



Title: Simulation of electron flow behavior between the electrodes of a thermionic converter

Authors: CALVARIO-GONZÁLEZ, Abdías, BARBOSA-SANTILLÁN, Luis Francisco and JUÁREZ-VARELA, Mirna Patricia

Editorial label MARVID: 607-8695

VCICA Control Number: 2023-01

VCICA Classification (2023): 010923-0001

Pages: 30

RNA: 03-2010-032610115700-14

MARVID - Mexico

Park Pedregal Business. 3580-
Adolfo Ruiz Cortines Boulevard –
CP.01900. San Jerónimo Aculco-
Álvaro Obregón, Mexico City
Skype: MARVID-México S.C.
Phone: +52 | 55 6159 2296
E-mail: contact@marvid.org
Facebook: MARVID-México S. C.
Twitter: @Marvid_México

www.marvid.org

Holdings

Mexico	Colombia	Guatemala
Bolivia	Cameroon	Democratic
Spain	El Salvador	Republic
Ecuador	Taiwan	of Congo
Peru	Paraguay	Nicaragua

Introducción

1. Objetivo

Simular el comportamiento de los electrones emitidos entre los electrodos de un convertidor termoiónico, para encontrar la capacidad de emisión de un convertidor termoiónico en función de los parámetros que intervienen.

La simulación del comportamiento del flujo de electrones manifestará la capacidad de emisión en un convertidor termoiónico, en función de los principales parámetros que intervienen.

2. Justificación

El convertidor termoiónico desde el punto de vista termodinámico, es una máquina de calor que utiliza el gas de electrones como fluido de trabajo, por lo tanto, su eficiencia no puede exceder a la que establece el ciclo de Carnot. La diferencia de temperaturas entre emisor y colector arrastra a los electrones a través de la carga del sistema.

Para un conjunto dado de electrodos, la potencia de salida del convertidor termoiónico es una función de la temperatura del colector y emisor, del espacio interelectródico y de la presión de la atmósfera de cesio. Usualmente, los convertidores termoiónicos operan a alta temperatura. Típicamente, la temperatura del emisor está en la gama de 1600 a 2400K, y la del colector varía de 800 a 1100K, con esto es posible obtener densidades de corriente que varían entre 5 y 10 A/cm² a un potencial de salida del orden de 0.5V. La eficiencia en este tipo de convertidores para generar electricidad a partir del calor varía entre 10 y 15%.

3.1 Convertidor Termoiónico

El convertidor termoiónico desde el punto de vista termodinámico, es una máquina de calor que utiliza el gas de electrones como fluido de trabajo, por lo tanto, su eficiencia no puede exceder a la que establece el ciclo de Carnot. La diferencia de temperaturas entre emisor y colector arrastra a los electrones a través de la carga del sistema.

Para un conjunto dado de electrodos, la potencia de salida del convertidor termoiónico es una función de la temperatura del colector y emisor, del espacio interelectródico y de la presión de la atmósfera de cesio.

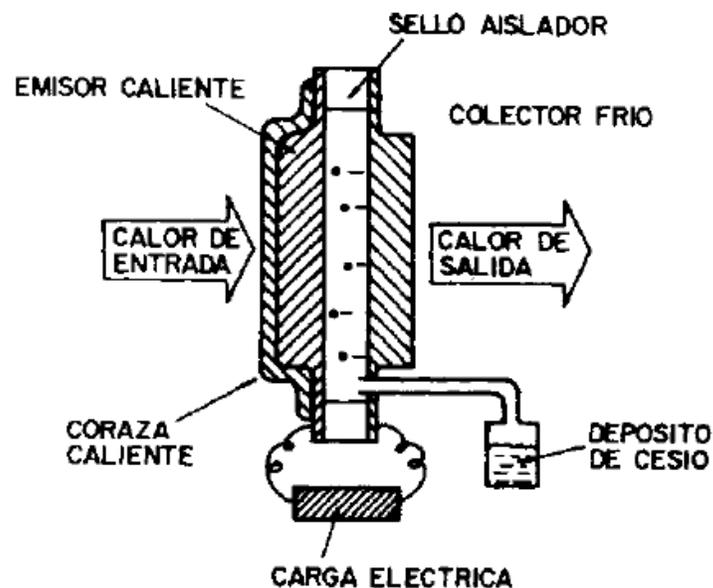


Fig. 1 Convertidor termoiónico

3.2 Características I - V de un diodo termoiónico de vacío

El diodo de vacío, es un dispositivo electrónico de dos terminales, las cuales están unidas al emisor y colector. El espacio intermedio, entre emisor y colector puede ser el vacío (diodos de alto vacío) o plasma de cesio (diodos de cesio). El emisor se caracteriza porque emite electrones cuando se encuentra a una alta temperatura, cuando se aplica un voltaje externo entre éste y el colector, la corriente que circula por el dispositivo se comporta de acuerdo a la curva mostrada en la Fig. 1.1, que es típica de un diodo termoiónico de alto vacío experimental. Puede ser reproducida a partir de las ecuaciones fundamentales que explican la emisión termoiónica.

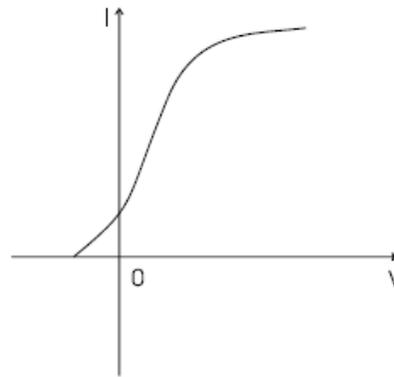


Fig. 1.1 Curva característica de un diodo termoiónico experimental

3.3 La emisión de electrones en una superficie metálica caliente (Ecuación de Richardson - Dushman)

La emisión termiónica depende de los parámetros físicos del sólido, especialmente de la función trabajo Φ y de la

$$J_{th} = 120T^2 e^{-\phi/kT} \quad A/cm^2$$

La ecuación de Richardson - Dushman.
Se observa que, a una temperatura dada, un sólido con función de trabajo menor, emitirá más electrones que uno con una mayor, también se tiene una fuerte dependencia en la densidad de corriente de emisión con la temperatura.

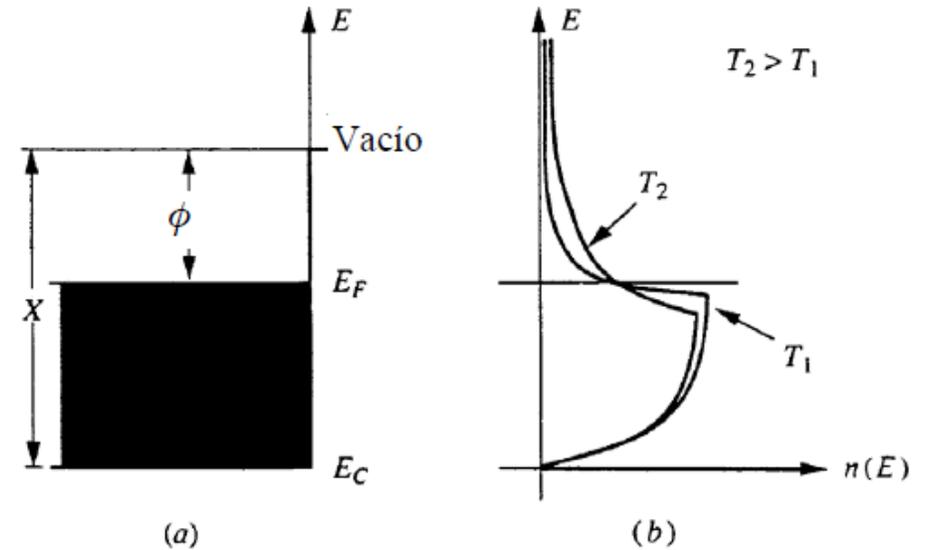


Fig. 1.3 (a) Diagramas de bandas de Energías y (b) Distribución de la energía del electrón en un sólido

3.4 Comportamiento del flujo de electrones sujeto a un campo eléctrico (Ec. de Langmuir - Child)

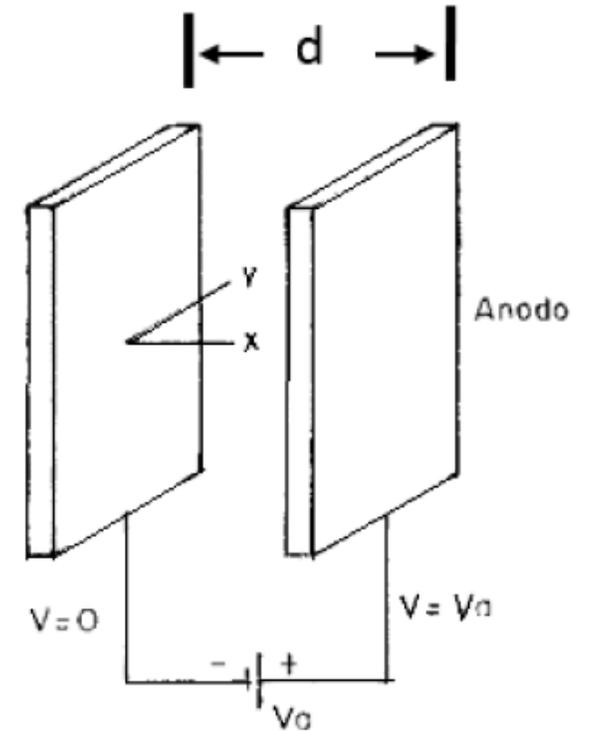
La ecuación que relaciona la densidad de electrones con el potencial en cualquier punto del espacio interelectródico, es la ecuación de Poisson,

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Donde V satisface que en $x=0$, $V(0)=0$ y en $x = d$, $V(d)= V_a$.

$$J = 2.33 \times 10^{-6} \frac{V_a^{3/2}}{d^2}$$

Obsérvese que la ecuación anterior depende sólo del potencial aplicado y la distancia de separación, ignorando la temperatura y función de trabajo del cátodo. Este resultado se conoce con el nombre de la ley de Langmuir - Child o ley de la potencia tres medios. En la práctica, los valores de la densidad de corriente pueden ser menores que los predichos por la ecuación (1.11) debido a que la emisión de electrones en el cátodo está limitada por la temperatura del mismo principalmente cuando ésta es baja.



Potenciales y aspectos geométricos del diodo

3.5 Efecto Schottky

La derivación de la ecuación de emisión termoiónica está basada solo en los electrones que vencen la función de trabajo del sólido debido a la energía térmica que tienen asociada a una temperatura dada T . Algunos de los electrones que llegan a ser libres, son forzados a salir del cátodo y se dirigen hacia el ánodo, por la aplicación de un potencial externo entre éstos 2 electrodos. A potenciales bajos la emisión característica de electrones no se modifica, pero a potenciales altos, esto es, campos eléctricos altos, la densidad de corriente por emisión termoiónica del cátodo se modifica notablemente. Este fenómeno se conoce como efecto Schottky.

La cual en términos del campo eléctrico se escribe como:

$$J_e = J_{th} \exp \left[\frac{e(e\mathcal{E} / 4\pi \epsilon_o)^{1/2}}{kT} \right] \quad (1.17)$$

El campo eléctrico aplicado externamente entonces aumenta la densidad de los electrones emitidos.

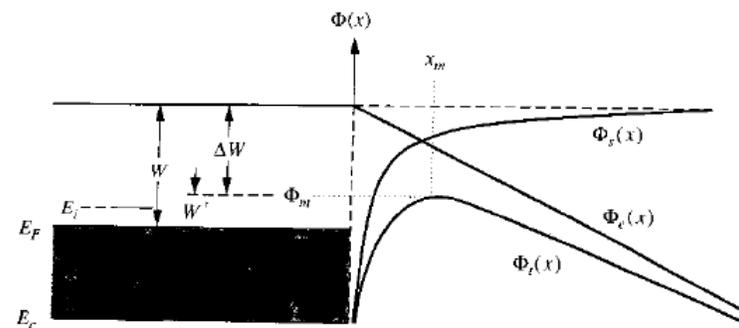


Fig. 1.5 Modificación de la barrera de potencial idealizada (línea discontinua) para un sólido con potencial imagen $\phi_s(x)$, y potencial adicional $\phi_e(x)$ debido al campo eléctrico externo aplicado.

3.6 Modelo del Diodo Ideal de Hatsopoulos

El modelo de Hatsopoulos se consideró que la densidad de corriente J a través de la carga consiste de J_{EC} fluyendo del emisor al colector menos J_{CE} fluyendo del colector hacia el emisor

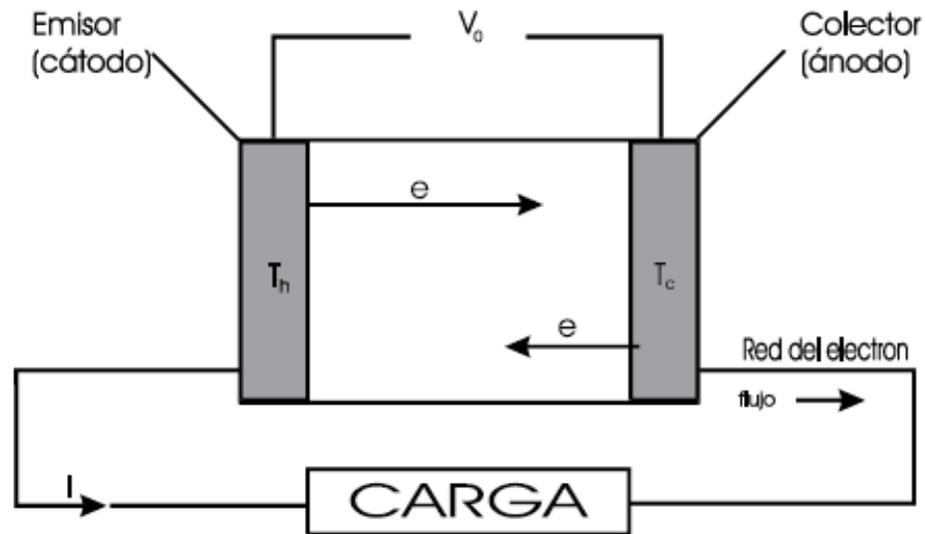


Fig. 1.6 El diodo termoiónico como convertidor de energía

3.7 METODOLOGÍA

DESCRIPCIÓN DE LOS ALGORITMOS EMPLEADOS PARA EL ESTUDIO TEÓRICO DE LA EMISIÓN NATURAL Y FORZADA.

3.7.1 Algoritmo para determinar la densidad de corriente para diferentes temperaturas en el emisor.

Se determina mediante la ecuación de Richardson - Dushman,

$$J_{th} = A_o T^2 \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right) \quad \frac{A}{m^2} \quad (1.6)$$

$$\text{Con } A_o = 1.2 \times 10^6 \quad \frac{A}{m^2 K^2}$$

Y además donde:

k = Constante de Boltzmann

ϕ = Función de trabajo

T = Temperatura absoluta (K)

Para calcular la emisión de electrones en un electrodo caliente por medio de la ecuación de Richardson - Dushman para diferentes funciones de trabajo, se definió primero el algoritmo de evaluación por medio del diagrama del flujo de la Fig. 2.1.

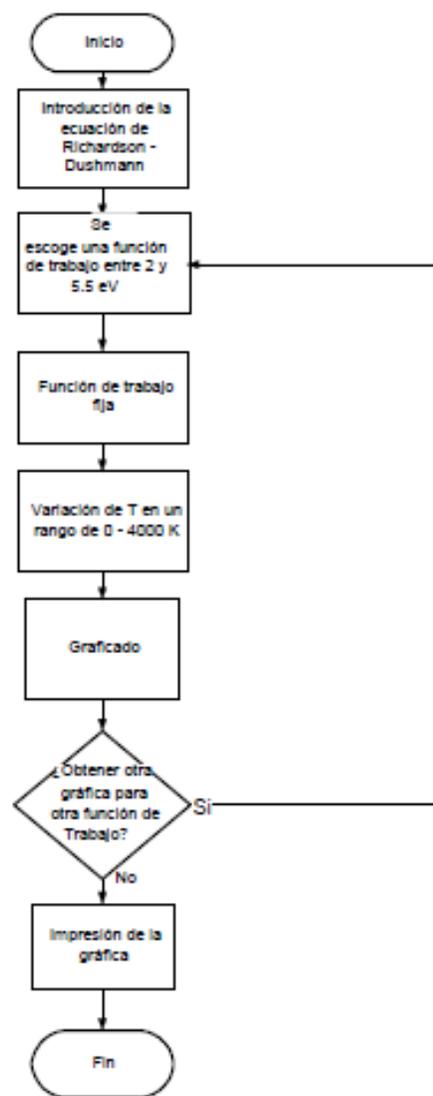


Fig. 2.1 Diagrama de flujo para calcular la emisión de electrones por medio de la ecuación de Richardson - Dushman.

3.7.2 Algoritmo para determinar el comportamiento del flujo de electrones en un diodo termoiónico.

Si un convertidor termoiónico de vacío tiene superficies de emisión y colección con dimensiones mucho mayores que el espacio interelectródico d , el flujo neto de electrones en el espacio interelectródico es casi unidireccional. Por lo tanto, la característica de la corriente de salida puede ser presentada en términos de la densidad de corriente de salida. Si la densidad de corriente de emisión inversa no es despreciable, entonces:

$$J = AT_E^2 \exp\left(-\frac{\phi_E}{kT_E}\right) - AT_C^2 \exp\left(-\frac{\phi_C}{kT_C}\right) \quad (1.19)$$

Donde:

ϕ_E = Función de trabajo en el emisor

ϕ_C = Función de trabajo en el colector

T_E = Temperatura en el emisor

T_C = Temperatura en el colector

k = constante de Boltzmann

Para evaluar el comportamiento del flujo de electrones en un diodo termoiónico de acuerdo al modelo matemático propuesto por Hatsopoulos

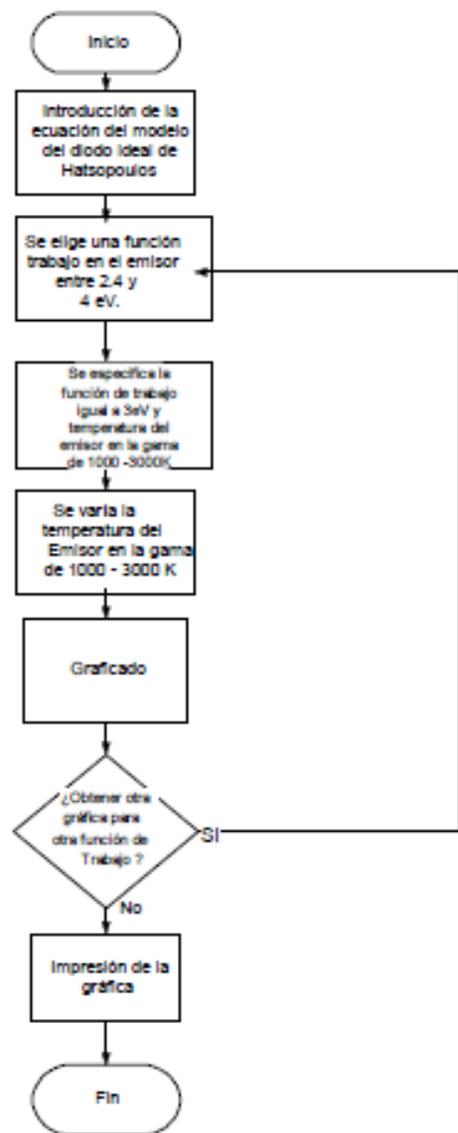


Fig. 2.2 Diagrama de flujo para calcular la emisión de los electrones en un diodo termoiónico para cuando se varía la temperatura del emisor

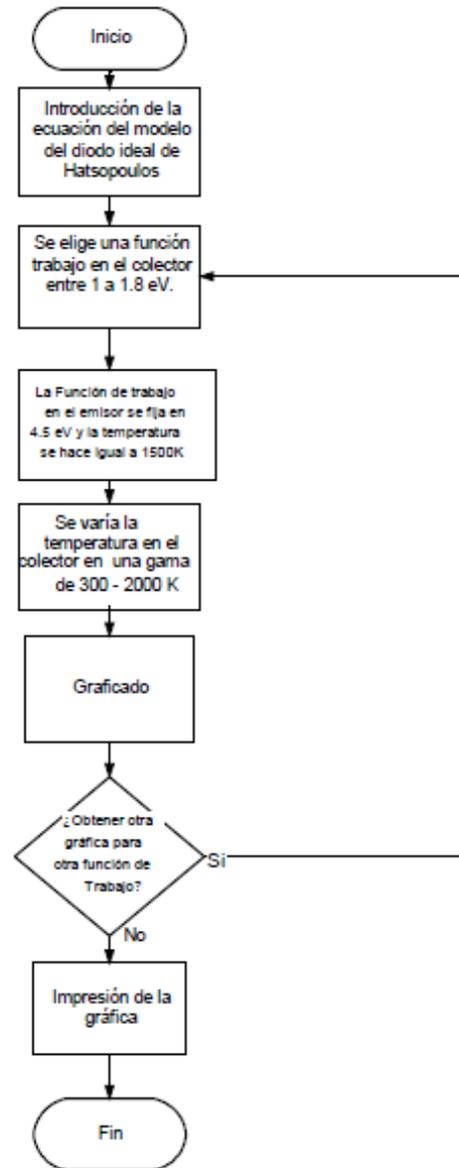


Fig. 2.3 Diagrama de flujo para calcular la emisión de los electrones en un diodo termoiónico para cuando se varía la temperatura del colector.

3.7.3 Algoritmo para determinar el comportamiento del flujo de electrones para variaciones de campo.

El comportamiento de la densidad de corriente cuando se aplica un potencial al ánodo y existe una distancia d entre los electrodos, se determina mediante la ecuación

$$J = 2.33 \times 10^{-6} \frac{V_a^{3/2}}{d^2} \quad (1.11)$$

J = Es la densidad de corriente entre los electrodos, en A/m²

V_a = Es el voltaje aplicado entre las placas, en Volts.

d = distancia de separación entre los electrodos en metros

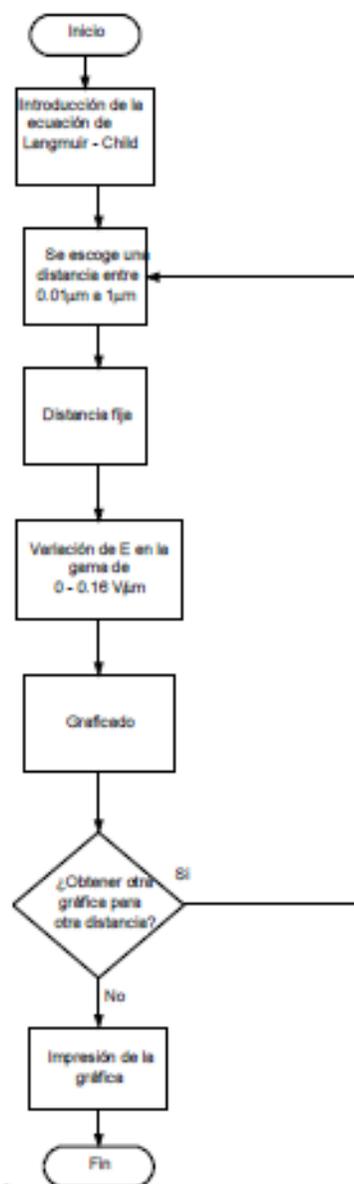


Fig. 2.4 Diagrama de flujo para determinar el comportamiento del flujo de electrones según la ley de Langmuir - Child

3.7.4 Algoritmo para determinar la densidad de corriente para variación del campo, mientras la temperatura del emisor se mantiene constante

Para calcular la densidad de corriente para variaciones del campo eléctrico cuando la temperatura del emisor se mantiene constante, se lleva al electrodo emisor a saturación, y se combinan las ecuaciones de la ley de Langmuir - Child y Richardson - Dushman, para esto se definió el algoritmo mostrado por el diagrama de flujo de la Fig. 2.5. En primer lugar, se introduce la ecuación de Langmuir - Child y se calcula para una distancia interelectródica de $0.1 \mu\text{m}$. Posteriormente, se varía el campo eléctrico en la gama de 0 a 0.16 V/mm . Por otra parte, para determinar la corriente de saturación del emisor se evalúa ésta con la ecuación de Richardson - Dushman para una función de trabajo de 4.5 eV . Se escogieron temperaturas para el emisor de 2700, 2800, 2900, 3000, 3100 y 3200 K. Por último, se combinaron los resultados obtenidos y se termina el proceso con la impresión.

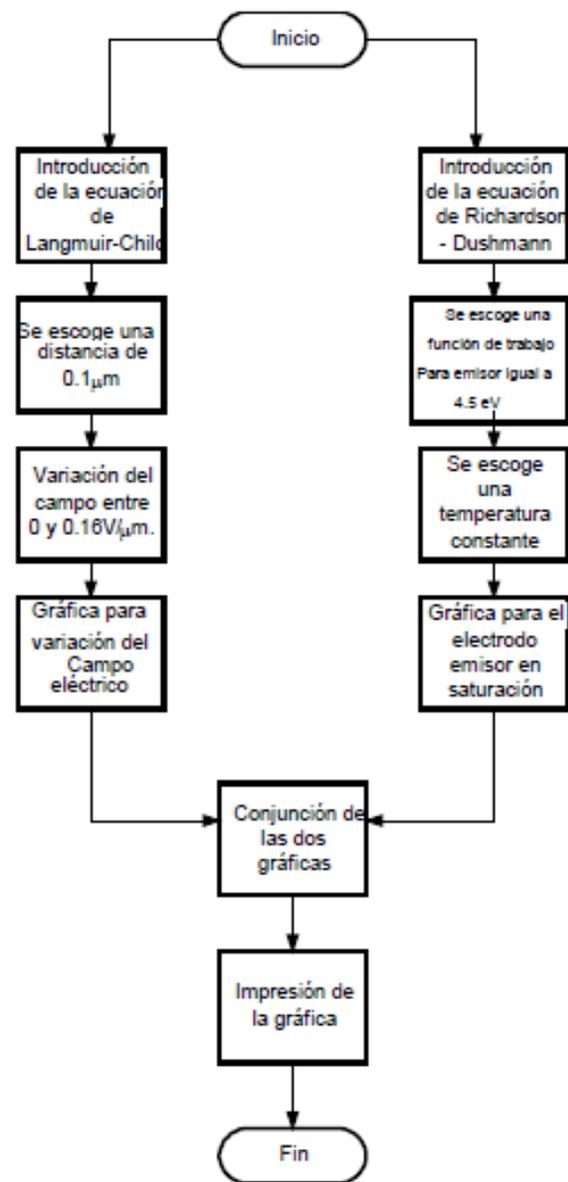


Fig. 2.5 Diagrama de flujo para determinar el comportamiento del flujo de electrones combinando las ecuaciones de Langmuir - Child y Richardson - Dushman

3.7.5 Algoritmo para evaluar el comportamiento del flujo de electrones debido al efecto Schottky

El comportamiento de la densidad de corriente para diferentes temperaturas, mientras se mantiene fija la función trabajo del emisor, se determina mediante la ecuación de Schottky, es decir:

$$J_e = J_{th} \exp\left[\frac{e(e\varepsilon / 4\pi \epsilon_o)^{1/2}}{kT}\right] \quad (1.17)$$

J_{th} = Ecuación de Richardson - Dushman

e = Carga del electrón (C)

ε = Campo eléctrico (V/m)

ϵ_o = Permitividad en el vacío (C²/Nm²)

K = Constante de Boltzmann

T = Temperatura absoluta (K) del emisor, se determina mediante la ecuación de Schottky, es decir:

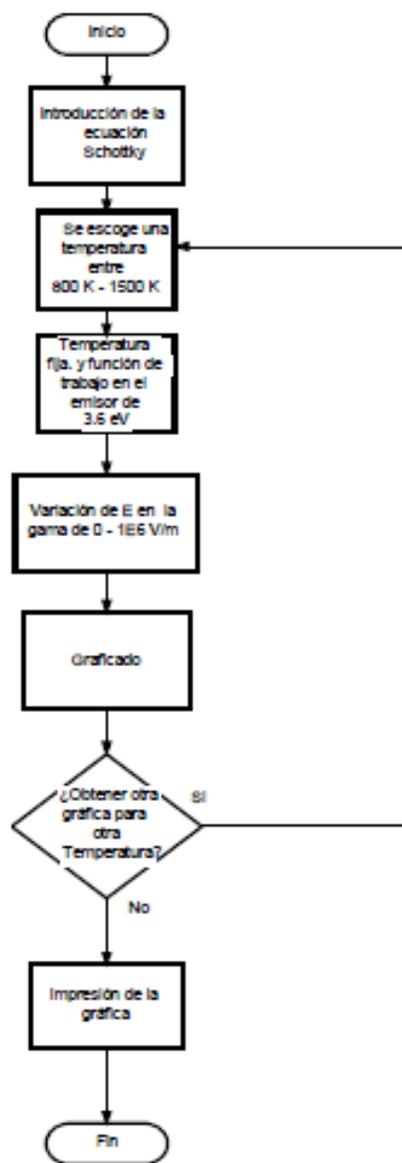


Fig. 3.6 Diagrama de flujo para determinar el comportamiento del flujo de electrones debido al efecto Schottky.

Algoritmo para determinar el comportamiento I vs V de un convertidor termoiónico ideal

Para determinar la corriente con respecto al voltaje en un convertidor termoiónico ideal, se utiliza la ecuación de corriente de emisión 2.11.

$$J = AT_E^2 \exp\left(-\frac{\phi_E}{kT_E}\right) - AT_C^2 \exp\left(-\frac{\phi_C}{kT_C}\right) \quad (1.19)$$

$$y \quad \phi_E = \phi_C + eV$$

Donde:

ϕ_E = Función de trabajo en el emisor

ϕ_C = Función de trabajo en el colector

T_E = Temperatura en el emisor

T_C = Temperatura en el colector

k = constante de Boltzmann

V = Voltaje en la carga

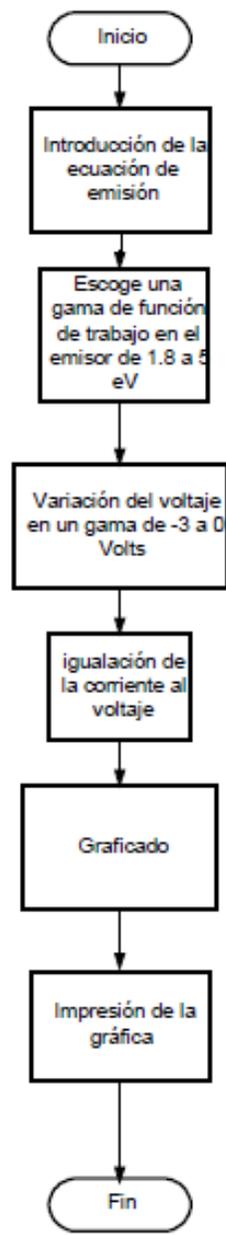


Fig. 2.7 Diagrama de flujo para determinar el comportamiento de un diodo ideal empleando la ecuación 1.11 desarrollada por Hatsopoulos.

RESULTADOS

Comportamiento de la densidad de corriente del emisor de un diodo termoiónico para diferentes temperaturas.

Para determinar el comportamiento de la densidad de corriente generada para diferentes temperaturas, se consideró la temperatura en el emisor en una gama de 300 a 3000 K, para una variación de la función de trabajo del emisor de 2.5 a 5 eV con incrementos de 0.5 eV; con estas condiciones se encontró el comportamiento de la densidad de corriente para diferentes temperaturas en el emisor como se muestra

el inicio de la emisión de electrones en el electrodo requiere de una mayor temperatura para una función de trabajo alta que para una función baja.

Para una función de trabajo de 2.0 eV, la emisión apreciable inicia alrededor de los 1250 K.

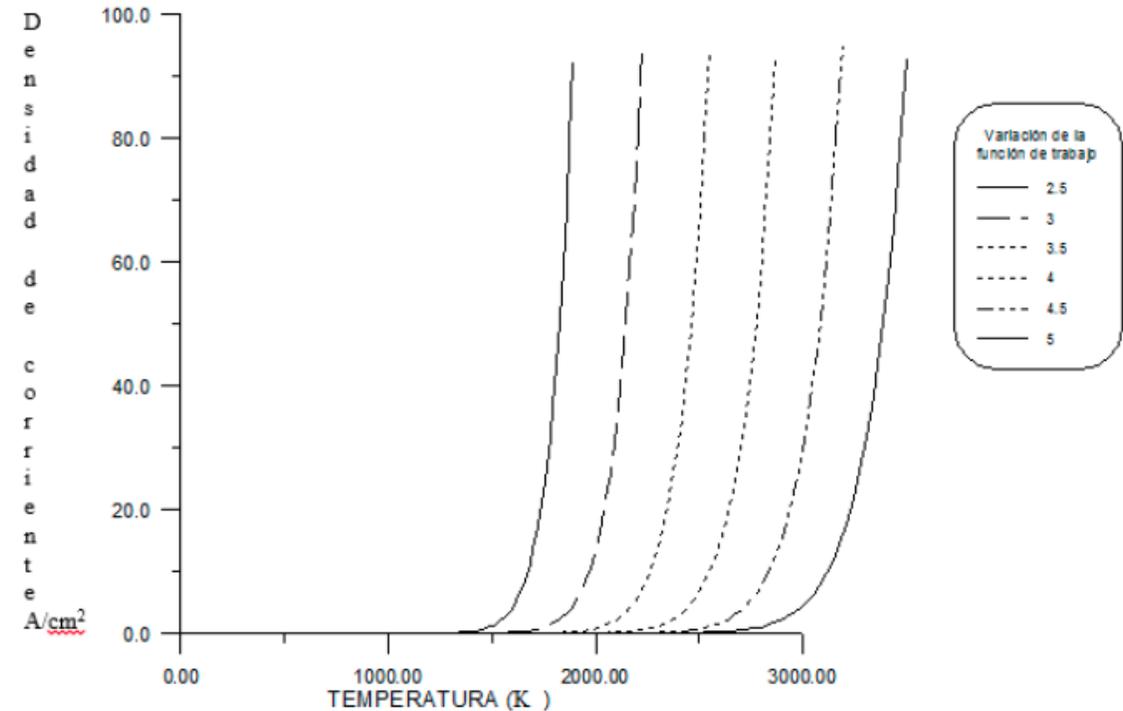


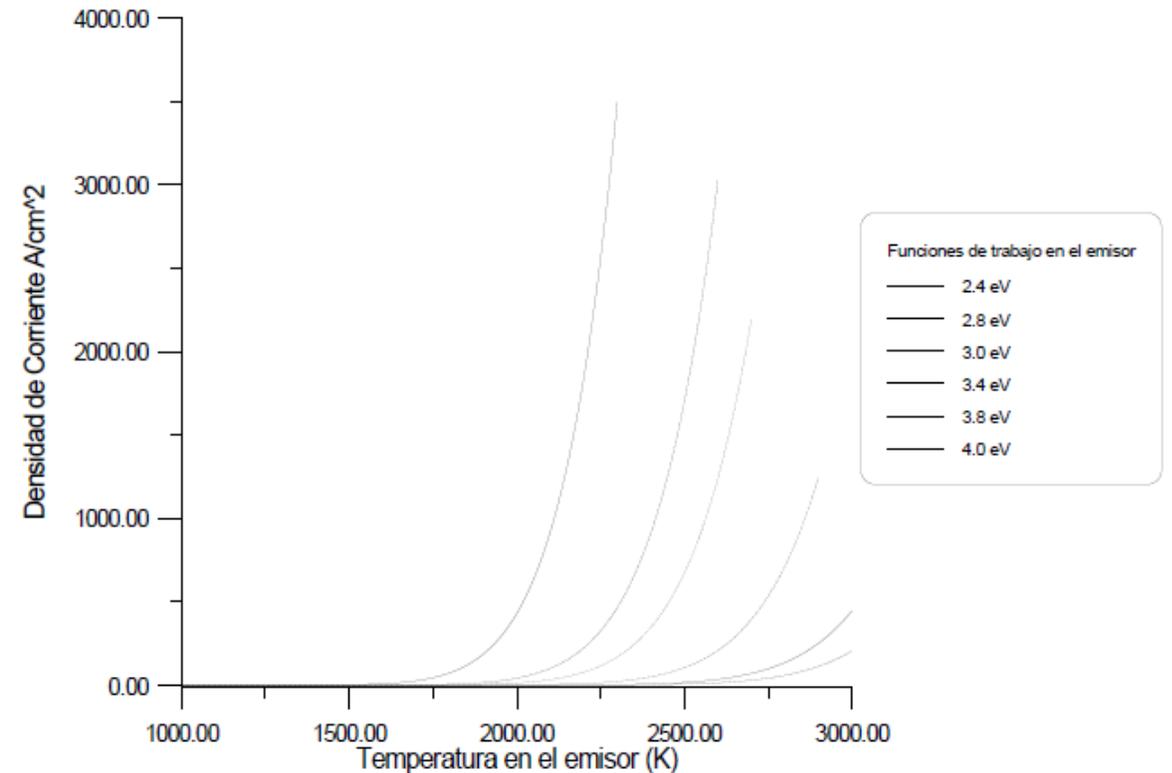
Fig. 3.1. Comportamiento de la densidad de corriente en el electrodo emisor, como función de la temperatura para diferentes funciones de trabajo

Convertidor termoiónico de vacío

Para determinar el comportamiento de la densidad de corriente en un diodo de vacío se propusieron las siguientes condiciones:

Variaciones de T en el rango de 1000 a 3000K, funciones de trabajo en el emisor entre 2.4 y 4 eV, temperatura en el colector constante de 800K y función de trabajo constante del mismo igual a 2 eV.

muestra las características de la densidad de corriente para diferentes funciones de trabajo en el emisor, se puede observar que para una función de trabajo menor se alcanza una densidad de corriente más alta para la misma temperatura.



se muestra la densidad de corriente para variaciones de T_c entre 300 y 1200K, funciones de trabajo en el colector entre 1 y 1.8eV a una temperatura en el emisor constante e igual a 1500K, y función de trabajo constante del mismo igual a 2.5 eV.

También la Fig. 3.3 muestra la variación de la densidad de corriente para diferentes funciones de trabajo en el colector, se observa en este caso, la inversión de la corriente en el diodo a partir de los 700K.

La inversión de la densidad de corriente no es apreciable para funciones de trabajo en el colector mayores que 1.4 eV.

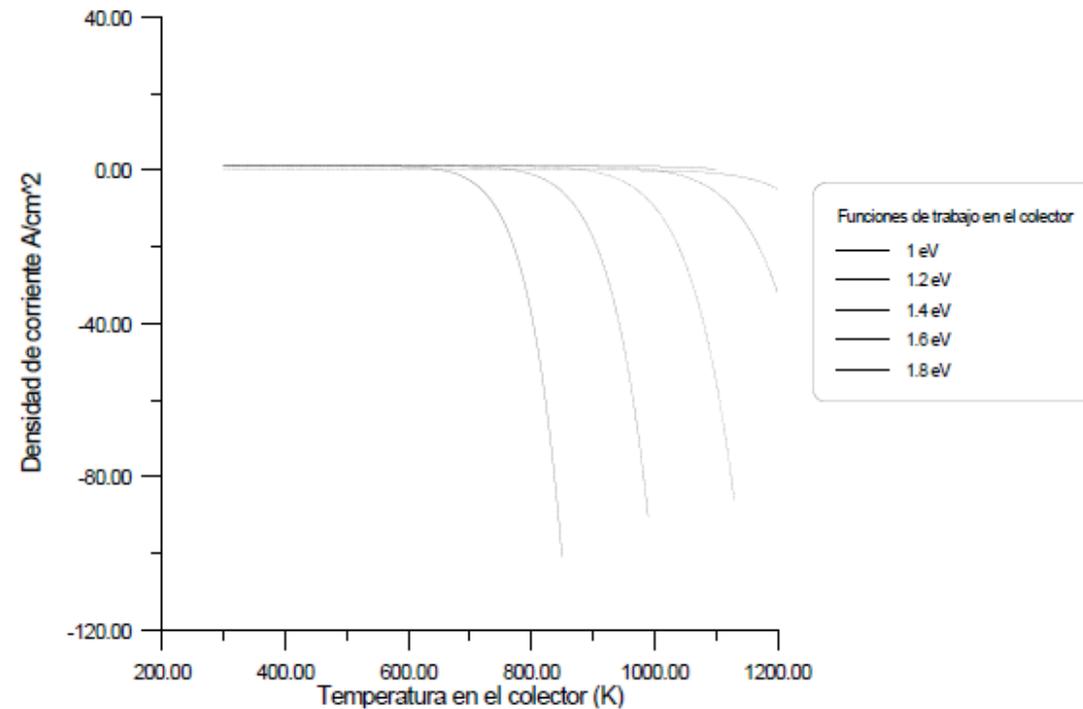
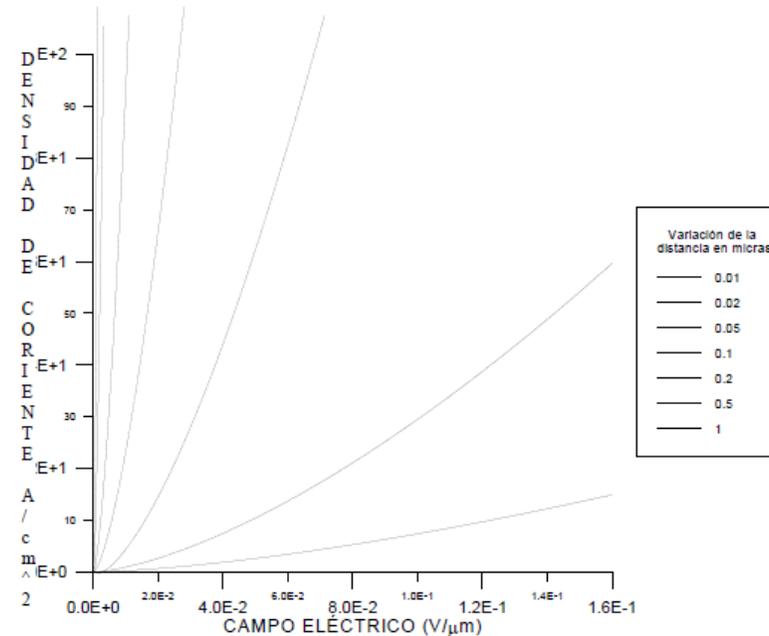


Fig. 3.3 Comportamiento de la densidad de corriente en un diodo de vacío para variaciones de temperatura en el colector y diferentes funciones de trabajo del mismo.

Para determinar el comportamiento de la densidad de corriente generada para diferentes temperaturas, se consideró los siguientes parámetros: se varió el campo eléctrico en una gama de 0 a 0.16 V/ μ m, variando la distancia interelectródica de 0.01 a 1 μ m

muestra las características de la densidad de corriente que se genera para cuando se varía el campo eléctrico, mientras la distancia interelectródica se mantiene constante. Se puede observar que, a mayores distancias se necesita de un campo eléctrico más intenso para obtener una densidad de corriente equivalente a la densidad que se obtiene para distancias menores.



3.4 Comportamiento esperado de la densidad de corriente en un diodo termoiónico, para cuando se varía el campo, mientras la temperatura del emisor se mantiene constante.

una conjunción de las dos ecuaciones de emisión electrónica lleva al electrodo emisor a una saturación. El comportamiento de la densidad de corriente creciente, lo da la ecuación de Langmuir - Child, y la saturación se establece por medio de la ecuación de Richardson - Dushman. La variable independiente es el campo eléctrico.

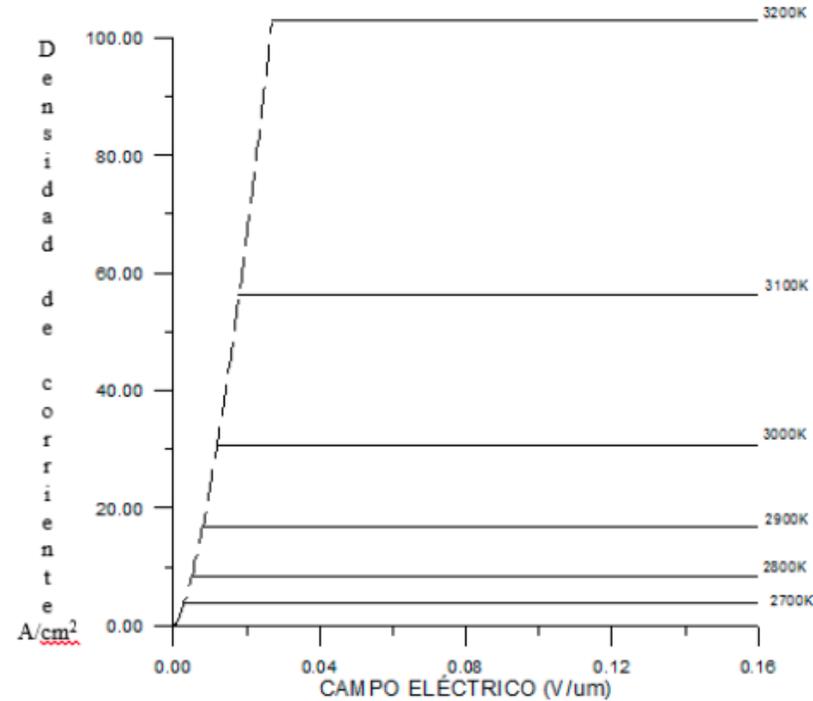


Fig. 3.5 Comportamiento de la densidad de corriente con respecto a la variación de campo para diferentes temperaturas. La separación interelectródica se mantuvo constante e igual a 0.1μm, a función de trabajo en el emisor se hizo igual a 4.5 eV

Comportamiento de la densidad de corriente en un diodo termoiónico para variación de campo según la ecuación de Schottky

En el comportamiento de la densidad de corriente para el diodo termoiónico según la ecuación de Schottky, se considera un campo eléctrico en una gama de 0 a 1.6×10^6 V/m, siendo paramétrica en la temperatura en el rango de 1000 a 3000 K en el emisor, con incrementos de 500K, manteniendo una función de trabajo en del mismo de 4.5 eV.

muestra las características de la densidad de corriente para diferentes temperaturas, cuando se varía el campo eléctrico y función de trabajo constante en el emisor. Se puede observar que para las diferentes condiciones de temperatura, el campo eléctrico genera un incremento adicional de la densidad de corriente en contraste con el punto de saturación calculado con la ecuación de Richardson - Dushman. Esto puede verse como una modulación del punto de saturación generada por el campo eléctrico externo.

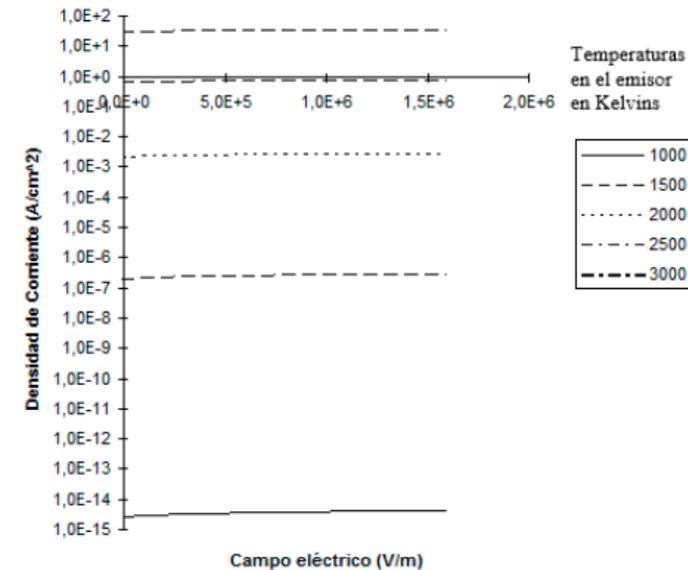


Fig. 3.6. Comportamiento de la densidad de corriente emitida por un electrodo emisor para variaciones de campo. La función de trabajo del emisor se mantiene constante e igual a 4.5 eV.

Comportamiento I vs V de un convertidor termoiónico ideal

determinar el comportamiento esperado de la corriente contra el voltaje de un convertidor termoiónico ideal, se propuso un caso particular. En este ejemplo, se supone que la función de trabajo en el emisor es de 2.8 eV, la función de trabajo del colector es de 1.8 eV, la temperatura del emisor de 1364 K, la temperatura del colector se considera de 600K, y un área de emisión en el emisor de 2 cm².

el diodo ideal tiene un crecimiento con respecto al voltaje, que inicia en -1.8V y termina en el punto de 20 mA

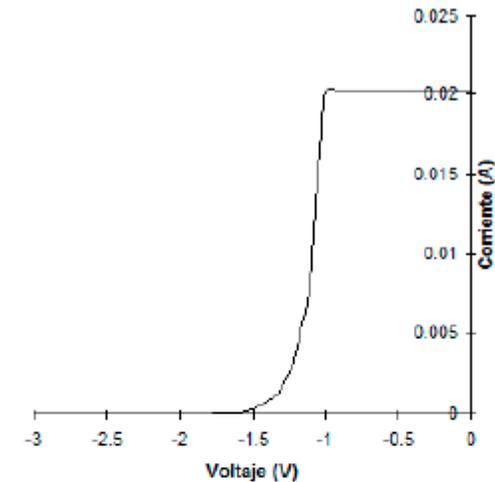


Fig. 4.7 Comportamiento de la corriente generada por un convertidor termoiónico ideal; para funciones de trabajo en el emisor y colector de 2.8 eV, 1.8 eV. Respectivamente, la temperatura en el emisor es de 1364K y en el colector es de 600 K, además, el área efectiva de emisión es de 2 cm².

Comportamiento I vs V de un convertidor termoiónico

Para determinar el comportamiento esperado de la corriente contra el voltaje de un convertidor termoiónico, se propuso un caso particular. En este ejemplo se supone que la función de trabajo del emisor es de 2.8 eV, la función de trabajo del colector es igual a 1.8 eV. La distancia interelectródica es de 0.8 mm. La temperatura del emisor es de 1364 K, y la temperatura del colector se considera de 600 K, el área de emisión es de 2 cm².

Es una conjunción de las ecuaciones de emisión electrónica define el comportamiento esperado de la corriente en función del voltaje para el convertidor termoiónico propuesto. El punto de inicio corresponde a la condición de circuito abierto desarrollada por Hatsopoulos. El crecimiento inicial de la corriente lo da la ecuación de Langmuir - Child, y llegando al punto de intersección con la ecuación del campo eléctrico empieza a predominar la ecuación de Schottky. El comportamiento plano corresponde a la saturación del diodo y el leve levantamiento de la curva se debe al campo eléctrico externo aplicado. Obsérvese que cuando el campo eléctrico es cero, la magnitud de la corriente coincide con la corriente de saturación definida por la ecuación de Richardson - Dushman.

También se observa el comportamiento ideal del convertidor termoiónico y el comportamiento esperado cuando se consideran todas las condiciones de emisión.

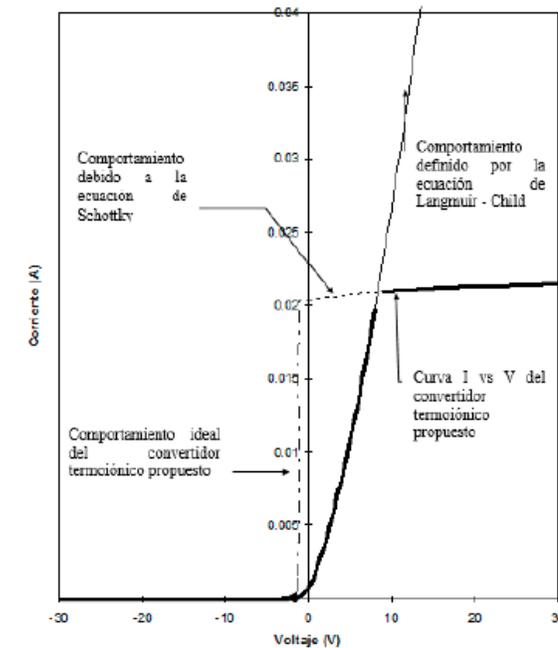


Fig. 3.8 Superposición de las curvas definidas por las ecuaciones Langmuir - Child y Schottky para el caso particular de un convertidor termoiónico. En este ejemplo; $\phi_e = 2.8 \text{ eV}$, $\phi_c = 1.8 \text{ eV}$, la distancia interelectródica es de 0.8 mm., la temperatura en el emisor es igual a 1364 K, y en el colector es de 600K.

CONCLUSIONES

Se recopiló y organizó la teoría que ha sido desarrollada para explicar la emisión de electrones entre los electrodos de un convertidor termoiónico.

Se desarrollaron los algoritmos que permiten el empleo de las ecuaciones que de manera predominante explican la emisión de electrones.

La teoría se organizó de tal manera que se pudieran obtener en forma independiente, el comportamiento de la densidad de corriente de un diodo termoiónico en función de: la función de trabajo, la temperatura, el campo eléctrico y la separación interelectródica.

Se evaluaron casos prácticos relacionados con la emisión electrónica esperada para un convertidor termoiónico.

Se observó la importancia de contar con bajas funciones de trabajo tanto en el colector como en el emisor, a fin de trabajar a bajas temperaturas.

La separación interelectródica es un parámetro crítico, para obtener altas densidades de corriente.

Fue factible simular el comportamiento de un diodo termoiónico sujeto a un campo eléctrico, desde el nacimiento de la curva, hasta la saturación. Una posible aplicación de este trabajo consiste en estudiar el comportamiento de la emisión de electrones en estructuras termoiónicas nanométricas. Este estudio puede ser empleado para desarrollar los convertidores termoiónicos de espaciamiento cercano, y también para estudiar la emisión por campo alto; esto último puede ser útil para el desarrollo de la microelectrónica de alto vacío

REFERENCIAS

- S.W. Angrist, (1982) *Direct Energy Conversion*, Boston Allyn and Bacon Inc.
- G.N. Hatsopoulos, (1956), *The Thermoelectron Engine*, M. I. T: (Sc. D. Dissertation)
- G.N Hatsopoulos, E.P Gyftopoulos, (1978) *Thermionic Energy Conversion*, Vol I: Theory, Technology, and Application Massachusetts: MIT Press, Cambridge.
- C.I., Hemenway, R.W Henry, M.Coulton (1983), *Física Electrónica*, México: Limusa, Noriega Editores.
- A.M. Ferendeci, (1991), *Physical Foundations of Solid State and Electron Device*, New York: Mc. Graw-Hill, Inc.
- J. Millman, S. Seely, (1951), *Electronics*, Mc. Graw-Hill Second edition.
- R. Decher, (1977) *Direct Energy Conversion (Fundamentals of electric power production)*, Oxford: University Press.
- A, Dimarco (1962), *Electronica*, Argentina: El ateneo.
- Wilson, V. C. (1959). Conversion of heat to electricity by thermionic emission. *Journal of applied physics*, 30(4), 475–481. <https://doi.org/10.1063/1.1702391>
- Liang, S.-J., & Ang, L. K. (2015). Electron **Thermionic Emission from Graphene and a Thermionic Energy Converter**. *Physical Review Applied*,3(1). <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.3.014002>
- Zhao, M., Fang, S., Jiang, Z., & Yu, J. (2023). Mathematical model establishment and optimum design of a novel cesium thermionic–thermoelectric hybrid generator. *Applied Thermal Engineering*, 120995, 120995. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120995>



© MARVID-Mexico

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. VCICA is part of the media of MARVID-Mexico., E: 94-443.F: 008- (www.marvid.org/booklets)