

vdaniel1925@gmail.com

Miguel Ángel Olivares Robles

Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME Culhuacán

molivares@ipn.mx

Pedro Guevara López

Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME Culhuacán

pguevara@real-time.com.mx

Resumen

En este trabajo se estudia una propuesta experimental para enfriar el CPU de una computadora embebida utilizando un sistema de enfriamiento Peltier, se incluye el modelo matemático para determinar la temperatura del CPU. Se tomaron periódicamente valores de la temperatura del CPU para diferentes porcentajes de carga computacional. Esta carga se midió a través de los tiempos de ejecución de algoritmos que ejecutaba una división varios millones de veces. El banco de prueba consistió de una computadora embebida “*Raspberry Pi 3®*” con el sistema operativo de tiempo real RT-Linux, un disipador de calor y un módulo Peltier. En este caso, el tiempo de ejecución de un proceso es el factor más importante a tener en consideración, ya que si este sobrepasa un plazo máximo establecido, el sistema en tiempo real habrá fallado.

Se comparan las temperaturas del CPU con, y sin enfriamiento cuando se ejecuta un algoritmo que varía la carga del CPU. Con el sistema de enfriamiento Peltier activo fue posible disminuir la temperatura del CPU alcanzando una diferencia de

temperaturas promedio de 30 °C. También se compararon las lecturas de temperatura reportadas por el sistema operativo, con respecto a la temperatura reportada por un sensor lm35 calibrado y se encontró una diferencia entre ambas lecturas de aproximadamente 10 °C.

Palabras Claves: Celda Peltier, computadora embebida, uso de CPU, temperatura, tiempos de ejecución.

Abstract

In this paper we study an experimental proposal to cool the CPU of a computer using a cooling system. The film includes the mathematical model for determining the temperature of the CPU. The values of the temperature of the CPU were taken periodically for the different percentages of computational load. This load was measured through the execution times of algorithms that throw a division several million times. The test bench consisted of a Pi Sink computer 3 with the RT-Linux real-time system, a heat dispenser and a Peltier module. In this case, the execution time of a process is the most important factor to take into account, since it exceeds a maximum period established, the system in real time will have failed. It compares CPU temperatures with, and without cooling when running an algorithm that varies CPU load. With the cooling system. The operation of the CPU temperature energy reached the temperature difference of 30 °C. It was also compared the temperature tests reported by the operating system, with respect to the temperature reported by a calibrated lm35 sensor And A difference between two readings of about 10 °C was found.

Keywords: CPU usage, embedded computer, execution times, Peltier cell, temperature.

1. Introducción

En los últimos años se han desarrollado dispositivos electrónicos que utilizan computadoras embebidas o empotradas tales como televisores, celulares o consolas de video juegos. Un sistema empotrado se define como una combinación de circuitos de computadoras y software que se integran en un producto con unes

tales como el control, vigilancia y la comunicación sin intervención humana [Linux, 2015]. Un sistema embebido o empotrado es un término asociado a los circuitos electrónicos que contienen diferentes componentes o sub circuitos encapsulados en un solo dispositivo [Cano, 2015]. Así, estas computadoras que pueden ser del tamaño de una tarjeta de crédito han sido utilizadas en sistemas críticos o en sistemas en tiempo real para proyectos escolares y de investigación, debido a su precio accesible y a la gran versatilidad en las aplicaciones de las mismas.

Los sistemas en tiempo real son comúnmente confundidos como sistemas rápidos o instantáneos, esto es erróneo, un sistema en tiempo real debe entregar respuestas correctas en plazos temporales impuestos por el mundo real [Medel, 2007]. Por esto, para cumplir con dichos plazos, que dependiendo el sistema pueden llegar a ser del orden de 1 ms, se ocupan técnicas como overclocking. Esta técnica consiste básicamente en aumentar la frecuencia de operación el procesador para disminuir los tiempos de ejecución. Sin embargo, la técnica de overclocking aumenta el consumo de energía de la computadora y por lo tanto aumenta la temperatura del procesador alcanzando límites peligrosos cercanos a los 80 °C, ocasionando inestabilidad computacional y daño permanente en el equipo. Por lo tanto, es necesario e incluso indispensable el uso de un sistema de enfriamiento para el CPU.

En [Rohou, 2015], se propone un método para enfriar el procesador de una estación de trabajo que ejecuta varios procesos a la vez, el algoritmo que implementaron consiste básicamente en periódicamente identificar el “*hot Process*” es decir, que proceso o tarea está consumiendo la mayor cantidad de recursos del procesador y provocan que el porcentaje de uso de CPU y la temperatura del procesador aumenten. Una vez que se han identificado estos procesos, el algoritmo automáticamente disminuye los recursos que el procesador les está otorgando, esto con la finalidad de disminuir el porcentaje de carga del CPU y a su vez evitar que sobrepase una temperatura de referencia propuesta por el programador.

Si bien, el algoritmo implementado logro que el procesador no sobrepasara la temperatura de referencia, y con la gran ventaja de no utilizar ningún sistema de

enfriamiento externo, este algoritmo sería imposible de implementar en aplicaciones en tiempo real, ya que como se comentó anteriormente, en un sistema en tiempo real el proceso tiene la máxima prioridad y disminuir los recursos del procesador implicaría un aumento en sus tiempos de ejecución, por lo cual el STR habrá fallado.

En este trabajo se propone un sistema de enfriamiento Peltier y se supervisa la temperatura del CPU a diferente carga computacional. El porcentaje del uso de CPU se calcula mediante los tiempos de ejecución programando un algoritmo en la computadora y midiendo el tiempo que toma al procesador ejecutar dicho algoritmo.

En la figura 1, $l_{i,k}$ representa el tiempo de arribo, es decir el tiempo en que el proceso solicita recursos al procesador, $S_{i,k}$ representa el tiempo en el que el procesador comienza a atender tal proceso (idealmente se considera que $S_{i,k} = l_{i,k}$), $f_{i,k}$ representa el tiempo en que el procesador termina de ejecutar el proceso [Medel, 2007].

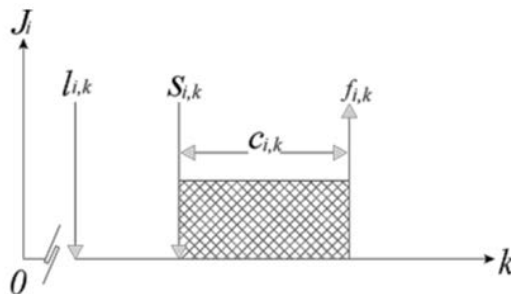


Figura 1 Representación de tiempos de arribo, inicio, ejecución y finalizado del algoritmo.

Por lo tanto, $C_{i,k} = f_{i,k} - S_{i,k}$, donde $C_{i,k}$ es el tiempo en que el procesador tarda en ejecutar la tarea. En este trabajo:

- Se establece un plazo máximo de 1000 ms, es decir, el procesador tiene máximo un segundo para ejecutar la tarea, por lo que el porcentaje de uso de CPU está dado por ecuación 1.

$$U_{cpu} = \frac{C_k}{l_{k+1}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

- Se propone un algoritmo que cambie el uso de CPU desde un 100% hasta aproximadamente un 4% por medio de una división entre números que se

realiza varios millones de veces, (c) la supervisión de la temperatura interna del CPU, (d) la reconstrucción de la temperatura interna del procesador de una computadora embebida, que consiste en obtener la función que describa el comportamiento de su temperatura interna de acuerdo al porcentaje de carga del CPU y finalmente, (e) se propone un modelo termodinámico que incluye el calor absorbido por la celda Peltier.

Recientemente, se han comparado diferentes sistemas de enfriamiento del CPU [Morelos, 2015], para la misma computadora embebida considerada en este trabajo, tales como disipador de aluminio con ventilador, disipador de cobre con ventilador etc. En el presente trabajo se muestra que hay algunos errores en la referencia [Morelos, 2015]. Los resultados correctos se proporcionan para tener un mejor entendimiento del desempeño de sistemas de enfriamiento termoeléctricos reales. Finalmente, los resultados experimentales de este trabajo muestran que la temperatura del CPU, que depende proporcionalmente del uso del mismo, disminuye aproximadamente 30 °C con el sistema de enfriamiento Peltier propuesto.

2. Métodos

Sensado de la Temperatura Interna del Procesador

La computadora embebida que se utilizó es una *Raspberry Pi*®, que funciona bajo el sistema operativo Raspbian Jessie®. Este sistema operativo a través de la función `System ()` y la instrucción `vcgencmd measure_temp` permite obtener la temperatura interna del CPU. Se realizó un código en lenguaje C con esta instrucción y por medio de un temporizador en tiempo real se obtuvo el valor de temperatura para cada instancia, que se almacena en un archivo de texto para graficar posteriormente.

Algoritmo para Variar el Porcentaje de Uso de CPU

Para generar carga en el CPU, el tiempo total del experimento se dividió en 4 partes y se elaboró un programa en lenguaje C. Para el primer intervalo de tiempo,

el CPU se programó para realizar una división 13 millones de veces, para el segundo intervalo se programó para resolverla 6 millones de veces, en el tercer intervalo 3 millones y por último para el cuarto intervalo 1 millón de veces. En cada caso, y empleando la función `clock_gettime(CLOCK_REALTIME)`, se midieron los tiempos de inicio y tiempo de finalizado para calcular el tiempo de ejecución. Los datos se almacenaron en un archivo de texto para su futura representación en gráficas.

Modelo Termodinámico

El sistema de enfriamiento utilizó la celda TEC1-12706 con las especificaciones proporcionadas por el fabricante, ver figura 2.

Performance Specifications

Hot Side Temperature (°C)	25° C	50° C
Qmax (Watts)	50	57
Delta Tmax (°C)	66	75
I _{max} (Amps)	6.4	6.4
V _{max} (Volts)	14.4	16.4
Module Resistance (Ohms)	1.98	2.30



Figura 2 Especificaciones otorgadas por el fabricante.

La ecuación 2 describe el comportamiento del calor generado por la cara caliente del módulo y que debe ser disipado.

$$\dot{Q}_c = \alpha T_c I \quad (2)$$

Donde, α es el coeficiente Seebeck del material termoeléctrico utilizado en el módulo Peltier, T_c , es la temperatura de la cara caliente del módulo e I es la corriente eléctrica que fluye por el modulo.

Así mismo, el calor absorbido por la cara fría, \dot{Q}_{absF} , del módulo Peltier está dado por la ecuación 3.

$$\dot{Q}_{absF} = \alpha T_f I \quad (3)$$

Donde α es el coeficiente Seebeck del material termoeléctrico utilizado en el módulo Peltier, T_f , es la temperatura de la cara fría del módulo e I es la corriente eléctrica que fluye por el módulo.

En el módulo Peltier, como cualquier otro dispositivo electrónico, tiene pérdidas por efecto Joule. El calor de Joule, \dot{Q}_J , generado está dado por la ecuación 4.

$$\dot{Q}_J = I^2 R \quad (4)$$

Donde R es la resistencia eléctrica del módulo proporcionada por el fabricante e I es la corriente que circula por módulo.

El módulo absorbe calor por la cara fría y lo disipa por la cara caliente, por lo que se produce una diferencia de temperaturas, $\Delta T = T_c - T_f$, entre ambas caras. Al existir ΔT naturalmente se produce un flujo de calor por conducción entre las caras determinado por la ley de Fourier. En este trabajo se expresa el calor conducido entre las caras por medio de resistencias térmicas como se muestra en la ecuación 5.

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{T_c - T_f}{R_{pelt}} \quad (5)$$

Como es usual, se supone que el calor de joule se divide en partes iguales entre ambas caras. Así, el calor rechazado por la cara caliente del módulo, \dot{Q}_C , está dado por la ecuación 6.

$$\dot{Q}_C = \alpha T_c I + \frac{1}{2} i^2 R - \frac{T_c - T_f}{R_{pelt}} \quad (6)$$

Mientras que el calor absorbido por el módulo en su cara fría, \dot{Q}_{absF} , está definido por la ecuación 7.

$$\dot{Q}_{absF} = \alpha T_f I - \frac{1}{2} i^2 R - \frac{T_c - T_f}{R_{pelt}} \quad (7)$$

Usando la primera ley de la termodinámica, se puede expresar que la diferencia del calor rechazado y absorbido es igual a la potencia eléctrica que se suministra al módulo Peltier, P_e , y se expresa en la ecuación 8 y 9.

$$P_e = \dot{Q}_C - \dot{Q}_{absF} \quad (8)$$

$$P_e = \left(\alpha T_c I + \frac{1}{2} i^2 R - \frac{T_c - T_f}{R_{pelt}} \right) - \left(\alpha T_f I - \frac{1}{2} i^2 R - \frac{T_c - T_f}{R_{pelt}} \right) \quad (9)$$

La ecuación anterior se reduce a ecuación 10.

$$P_e = \alpha i \Delta T + i^2 R \quad (10)$$

Suponiendo que el calor absorbido por la cara fría del módulo Peltier es igual al calor conducido por el disipador de cobre se tiene la ecuación 11.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{absF} &= \dot{Q}_{condCu} \\ \alpha T_f I - \frac{1}{2} i^2 R - \frac{T_c - T_f}{R_{Pelt}} &= \frac{T_{CPU} - T_f}{R_{Cu}} \end{aligned} \quad (11)$$

Entonces,

$$T_{CPU} = \left(\alpha T_f I - \frac{1}{2} i^2 R - \frac{T_c - T_f}{R_{Pelt}} \right) * R_{Cu} + T_f \quad (12)$$

Donde

T_{CPU} Temperatura de superficie del CPU.

R_{Cu} Resistencia térmica del cobre.

Banco de Pruebas y Experimentación

El tiempo total del experimento fue de aproximadamente 13 horas, y se obtuvo un valor para la temperatura por cada segundo, tomando un total de 50,000 muestras. En la figura 3 se muestra un esquema del banco de pruebas que consta de: un disipador de calor formado por 25 láminas de aluminio y un ventilador de 50mm. El disipador hace contacto con la cara caliente del módulo Peltier con el propósito de disipar el calor generado. Por otro lado, en el CPU se colocó un bloque de cobre de 15mmX15mmX10mm con el fin de conducir el calor que absorbe la celda Peltier. Consistente con la hipótesis para obtener la ecuación (12), el bloque de cobre es aislado con algodón con el propósito de evitar fuga de calor y evitar la condensación de vapor que se produce en la celda.

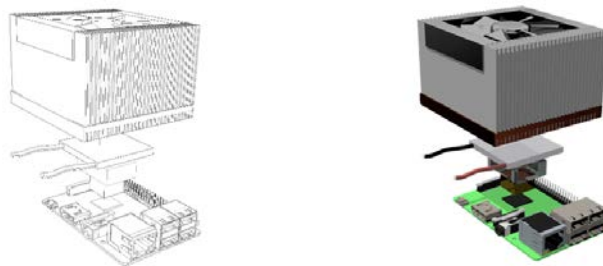


Figura 3 Esquema del banco de pruebas construido.

3. Resultados

La figura 4 muestra el comportamiento de la temperatura en términos de los tiempos de ejecución y claramente se observa que el uso del CPU directamente proporcional a la temperatura interna del mismo.

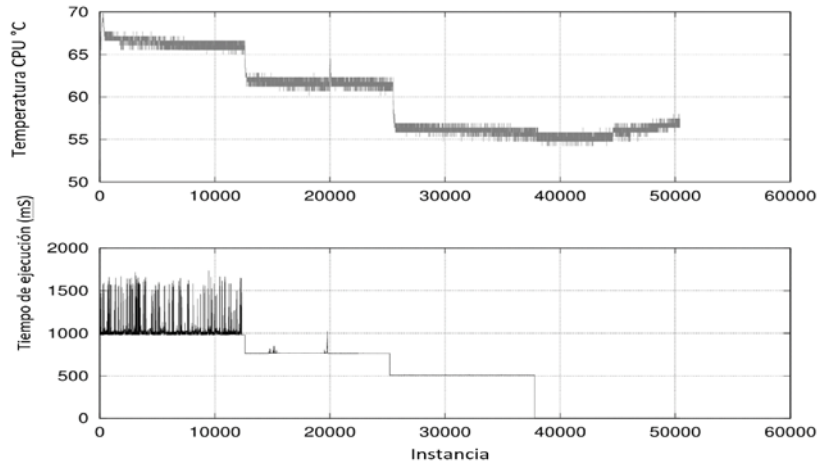


Figura 4 Gráfica de temperatura y tiempos de ejecución.

Considerando este último hecho, se propuso reconstruir la temperatura interna del utilizando la ecuación $y = ax + b$ donde a es un factor de escala. Por lo tanto reescribiendo la ecuación de la recta se obtiene ecuación 13.

$$T_{CPU} = a * U_{cpu} + b \quad (13)$$

Donde a es un factor de escala dependiente del U_{cpu} , U_{cpu} es el porcentaje de carga del CPU y b es un valor constante descritos posteriormente en la ecuación 15.

Con los datos adquiridos se obtiene la figura 5. Esta última figura muestra que a no es exactamente un factor de escala proporcional. Por lo que se determinó cómo es que el factor de escala variaba con respecto al uso del CPU.

Por medio de un ajuste polinomial de los datos y empleando el software Excel, se determinó la función que describe al factor de escala a , que está dado por el polinomio en U_{cpu} de 3 orden, ecuaciones 14 y 15.

$$a = -7 \times 10^{-6} U_{cpu}^3 + 0.0017 U_{cpu}^2 - 0.1419 U_{cpu} + 4.82 \quad (14)$$

$$T_{cpu} = aU_{cpu} + b \quad b = \begin{cases} 55 & \text{si } U_{cpu} \geq 20 \\ 0 & \text{si } U_{cpu} \leq 20 \end{cases} \quad (15)$$

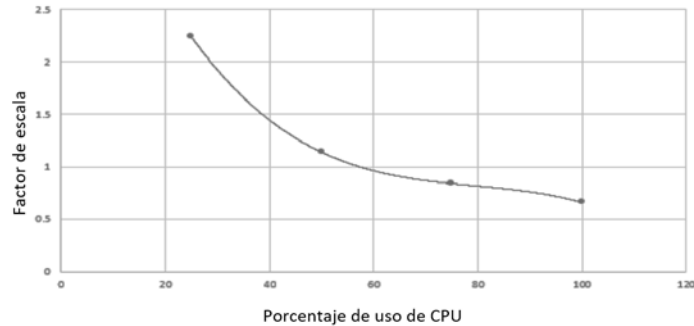


Figura 5 Gráfica del factor de escala con respecto al uso de CPU.

Posteriormente se ejecutó el mismo algoritmo que genera la carga computacional pero ahora utilizando el sistema de refrigeración Peltier con el fin de enfriar al CPU. Cabe destacar que el sistema de enfriamiento empezó a operar aproximadamente 10 minutos después de haber iniciado el algoritmo que genera carga computacional. La figura 6 muestra el comportamiento de la temperatura del CPU con y sin sistema de enfriamiento. Nótese se obtiene una diferencia de temperatura de aproximadamente 30 °C cuando el sistema de enfriamiento esta encendido.

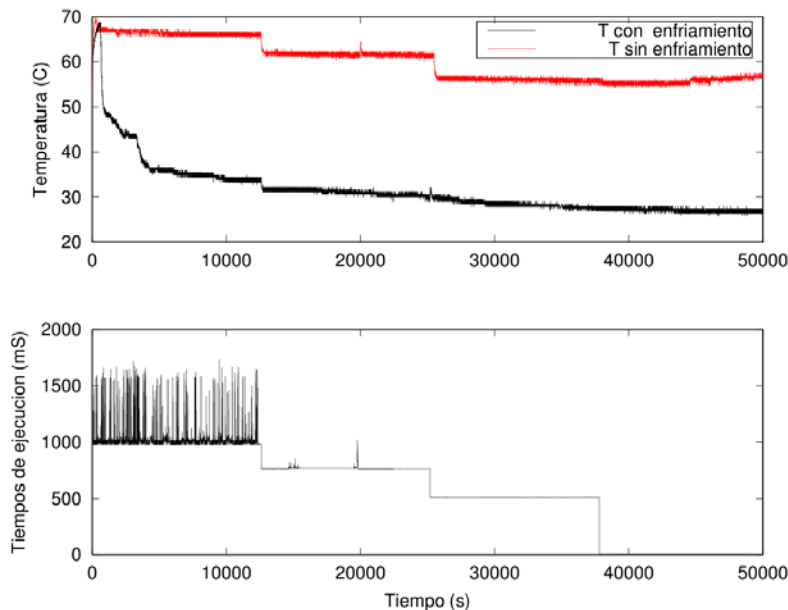


Figura 6 Gráfica de temperatura y tiempos de ejecución.

La figura 7, muestra la temperatura del CPU usando un sensor analógico Im35, y se compara con los datos reportados por el sistema operativo mediante la instrucción `vcgencmd measure_temp`. En esta última figura, la línea verde representa la temperatura de CPU sin sistema de enfriamiento, mientras que la línea negra es la temperatura reportada por la función `vcgencmd measure_temp`, y la línea roja representa a la temperatura reportada por el sensor. Estas últimas dos líneas deberían ser muy aproximadas, ya que representan la temperatura de CPU y la temperatura determinada experimentalmente. Los resultados muestran una diferencia cercana a los 10 °C. Por lo que las lecturas reportadas por el sistema operativo deben ser ajustadas con una diferencia de 10 °C.

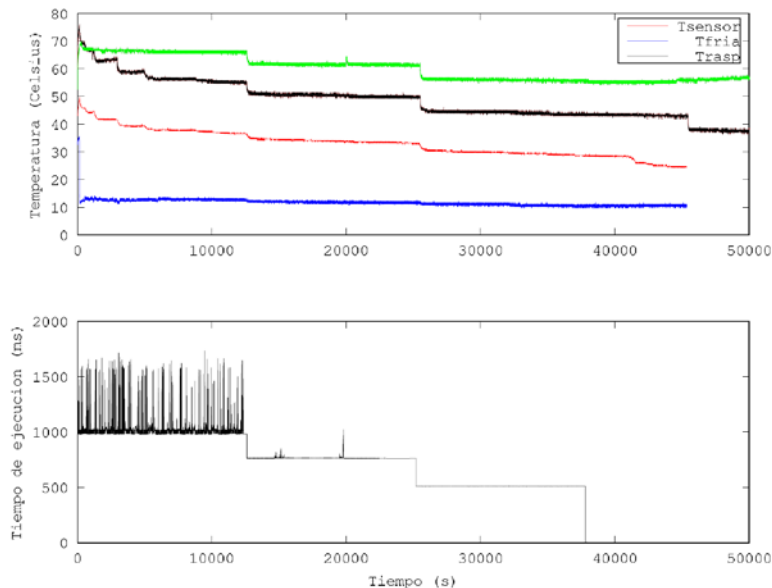


Figura 7 Gráfica de Temperatura de CPU.

4. Discusión

En este trabajo se mencionó el concepto de sistemas en tiempo real, debido a que esta computadora embebida se utiliza para procesar datos que tenga que ver con algún sistema en tiempo real en nuestro laboratorio de sistemas en tiempo real. Por lo que es necesario el análisis térmico del sistema para controlar la temperatura del CPU, y evitando valores límites de la misma que pongan en riesgo la fiabilidad del sistema.

En la referencia [Morelos, 2015], se concluye que el sistema de enfriamiento Peltier no solo no enfriaba el CPU sino que incluso elevaba la temperatura del mismo. Esto es seguramente debido a que la implementación del mismo no fue la correcta, ya que no disipo de ninguna manera el calor generado por la celda Peltier.

5. Conclusiones

La conclusión más importante es que este trabajo demuestra que si es posible enfriarla computadora utilizando un módulo Peltier.

Los resultados obtenidos en este trabajo se han discutido con otros trabajos realizados anteriormente. Si bien es cierto que el módulo Peltier demanda más energía eléctrica que la misma computadora, se concluye que, en términos de disminución de temperatura, un módulo Peltier puede disminuir hasta en 30 °C la temperatura del procesador.

Se encontró que la temperatura reportada por el sistema operativo de la computadora mediante la instrucción `vcgencmd measure_temp` tiene una diferencia promedio de 10 °C con respecto a la temperatura reportada por un sensor calibrado como lo es el lm35, por lo cual, no es recomendable el uso de esta instrucción para medir la temperatura de procesador en un sistema en tiempo real, ya que no reporta datos confiables.

También, se concluye que el uso del CPU es directamente proporcional a la temperatura de este, y se determinó la función donde el factor de escala propuesto es válido en un intervalo de uso del CPU que va desde 0% hasta 100%.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Morelos, J, Autosensado en tiempo real de las variables eléctricas, temperaturas del SoC y tiempos de ejecución de una computadora embebida sometida a diferentes sistemas de enfriamiento. Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional, SEPI-ESIME, Culhuacán, 2015.
- [2] Cano, J. L., Delgado, G., & Guevara, P., Simulación Estructurada del Filtro de Kalman para Identificación de Estados en un Motor de CC sobre una

- Computadora Embebida. Revista en Ingeniería y Tecnología, UAZ, 8(2), 2015: <http://nautilus.uaz.edu.mx/difu100cia/index.php/prueba/article/view/8>.
- [3] Erven Rohou, Michael D. Smith, Dynamically Managing Processor Temperature and Power. Harvard University, 2015.
- [4] Embedded system definition by The Linux Information Project (LINFO) (s/f): http://www.linfo.org/embedded_system.html, 2015.
- [5] Medel, J. de J., Guevara, P., & Cruz, D., Temas Selectos de Sistemas en Tiempo Real (Primera edición). México: Instituto Politécnico Nacional, 2007.