

## Técnica de medición de baja corriente para un convertidor termoiónico

Pérez-Luna J. G., Moreno-Coria L. A., Alcántara-Iniesta S.  
*Centro de Investigaciones en Dispositivos Semiconductores, BUAP*  
 Av. 14 Sur y Av. San Claudio, Col. San Manuel, Puebla Pue., C.P. 72560, México

Jiménez- González A., Estrada- Gasca C.  
*Centro de Investigación en Energía, UNAM*  
 Priv. Xochicalco S/ N, Temixco Mor., C.P. 62580, México  
 (Recibido: 13 de septiembre de 2013; Aceptado: 28 de febrero de 2014)

Se presenta una técnica analógica para medir las pequeñas corrientes que son generadas por un convertidor termoiónico cuando es operado en el régimen de baja temperatura. La operación en estado estable de un convertidor termoiónico (temperatura de emisor  $> 1500\text{K}$ ), manifiesta una corriente dominada por el electrodo emisor. En régimen de baja temperatura puede dominar la corriente proveniente del colector; es decir, se obtiene una corriente inversa. Es importante estudiar esta corriente pues está asociada a las temperaturas de operación de los electrodos y a sus correspondientes funciones de trabajo. En esta condición la corriente inversa es de magnitud pequeña y puede mostrar valores cercanos a  $1 \mu\text{A}$ . En este trabajo se emplea un capacitor de pequeña magnitud para medir en forma simultánea el voltaje y la corriente provenientes del convertidor termoiónico. La carga del capacitor se asocia a un amplificador operacional empleado como circuito buffer. Se hace un tratamiento matemático del voltaje transitorio del capacitor para obtener la corriente del convertidor termoiónico. Con esta técnica fue posible medir corrientes del orden de  $1 \mu\text{A}$ .

*Palabras clave:* Técnica de medición; Pequeña corriente; Convertidor termoiónico

An analog electrical technique is presented to measure a small current that is generated by a thermionic converter when it is operated at low temperature regime. Direct and inverse currents are generated simultaneously in a thermionic converter at steady state (emitter temperature  $> 1500\text{K}$ ); although, at low temperature regime any of them may be more significant. Important information is obtained from a thermionic converter when it is operated at low temperature regime, particularly, when the inverse current is generated from the collector to the emitter (inverse current  $\approx 1 \mu\text{A}$ ). An operational amplifier is used as a buffer circuit to measure the voltage in a small capacitor. A mathematical treatment was made from the voltage data obtained from the charged capacitor to measure indirectly the current generated by the thermionic converter. It was possible to measure a small current like  $1 \mu\text{A}$  by this technique.

*Keywords:* Measurement technique; Small current; Thermionic converter

### 1. Introducción

El efecto termoiónico consiste en la emisión de electrones que se generan en un electrodo caliente con respecto a un electrodo frío por el cual son recibidos [1]. Al primero se le denomina emisor y al segundo colector. Este fenómeno se presenta cuando el material del emisor se encuentra a una temperatura superior a los  $1000 \text{ K}$ . Se define el nivel de Fermi  $E_F$  en metales, como el nivel de energía máximo que pueden tener los electrones dentro de un material, cuando éste se encuentra a una temperatura absoluta de cero grados. Los electrones no sólo ocupan estos estados de energía máximos; sino también, estados de menor energía representados por niveles cuánticos cuya población para cada nivel está dada de acuerdo a la función de distribución de Fermi-Dirac [2]. Se define la función de trabajo  $\phi$ , como la energía necesaria para liberar a un electrón que se encuentra dentro de un material y con la cual se vence la fuerza de atracción eléctrica generada por una carga imagen positiva reflejada en el material por ausencia del

electrón; en otras palabras, es la diferencia del nivel energético que posee el electrón justo afuera del material (nivel conocido como  $E_{\text{vac}}$ ), y el nivel de Fermi que tiene dentro del material; esto es  $\phi = E_{\text{vac}} - E_F$ .

Tomando en consideración estos dos conceptos, un material al que se le eleva la temperatura es capaz de ceder energía a los electrones, con la cual serán capaces de vencer la función de trabajo y así quedar libres fuera del material. La energía adicional con la cual cuentan los electrones permitirá que algunos de ellos se puedan trasladar a través del vacío hacia otro material (el colector), el cual se encuentra separado una distancia  $w$ . De esta manera se obtienen electrones libres que rodean al material emisor y electrones libres que pueden alcanzar al material colector.

Un convertidor termoiónico (CT), consta de dos placas separadas de materiales diferentes y encapsuladas en un ambiente de vacío, ambas placas constituyen los electrodos del convertidor. En esta estructura, el electrodo emisor tiene el nivel de Fermi inferior y en consecuencia la

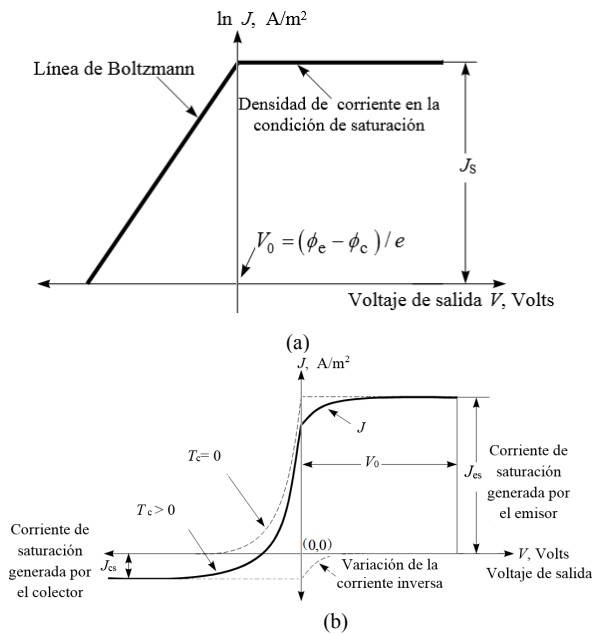


Figura 1. (a) Curva característica  $J$ - $V$  ideal del CT. (b) Curva característica  $J$ - $V$  del CT incluida la emisión inversa.

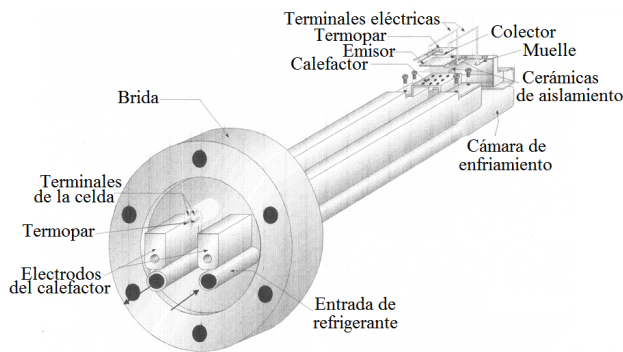


Figura 2. Diagrama esquemático del CT.

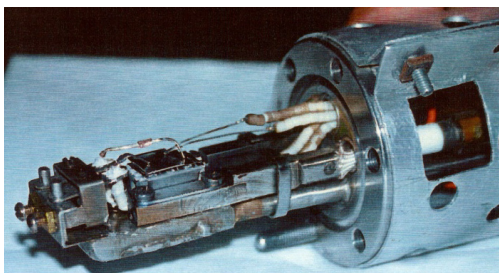


Figura 3. Vista lateral del CT.

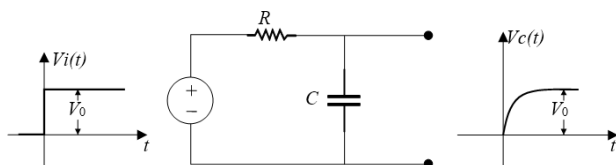


Figura 4. Respuesta en voltaje de un circuito RC tipo integrativo a un escalón unitario.

función de trabajo mayor; mientras que, en el electrodo colector estas magnitudes son opuestas, es decir, mayor nivel de Fermi y menor función de trabajo. De lo anterior se deduce que, los electrones que son recibidos en el colector, provenientes del emisor, tienen mayor energía que los que se encuentran en el colector; este potencial excedente se emplea para alimentar una carga conectada entre los electrodos. Idealmente se requiere que el flujo de electrones no pierda energía durante su trayecto; sin embargo, se presentan pérdidas en el origen; cuando fluyen a través de la región interelectrónica, y al chocar con el colector.

Para determinar la corriente neta que puede fluir del CT hacia la carga, Hatsopoulos [7] propuso que ésta se puede obtener sustrayendo las densidades de corriente generadas en cada uno de los electrodos. Así, empleando la ecuación de Richardson-Dushman para cada electrodo y para condiciones específicas de temperatura y función de trabajo de los electrodos, se obtiene que:

$$J = AT_e^2 \exp\left(-\frac{\phi_e}{kT_e}\right) - AT_c^2 \exp\left(-\frac{\phi_e - eV}{kT_c}\right) \quad \text{para} \quad \phi_e - \phi_c \geq eV, \quad (1a)$$

$$y \quad J = AT_e^2 \exp\left(-\frac{\phi_c + eV}{kT_e}\right) - AT_c^2 \exp\left(-\frac{\phi_c}{kT_c}\right) \quad \text{para} \quad \phi_e - \phi_c \leq eV. \quad (1b)$$

La operación ideal de un CT se presenta cuando no hay corriente inversa, es decir cuando no hay corriente fluyendo del colector hacia el emisor, esta condición se obtiene idealmente cuando  $T_c \rightarrow 0$  K. En este caso, el segundo término de la ecuación 1a se desprecia y la magnitud de  $J$  para valores de  $V$  entre 0 y  $(\phi_e - \phi_c)/e$  se mantiene constante. Físicamente esto significa que todos los electrones emitidos por el emisor alcanzan al colector. Considerando ahora que  $T_c \rightarrow 0$  K y además que el voltaje  $V$  excede el valor  $(\phi_e - \phi_c)/e$ , entonces el comportamiento de  $J$  lo define el primer término de la ecuación 1b; la curva característica  $J$ - $V$  mostrada en la figura 1(a) corresponde al caso ideal. Cuando  $T_c > 0$ , debe considerarse también la corriente inversa generada por el colector y en consecuencia los segundos términos de las ecuaciones 1a y 1b, en este caso la curva  $J$ - $V$  adopta entonces la forma mostrada en la figura 1(b); la cual muestra los detalles de una curva  $J$ - $V$  típica de un CT, es común en la literatura mostrar las curvas  $J$ - $V$  con el eje de las abscisas invertido, en este trabajo se optó por presentar las curvas características del CT en el segundo cuadrante con el fin de simplificar la descripción del comportamiento de la impedancia interna del CT.

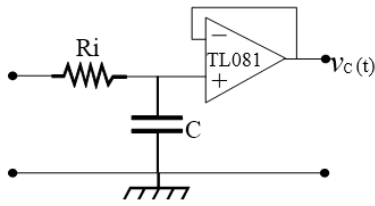


Figura 5. Capacitor de carga y su interfaz para adecuar el acoplamiento de impedancia.

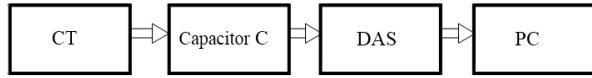


Figura 6. Sistema para medir las curvas  $I-V$  del CT en la condición de baja corriente.

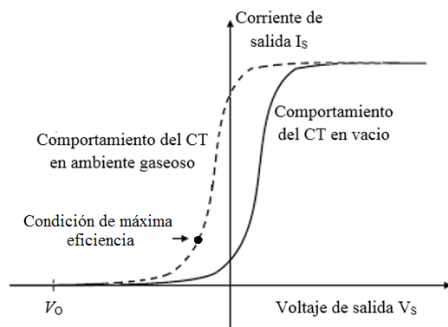


Figura 7. Curva característica del CT de vacío.

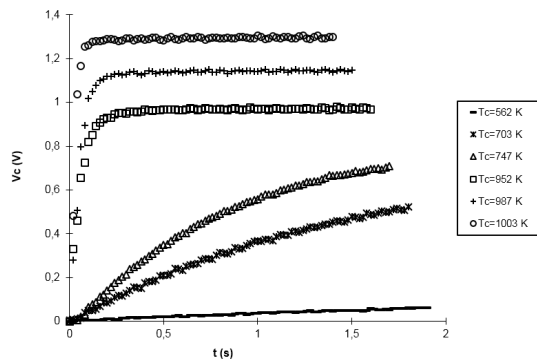


Figura 8. Comportamiento del voltaje en el capacitor de carga  $C_L$  acoplado al CT para diferentes temperaturas de colector.  $C_L=10\mu F$ .

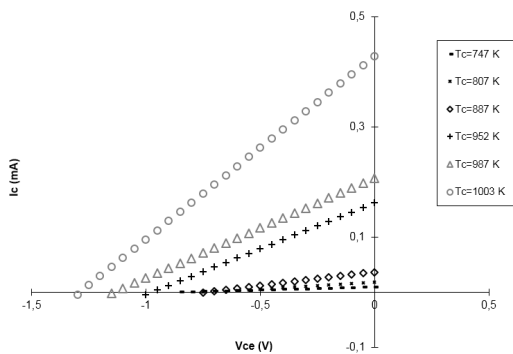


Figura 9. Curvas características del CT, para temperatura en el colector entre 747 K y 1003 K.

## 2. Características del CT empleado para realizar las pruebas

Previamente a la realización de las pruebas experimentales; se fabricó el prototipo de un CT, que se muestra en la figura 2; el cual para su operación fue introducido a un sistema de alto vacío y opera a una temperatura promedio de 1800 K en el electrodo emisor. Con el fin de generar plasma en el espacio interelectrónico, la estructura del sistema de ultra vacío, permite la entrada de gases. Con esta facilidad, se pueden realizar pruebas al CT en un ambiente de nitrógeno con presión parcial controlada ( $1 \times 10^{-4}$  Torr). Este CT trabaja además con distancias interelectrónicas micrométricas. El convertidor se montó sobre una brida DN 35 CF; lo que permitió instalar este dispositivo en una cámara de vacío, en donde las condiciones de vacío y manejo de gases pueden ser manipulados. La figura 2 muestra esquemáticamente la estructura del convertidor, se pueden observar, en el extremo izquierdo del convertidor, las conexiones externas y en el extremo derecho los elementos que componen el CT y que estarán sometidos a vacío; la comunicación entre ambos extremos se efectúa por medio de un pasamuros cerámico, que conserva el vacío y resiste las altas temperaturas internas que se manejan en el convertidor.

Para conseguir las altas temperaturas de trabajo que requiere el emisor, se usó una calefactor fabricado con un folio de tantalio delgado, con un espesor  $w$  igual 0.075 mm, el cual por radiación calienta al emisor. Encima del calefactor y separado por tubos cerámicos capilares, se colocó el emisor del CT, este electrodo es un folio de tungsteno con un espesor de 0.5 mm y un área de  $2 \text{ cm}^2$ . Sobre el emisor se depositaron algunos gránulos hechos de polvo cerámico de MgO, con el fin de aislar el emisor del colector. El electrodo colector se fabricó de molibdeno con una función de trabajo  $\phi_{Mo}=4.2 \text{ eV}$  menor a la del electrodo emisor, el cual se fabricó de tungsteno con una función de trabajo  $\phi_W=4.5 \text{ eV}$ , su espesor es de 0.6 mm y también con un área de  $2 \text{ cm}^2$ . Se usaron alambres de cromel para conectar los electrodos del CT con el exterior. Para medir la temperatura en el colector del convertidor se introdujo un termopar de cromel-alumel, sobre la laminilla del colector. Se adicionó al convertidor un elemento de enfriamiento el cual permite controlar la temperatura del calefactor dentro de los niveles de operación deseados. La tabla 1 presenta en forma resumida las características del CT; mientras que, la figura 3 muestra el prototipo del CT fabricado [3].

## 3. Técnica desarrollada para medir la curva $I-V$ del CT en la condición de baja corriente

El CT requiere de una temperatura en el emisor suficientemente alta ( $>1500 \text{ K}$ ), para generar una corriente apreciable hacia la carga. Con el fin de determinar la curva  $I-V$  del CT en la condición de baja corriente ( $\approx 10 \mu A$ ), se generó la idea de obtener de manera indirecta esta curva, empleando la característica integrativa del capacitor. La

técnica consiste en conectar entre las terminales del CT, un capacitor C de valor conocido; es decir, se desea medir el voltaje dinámico presente en el capacitor que se está cargando, y a partir de este voltaje, determinar la corriente dinámica.

La figura 4 muestra la forma de onda esperada en el capacitor de un circuito RC en configuración integrativa, cuando el resistor R y el capacitor C, se mantienen constantes durante el evento.

La expresión que rige el comportamiento del voltaje en el capacitor empleado como carga, está dada por [5]:

$$V_C(t) = V_0 \left( 1 - e^{-t/RC} \right) \quad (2)$$

Es posible emplear la técnica de cargar un capacitor para determinar el comportamiento  $I-V$  del CT, si se cuida el adecuado acoplamiento de impedancia entre el convertidor, el capacitor empleado como carga y el Sistema de Adquisición de Datos o DAS por sus siglas en inglés (Data Acquisition System); la figura 5 muestra el circuito empleado para medir el voltaje dinámico en el capacitor. Como puede observarse en esta figura, el capacitor se encuentra acoplado a un amplificador operacional en la configuración de *seguidor de voltaje* [4], de esta manera se puede transferir el voltaje dinámico del capacitor hacia la tarjeta DAS, sin que ésta afecte el voltaje presente en el capacitor; en este circuito,  $R_i$  es la resistencia interna del CT. La figura 6 muestra el arreglo completo desarrollado para determinar la curva  $I-V$  del CT en la condición de baja corriente; los datos capturados por la tarjeta DAS son enviados a la PC para su procesamiento. Como se puede observar en el arreglo de la figura 6, los datos capturados corresponden únicamente al voltaje  $v_C(t)$  presente en el capacitor; sin embargo, si se deriva este voltaje con respecto al tiempo de acuerdo con la expresión:

$$\dot{i}_C(t) = C \frac{dV_C(t)}{dt}, \quad (3)$$

se obtiene la corriente  $i_C(t)$  que genera el CT para diferentes condiciones de voltaje entre las terminales del convertidor. Esta ecuación expresa la relación que existe entre el voltaje y la corriente presentes en el capacitor [5]. La corriente así obtenida corresponde a la corriente que genera el CT dado que, el capacitor se encuentra conectado en serie con el convertidor. Una vez conocida la magnitud del voltaje y de la corriente, presentes en el capacitor para cada momento, y en virtud de que las terminales del capacitor y del CT coinciden, es posible graficar la curva característica  $I-V$  del CT con estas mismas variables. Esta técnica requiere necesariamente que la *corriente de fuga* [4] del capacitor sea mucho menor que la corriente que está generando el convertidor para que la ecuación 3 sea válida [6].

Es importante señalar que el empleo de esta técnica únicamente proporcionará información sobre el comportamiento del CT en el segundo cuadrante debido a

que, el voltaje presente entre las terminales del convertidor puede variar entre cero volts y un voltaje negativo máximo; es decir, el comportamiento del voltaje presente entre las terminales del convertidor es exclusivamente negativo. Cuando el voltaje definido por la curva característica del CT coincide con el valor de cero volts, la condición de operación del convertidor corresponde a un corto circuito; mientras que, el voltaje negativo máximo corresponde a la condición de circuito abierto.

La curva característica esperada para el CT, se manifestará como una recta, si la impedancia interna del convertidor se mantiene constante, y se obtendrá una curva con variaciones en su pendiente, si la impedancia interna cambia; tal es el caso de la curva característica del CT mostrada en la figura 7, la cual muestra las curvas características para los tres modos de operación y su comparación con la curva característica ideal. En esta figura se presenta preferentemente el comportamiento de la corriente en lugar de la densidad, con el fin de establecer una referencia al modelo eléctrico [1], también se muestra la magnitud de la densidad de potencia que se genera para la condición de máxima eficiencia, representada en la figura 7, donde se observa además, el desplazamiento a la izquierda, esto debido a la presencia de una atmósfera gaseosa, como puede ser nitrógeno, presente entre los electrodos.

#### 4. Pruebas y resultados

Las pruebas efectuadas al CT fabricado con electrodos metálicos (W y Mo), se redujeron a determinar el voltaje dinámico presente en el capacitor  $C_L$  de  $10 \mu F$  empleado como carga de acuerdo a los arreglos mostrados por las figuras 5 y 6. La prueba consiste básicamente en cargar un capacitor de valor conocido directamente con el convertidor acoplado entre sus terminales. La familia de curvas así obtenida se muestra en la figura 8, en donde el parámetro es la temperatura medida en el colector (ver figura 3). El incremento de temperatura medido en el colector, manifiesta indirectamente que la temperatura del emisor también se incrementó. Como era de esperarse, a mayor temperatura en el emisor, mayor es la emisión electrónica en este electrodo y por lo tanto, menor es el tiempo requerido por el sistema CT-Capacitor para alcanzar la condición de estado estable. Desde el punto de vista de la teoría de circuitos esto significa que la impedancia interna del CT se reduce con el incremento de temperatura en el emisor [7]. También se puede observar en la figura 8 que, el voltaje máximo que alcanza el capacitor en estado estable, aumenta conforme se incrementa la temperatura de los electrodos, inclusive se llega a alcanzar un voltaje de 1.3 V para  $T_c = 1003$  K. A este respecto se hace la siguiente observación: el potencial de salida esperado para el CT es de 0.3 V, lo cual corresponde a la sustracción de las funciones de trabajo de los electrodos emisor y colector ( $\phi_W = 4.5$  eV y  $\phi_{Mo} = 4.2$  eV). Para explicar la diferencia obtenida se plantean dos hipótesis; en primer lugar se considera que, la función de

trabajo del molibdeno se pudo haber reducido con el aumento de temperatura, inclusive hasta un valor de 3.2 eV. Esta hipótesis no se confirmó, pues las tablas de funciones de trabajo revisadas para el molibdeno en ningún caso manifiestan tal reducción de la función de trabajo [8]. Cabe aun la posibilidad de que se haya formado una pequeña película de óxido sobre el molibdeno, en este caso sí se justificaría una función de trabajo en el colector del orden de 4 eV [9]. En la segunda hipótesis se considera que, el potencial excedente de 1.0 V se debe a que una fracción de los electrones libres generados en el emisor cuentan con una energía cinética mayor a la energía equivalente a la función de trabajo del tungsteno y como consecuencia con un mayor potencial. Esta hipótesis se confirmaría si la curva característica  $I-V$  del CT, tuviera un levantamiento exponencial lo cual significaría que pocos electrones emitidos por el emisor contarían con una energía superior a la función de trabajo del emisor; sin embargo, según se puede apreciar en la figura 9, las curvas características  $I-V$  obtenidas por la técnica de cargar un capacitor, solo dan información parcial de las curvas características, y por lo tanto no es posible observar el levantamiento exponencial de la curva. Es necesario además, para observar el levantamiento de la curva, que el colector se mantenga frío; a fin de que no se presente la corriente inversa proveniente del colector (ver figura 1). Se considera que esta última hipótesis es la explicación más consistente. Un análisis adicional de la familia de curvas mostrada en la figura 9 manifiesta que, conforme la temperatura medida en el colector aumenta, también aumenta la pendiente de las curvas  $I-V$  del CT, en consecuencia, disminuye la impedancia interna del convertidor; este es el motivo por el cual el capacitor se carga en menos tiempo. La figura 9 también da información sobre el voltaje generado por el convertidor; la magnitud de este voltaje para diferentes condiciones de temperatura se puede determinar directamente de las curvas  $I-V$  cuando éstas cruzan el eje de las abscisas. Es notorio además el deslizamiento de las curvas  $I-V$  del CT conforme se incrementa la temperatura, esto significa en términos generales que, conforme aumenta la temperatura, la potencia generada por el convertidor también aumenta.

Por otra parte, aunque para medir la temperatura en el interior del CT, se empleó un termopar colocado directamente en el colector del CT, la magnitud así obtenida se tomó únicamente como una primera aproximación, pues según se analizó teóricamente, para obtener las magnitudes de las corrientes mostradas en la

figura 8, se requiere que las temperaturas de trabajo en el emisor sean superiores a 1800 K. La magnitud de este parámetro no se puede determinar directamente de la temperatura medida en el colector. Por esta razón se optó por medir la temperatura de los electrodos emisor y colector en forma indirecta, por medio de la ecuación de Richardson-Dushman  $J = AT^2 \exp\left(\frac{-\phi}{kT}\right)$ ; donde:

$A = 4\pi em^2/h^3 = 120 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^2$ ; empleando para esto, las corrientes de saturación medidas y la función de trabajo de los electrodos.

## 5. Conclusiones

Se presenta un método sencillo para medir magnitudes pequeñas de corriente en un CT. Se observa que fue posible obtener la familia de curvas características del CT para diferentes condiciones de temperatura. Fue posible también determinar para cada caso los voltajes de circuito abierto y las corrientes de corto circuito. No se encontró inconveniente alguno para medir pequeñas corrientes que, en este caso, el valor mínimo fue del orden de 10  $\mu\text{A}$ . El método se puede extender a la medición de otro tipo de dispositivos como son; por ejemplo, las celdas fotoeléctricas.

## Referencias

- [1] G. Pérez, A. E. Jiménez-González, Electrical circuit model for thermionic converters, *Energy Conversion & Management*, **42**, 1 (2001).
- [2] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, Jhon Wiley and sons, Inc., Sixth edition, (New York, 1986).
- [3] G. Pérez Luna, Tesis Doctoral; Desarrollo de un Generador Termoiónico de Corriente Alterna, UNAM, (México 2001), p. 44.
- [4] . Sedra y K.C. Smith, "Dispositivos Electrónicos y Amplificación de Señales", Ed. Interamericana, (México 1987).
- [5] W. H. Hayt, Jr. / J. E. Kemmerly, *Análisis de Circuitos en Ingeniería*, Cuarta edición McGraw Hill, (México 1988), p.131.
- [6] C. J. Kaiser, *The Capacitor Handbook*, (New York, 1993).
- [7] G. N. Hatsopoulos, E. P. Gyftopoulos, *Thermionic Energy Conversion, Vol I: Processes and Devices*, MIT Press, Cambridge, (Massachusetts 1973).
- [8] V. S. Fomenko, *Handbook of thermionic properties*, Ed. Plenum Press Data Division, (New York 1966).
- [9] A. E. Jiménez, *Phänomenologische und Spektroskopische Charakterisierung von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - Modell Katalysatoren*, Dissertation, Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen, (1989).