Congr. Int. en Ing. Electrónica. Mem. ELECTRO, Vol. 39, pp. 109-113, Oct 2017, Chihuahua, Chih. México
http://electro.itchihuahua.edu.mx/memorias_electro/MemoriaElectro2017.zip
ISSN 1405-2172

ALGORITMO HÍBRIDO PARA LA UTILIZACIÓN DE TRANSISTORES BJT COMO SENSORES DE TEMPERATURA LIBRES DE CALIBRACIÓN

Ernesto Chagoya Serna[1], Jesús Ezequiel Molinar Solís[1], Ramón Chávez Bracamontes[1], José Rivera Mejía[2], Víctor Manuel Aranda Contreras[3]
[1]*Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán, departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica*
Av. Tecnológico #100, Ciudad Guzmán Jalisco, México, C.P. 49000. Tel y fax: 013415752050
jemolinars@itcg.edu.mx
[2]*Instituto Tecnológico de Chihuahua, departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica*
Ave. Tecnológico #2909, Chihuahua, Chih. México, C.P. 31310. Tel: 016142012000 Fax: 016144135187
[3]*MetAs S.A. de C.V.*
Antonio Caso # 246, Centro, Cd. Guzmán Jalisco, México, C.P. 49000. Tel y Fax: 013414136123

RESUMEN.

El presente trabajo detalla un algoritmo para ser implementado en MATLAB u otra plataforma con el cual es posible obtener la temperatura de algún lugar o medio que se encuentre en equilibrio térmico con un transistor BJT. Primeramente se describe el proceso de medición del transistor de donde se obtienen los datos que serán procesados en el algoritmo aquí propuesto. Posteriormente se explica a detalle en qué consiste el algoritmo a través de simulaciones en PSpice y por último, se muestran algunos resultados experimentales obtenidos al aplicar este algoritmo a dispositivos comerciales.

Palabras clave: BJT, temperatura, termómetro primario.

ABSTRACT.

The present work details an algorithm to be implemented in MATLAB or another platform which it is possible to obtain the temperature of some place or medium in thermal equilibrium with a BJT transistor. First, the measuring process of the transistor is described, where, given data are extracted and then processed in the proposed algorithm. Then, the algorithm is explained in detail through simulations in PSpice and finally, some experimental results obtained when applying this algorithm to commercial devices are shown.

Keywords: BJT, temperature, primary thermometer.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las variables más críticas y que necesita ser medida y controlada en múltiples procesos es la temperatura. En la mayoría de procesos esta es medida con sensores un tanto costosos que después de un tiempo de operación requieren ser re-calibrados, generando gastos considerables. Debido a esto, es necesario desarrollar una metodología para un sensor de temperatura utilizando un simple transistor de unión bipolar BJT libre de calibración.

Una parte importante en esta tarea, es precisamente la generación de un algoritmo que brinde un tratamiento a los datos obtenidos después de una medición I-V del transistor, así también que calcule y exprese el valor de la temperatura a la que el dispositivo se encuentra.

Un transistor de unión bipolar BJT es un dispositivo de fácil adquisición y precio relativamente bajo, es por eso que al utilizar un transistor bipolar como dispositivo de medición dentro de un sensor de temperatura, se busca minimizar el costo del producto y si aunado a esto es un sensor primario, se eliminan los gastos por mantenimiento y re-calibración.

Debido a las propiedades físicas del material semiconductor que contiene el BJT, es posible conocer el valor de su temperatura polarizándolo correctamente [1-2].

2. MÉTODO DE MEDICIÓN

En primer lugar, es necesario realizar una medición correspondiente para obtener los datos que nos llevarán a la extracción de la temperatura. Se requiere de una fuente de voltaje para este procedimiento y un amperímetro que mida la corriente de difusión del colector. Este amperímetro debe quedar conectado a las terminales base y colector del transistor conservando una condición de 0V durante la medición. La fuente de voltaje será la que haga un barrido desde 0V hasta 1V conectándose entre las terminales base y emisor, Fig. 1. El barrido de voltaje V_{BE} con la medición de corriente de colector I_c nos brinda dos vectores de datos, con los cuales, usando el procedimiento numérico adecuado es posible obtener la temperatura.

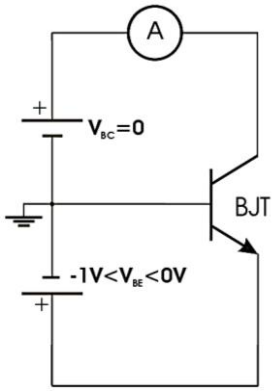

Fig. 1. Polarización del transistor BJT para la obtención de los vectores V_{BE} y I_C.

En el caso del presente trabajo se utilizó el equipo Keysight B2902 que posee dos fuentes “Source-Measure” con resolución de 100fA.

3. CORRIENTE DE COLECTOR-BASE EN CORTO CIRCUITO

Previamente ha sido demostrado que la corriente medida en el colector de un transistor BJT en una condición colector-base en corto circuito, brinda una importante representación de una

corriente debida exclusivamente a la difusión de portadores, [3]. Esto es:

$$I_c = I_s \left(e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} - 1\right) \quad (1)$$

En esencia, la ecuación (1) muestra que a pesar de la presencia de corrientes superficiales y de recombinación en la unión base-emisor, solo la corriente debida a la difusión alcanzará el colector. Esta condición hace propicio el uso de un BJT para ser usado como termómetro primario [1]. Puesto que la corriente de saturación I_s es muy pequeña; entonces se relacionan los valores de corriente y voltaje como sigue para la región de polarización directa:

$$I_c = I_s \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}\right) \quad (2)$$

Con:

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (3)$$

Donde:

I_C = Corriente de colector.
I_s =Corriente de saturación inversa.
V_{BE} =Voltaje base-emisor.
q = carga del electrón (-1.602176565(35)x10^{-19} C).
k = Constante de Boltzmann (1.3806488(13)x10^{-23} J/K).
T = Temperatura de la unión.

4. MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE TEMPERATURA

4.1. Método de Logaritmo Natural

Como el nombre del método lo indica, se aplica logaritmo natural a la Ec.(2) obteniendo:

$$ln(I_c) = ln(I_S) + \frac{qV_{BE}}{kT} \quad (4)$$

Se observa que es posible relacionar la Ec. (4) con la ecuación de la recta $y = mx+b$ siendo los términos: ln(I_c) la variable dependiente; V_{BE} la variable independiente; q/kT la pendiente m y el término ln(I_s) la ordenada al origen. De esto se obtiene la siguiente igualdad, que se utilizará a continuación para la obtención de la temperatura:

$$m = \frac{q}{kT} \quad (5)$$

Ahora se grafican los valores de ln(I_c) respecto de V_{BE} y se podrá observar como una zona en la curva permanece con pendiente constante, esta región lineal será la que brinde la información de la temperatura del transistor seleccionando el conjunto de datos que la comprenden y haciendo una regresión lineal. Este último procedimiento arroja el valor de la pendiente (q/kT) y la intersección con el eje vertical ln(I_s). Por último conociendo ya el valor de la pendiente m y de las constantes q y k es posible conocer la temperatura absoluta del transistor al momento de su medición, despejándola de (5).

El método de logaritmo natural presenta una desventaja notable al ser la pendiente m la parte que brinda el valor de la temperatura. Es muy conocido que el valor de una pendiente es muy susceptible a ser alterado por la presencia de ruido en las mediciones. Este hecho representa una gran desventaja del presente método por lo que es necesario considerar otras metodologías que eviten el uso de derivadas y pendientes.

4.2. Método Cinvestav

El método Cinvestav [4-5] permite deducir gráficamente el valor del voltaje térmico V_T que satisface a la Ec. (2) al momento de la medición del transistor.
Debido a que el voltaje térmico solo depende de la temperatura al momento de la medición y sabiendo que k y q son constantes como se muestra en (2), entonces es posible conocer la temperatura del transistor si se propone un valor de voltaje térmico V_T' para la siguiente ecuación:

$$I_c(V_T') = \left(I_s\ e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}\right)\left(e^{\frac{V_{BE}}{-V_T'}}\right) \quad (6)$$

Siendo el primer término en paréntesis la corriente medida. Cuando se cumpla que $V_T'=V_T$ ambos términos exponenciales se cancelan. Por lo tanto, la Ec. (6) al ser graficada con el valor correcto de V_T' (cumpliéndose estrictamente que $V_T' = V_T$, es posible observar cómo parte de la curva que constituye la región puramente exponencial permanece constante en el valor de I_s, esto es $I_c=I_s$. Es decir, se hace totalmente paralela al eje horizontal. De esta forma, variando manualmente el valor de V_T' hasta que el valor de la pendiente de los datos devuelva un valor muy cercano a m=0 es posible deducir la temperatura usando (3).
La ventaja del método Cinvestav yace en el hecho que numéricamente no se usan pendientes ni derivadas como en el caso del método de logaritmo natural, por lo tanto, es presumiblemente un método más exacto. Sin embargo, una desventaja notable es que no propone una metodología para que la variación y selección de V_T' se haga automática a través de algún algoritmo de optimización.
En este trabajo se propone un algoritmo que utiliza características de los dos métodos antes expuestos y considera una función objetivo cuya optimización devuelve el valor de la temperatura de una manera precisa cuando es implementado correctamente como es en el caso con MATLAB.

5. MÉTODO HÍBRIDO LN-CINVESTAV

La idea fundamental de la propuesta en este trabajo, reside en el hecho de que en el método Cinvestav se obtiene la condición $I_c=I_s$ cuando $V_T'=V_T$. Por lo tanto, es posible definir una función objetivo considerando el error cuadrático para la Ec. (6) conociendo previamente I_s.

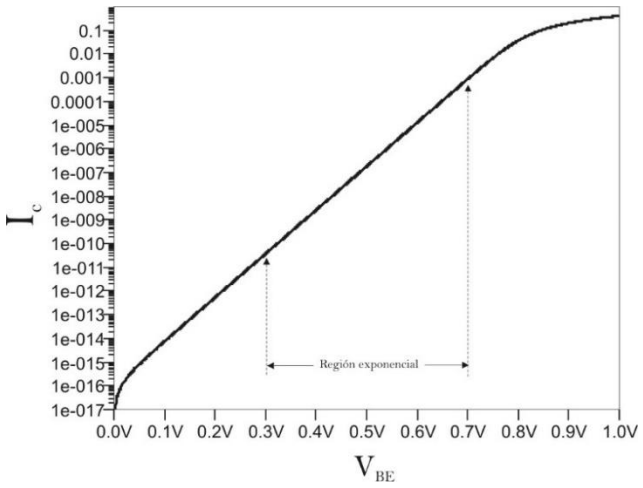

Fig. 2. Curva I-V en escala semi-logarítmica de simulación de transistor 2N222 a 0°C

La corriente de saturación inversa puede conocerse definiendo la región exponencial de la corriente I_c en función del voltaje base-emisor V_{be}. Dicha región puede considerarse en un rango de V_{be} =[0.3V, 0.7V]. A manera de ejemplo se realizó una simulación de la característica I-V de un transistor comercial 2N2222 a 0°C en Spice. En la Fig. 2 se muestra la simulación I-V en escala semi-logarítmica.

Para determinar I_s es necesario usar el método de logaritmo natural siguiendo los siguientes cinco pasos:

1.- Realizar la medición I-V del diodo haciendo un barrido del voltaje V_{BE} de 0V a 0.7V. De esta manera se tienen dos vectores de longitud *n* dependiendo del número de pasos; **I** que es la corriente medida del diodo y **V** que es el barrido del voltaje V_{BE} aplicado al diodo a una temperatura dada.
2.- Se define de los vectores la región puramente exponencial.
3.- Se realiza la función logaritmo natural a los datos del vector **I**.
4.-Se realiza una regresión lineal. Siguiendo (4) y el intercepto de la regresión será el término ln(I_s), Fig 3.
5.-Se despeja I_s, en el caso de la simulación devuelve una corriente de saturación inversa de 0.108831fA.

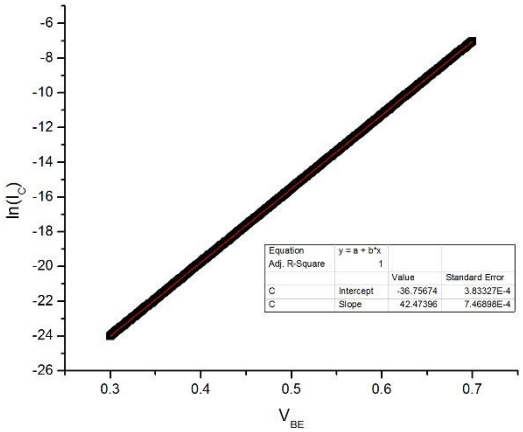

Fig. 3. Regresión lineal de los datos obtenidos de la simulación del 2N2222 a 0°C.

Para definir la función objetivo para el método Cinvestav se siguen los siguientes pasos:

1.- Se establece la Ec. (6) mediante $\boldsymbol{I_c(V'_T)=I\cdot exp(-V/V'_T)}$
2.- La función objetivo se define como:

$$f(V'_T) = \sum_{i=1}^{n}\left(I_s - I_{c(i,1)}(V'_T)\right)^2 \qquad (7)$$

Donde $I_{c(i,1)}$ es el *i*-ésimo elemento del vector $\mathbf{I}_c$. El mínimo que presente la función objetivo para algún valor de V'_T será su valor óptimo, Ec. (7). Esta función tiene como objeto encontrar un valor de V_T' para el cual, la mayor cantidad de elementos del vector $\mathbf{I}_c$ sean iguales a I_s.
3.- La función objetivo puede graficarse para un rango establecido de V_T', en este caso un rango de 0.02 y 0.026. Fig.4. Posteriormente se calcula el mínimo mediante la función de optimización "min" de Matlab.
4.- Para el voltaje térmico encontrado V_T', se despeja finalmente la temperatura. En el caso de la simulación brinda la temperatura de 0.023°C.

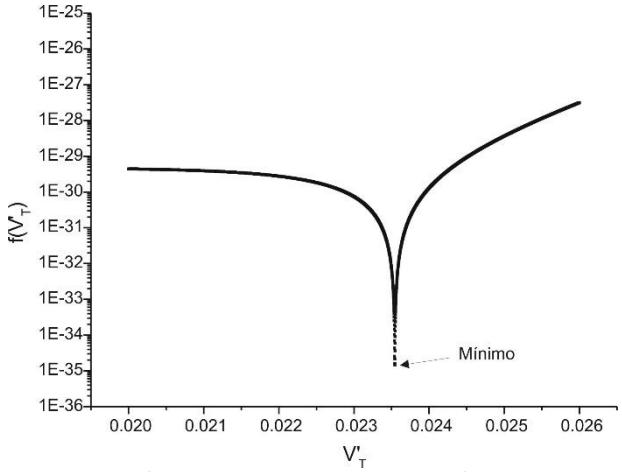

Fig. 4. Función objetivo que encuentra el valor mínimo de V_T' para la obtención de la temperatura del 2N2222 a 0°C.

A continuación se muestran en la Tabla I los resultados de algunas simulaciones que se realizaron en SPICE a diferentes temperaturas con el transistor 2N2222. Primeramente se obtienen los vectores I, V con esta plataforma, para después con estos datos implementar el algoritmo hibrido ln-cinvestav en Matlab, obteniendo los datos mostrados. Cabe la pena señalar que para el transistor 2N2222 la simulación devuelve un error mayor a 1°C para temperaturas cercanas a los 80°C.

Tabla I
RESULTADOS DE SIMULACIONES CON EL TRANSISTOR 2N2222

Transistor	2N2222	2N2222	2N2222	2N2222	2N2222
Temperatura Simulación (°C)	0	20	40	60	80
Is (A)	1.08E-16	3.34E-15	6.74E-14	9.60E-13	1.02E-11
Vt (V)	0.023541	0.025269	0.027004	0.028757	0.030535
Temperatura Obtenida (°C)	0.032	20.084	40.218	60.561	81.194
Error (°C)	0.032	0.084	0.218	0.561	1.194

También se realizaron simulaciones con el transistor 2N3055 de la misma manera, mostrados en la Tabla II.

Tabla II
RESULTADOS DE SIMULACIONES CON EL TRANSISTOR 2N3055

Transistor	2N3055	2N3055	2N3055	2N3055	2N3055
Temperatura simulación (°C)	0	20	40	60	80
Is (A)	2.57E-10	7.91E-09	1.59E-07	2.26E-06	2.39E-05
Vt (V)	0.023545	0.025264	0.026988	0.028713	0.030437
Temperatura obtenida (°C)	0.078	20.026	40.032	60.05	80.056
Error (°C)	0.078	0.026	0.032	0.05	0.056

Como se observa, se eligieron los transistores comerciales 2N2222 y 2N3055 para la simulación a diferentes temperaturas, de 0°C a 80°C con incremento de 20°C; en ambas tablas se muestra la corriente de saturación I_s, el voltaje térmico V_T y la temperatura obtenida con el algoritmo en Matlab, así como el error que es la diferencia entre la temperatura de simulación y la obtenida mediante el algoritmo híbrido.

6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se muestran los resultados experimentales obtenidos luego de la aplicación del algoritmo híbrido ln-cinvestav a dos transistores comerciales 2N2222 y 2N3055 que se encontraban a temperaturas de 0°C y 23.2°C respectivamente al momento de la medición. Para el proceso fue utilizado un sensor de temperatura (sensor *Isotech Milli-K.*) para monitorear la temperatura real a la que se encontraba el transistor, y para garantizar una mínima diferencia de temperaturas entre ambas partes se aseguró que la sonda sensor estuviera en contacto directo sujeta al BJT durante el proceso.
Para la medición a 0°C el medio en que se midió el transistor fue en punto fijo de fusión del hielo. Para el rango de temperatura de 18°C a 25°C aproximadamente (Temperatura ambiente) se midió al aire. Y para temperaturas por encima de los 25°C se utilizó un control de temperatura de agua destilada en un recipiente para realizar las mediciones correspondientes.

6.1 Medición del BJT 2N2222 a 0°C

Tal como en simulación, se aplica logaritmo natural al vector I generado por la medición, se grafica respecto al vector V, y se obtiene la corriente de saturación inversa del transistor que para este caso es I_s= 0.2897099 fA; realizando una regresión lineal de la región puramente exponencial como se muestra en la Fig. 5.

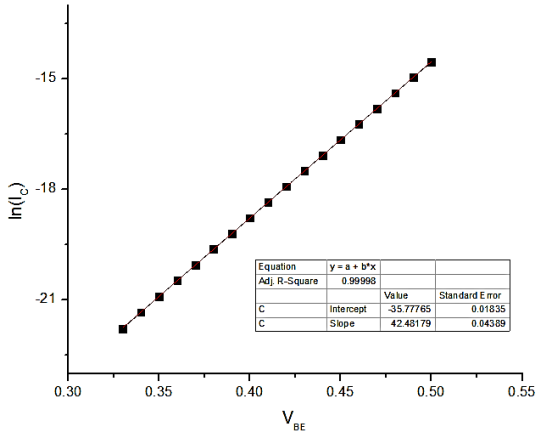

Fig. 5. Regresión lineal del transistor 2N2222 a 0°C.

Ahora conociendo el valor de I_s se implementa la función objetivo Ec. (7) en el algoritmo de Matlab para este método híbrido, haciendo un barrido de valores para V_T' que van de 0.02 a 0.029 en este caso y así obtener el valor mínimo, que es el valor de V_T' que arroja la temperatura a la que se realizó la medición del BJT 2N2222. En este caso se puede observar en la Fig.6. El valor correspondiente a V_T'= 0.023539V que indica una temperatura de 0.00883°C despejando de la Ec. (3).

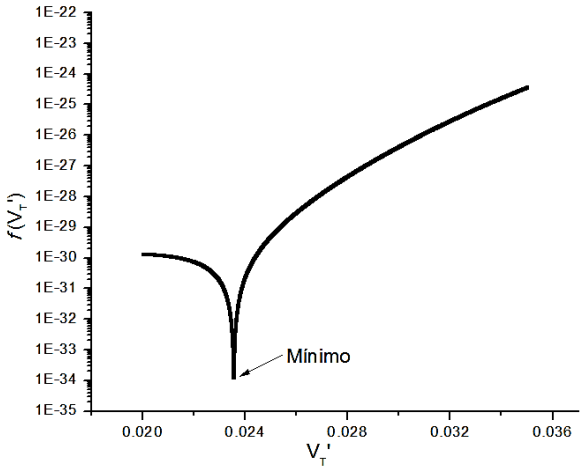

Fig. 6. Función objetivo para la medición del transistor 2N2222 a 0°C.

6.2 Medición del BJT 2N3055 a 23.2°C

De igual manera se realiza la medición del transistor 2N3055 monitoreando la temperatura de este con el sensor *Isotech Milli-K.* Se aplica logaritmo natural al vector I resultante de la medición y se grafica respecto al vector V; seleccionando los datos que la región lineal y aplicando una regresión se obtiene el valor de I_s = 0.688418 pA como se muestra en la Fig.7.

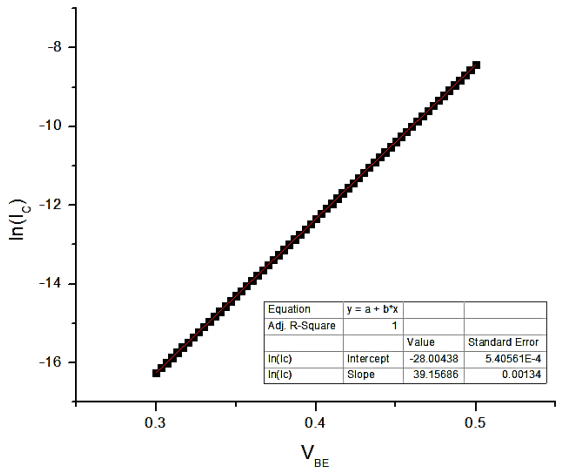

Fig. 7. Regresión lineal del transistor 2N3055 a 23.2°C.

Por último, una vez conociendo I_s se implementa el algoritmo de Matlab aquí propuesto generando una gráfica de la función objetivo Ec. (7), como se muestra en la Fig.8 y se obtiene el valor mínimo de V_T'=0.025538V para este caso. La temperatura obtenida es 23.2062°C.

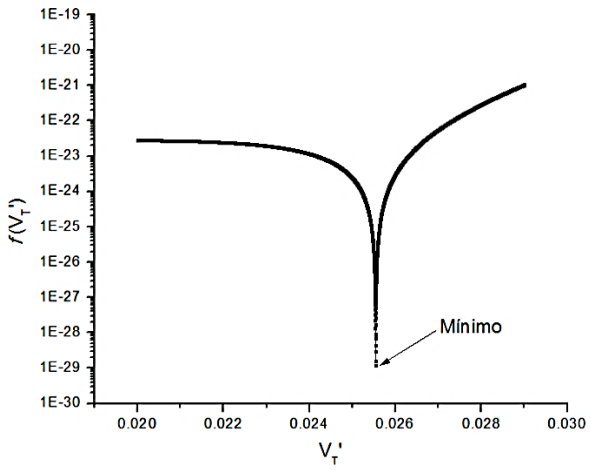

Fig. 8. Función objetivo para la medición del transistor 2N3055 a 23.2°C.

En seguida se muestran en la Tabla III los resultados experimentales de algunas mediciones que se realizaron a diferentes temperaturas con el transistor 2N3055.

Tabla III

RESULTADOS EXPERIMENTALES DE MEDICIONES AL TRANSISTOR 2N3055

Transistor	2N3055	2N3055	2N3055	2N3055	2N3055
Temperatura Medición (°C)	0	23.2	40	51.5	63
Is (A)	1.08E-14	1.28E-08	9.29E-12	4.83E-11	2.42E-10
Vt (V)	0.02354	0.025538	0.026984	0.027976	0.028962
Temperatura obtenida (°C)	0.02	23.206	39.986	51.498	62.94
Error (°C)	0.02	0.006	0.027	0.002	0.06

La Tabla IV muestra resultados experimentales de otros transistores con los que también se realizaron mediciones a distintas temperaturas, 2N2222, BC547 y BC337.

Tabla IV

RESULTADOS DE MEDICIONES A TRANSISTORES 2N2222, BC547, BC337

Transistor	2N2222	2N2222	BC547	BC337
Temperatura Medición (°C)	0	27.1	25.1	25.4
Is (A)	2.90E-16	4.28E-14	2.33E-14	5.65E-14
Vt (V)	0.023539	0.025876	0.025705	0.025728
Temperatura Obtenida (°C)	0.008	27.128	25.144	25.411
Error (°C)	0.008	0.028	0.044	0.011

En ambas tablas se observan los valores de corriente de saturación I_s, el voltaje térmico V_T y la temperatura obtenida con el algoritmo híbrido, así como el error entre las temperaturas de simulación y la obtenida. Estos resultados son una muestra de numerosas mediciones realizadas, luego de un largo periodo de pruebas en cuanto a adecuaciones y mejoras en el proceso para conseguir un resultado óptimo

7. CONCLUSIONES

Con el presente trabajo se propone un nuevo algoritmo para la obtención de la temperatura utilizando un transistor BJT. La idea principal expuesta une dos metodologías existentes para desarrollar un algoritmo efectivo que puede ser implementable a través de electrónica de soporte y un microcontrolador. Los resultados en simulación y experimentales son del orden con los resultados reportados en [4] donde se obtienen errores entre temperatura real y medida de algunos mK. Por limitantes del laboratorio del Instituto Tecnológico de Cd. Guzmán, los resultados experimentales se encuentran dentro de un limitado rango de temperatura de 0°C a 60°C. Como trabajo futuro se pretende ampliar el rango a través de condiciones térmicas que logren alcanzar temperaturas mayores a 100°C e inferiores a 0°C con la colaboración del centro de metrología MetAs S.A. de C.V. para asegurar la trazabilidad y la calidad de las mediciones en un laboratorio acreditado.

8. REFERENCIAS

[1] A. A. Felimban, D. J. Sandiford, “Transistors as absolute Thermometers” Journal of Physics E: Scientific Instruments pp. 341, Nov. 1973.
[2] María C. Ruiz-Vázquez, J. J. Sánchez Rodríguez, F. J. Arizti Urquijo, “Linear thermometry using bipolar transistor-based sensors”, Sensors and actuators A, vol. 29, pp. 171-178, Jul. 1991.
[3] C. T. Sah, “Effect of Surface Recombination and Channel on P-N Junction and Transistor Characteristics”, IRE Trans. On electron Devices, vol. 9, pp. 94-108, 1962.
[4] Mimila-Arroyo, J., “The bipolar junction transistor; a primary thermometer”, Simposio de Metrología 2010, Querétaro, Mex. 2010, SM2010-S4B-1.
[5] J. Mimila-Arroyo, “Free electron gas primary thermometer: The bipolar junction transistor”, Applied Physics Letters, vol. 103, 193509, 2013.