

Metodología para la obtención del Rango de Trabajo de un transistor como Elemento de Control en una Fuente de Corriente DC

Methodology to obtain the linear range of a transistor as a control element in a DC current source

*Yurany A. Osorno, John Ever Muñoz, Nelson Londoño, Esteban Velilla**

Grupo de Manejo Eficiente de la Energía – GIMEL, Universidad de Antioquia.
A.A. 1226. Medellín, Colombia.

(Recibido el 10 de enero de 2012. Aceptado 30 de mayo de 2013)

Resumen

Se presenta una metodología concebida para el diseño de fuentes de corriente DC, aprovechando las características de los transistores BJT en su región de trabajo lineal (región activa), región que depende de la tensión de codo, la potencia máxima que puede soportar éste y la tensión de polarización; a partir de estos parámetros se identifica el rango de la resistencia de carga que garantiza la corriente constante. La metodología es empleada para implementar un prototipo de fuente de corriente DC de 2A en un rango de resistencia determinado por las características del transistor, garantizando las respectivas restricciones de potencia y temperatura.

----- *Palabras Clave:* Fuente de corriente DC, transistor BJT, tensión de polarización, tensión de codo, región de trabajo, potencia máxima, resistencia de carga

Abstract

This paper presents a methodology to develop direct current sources using BJT transistors on the linear region (active region). This region depends on the saturation voltage, maximum power and polarization voltage of the element; from these parameters it is obtained the load resistance range that ensures a constant current. The methodology is used to develop a DC current source prototype of 2A and the range of the load resistance is defined by the transistor characteristics. The temperature and power constrains are taking into account.

----- *Keywords:* Direct current source, BJT transistor, polarization voltage, saturation voltage, active region, maximum power, loads resistance

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 4 + 219 85 96, fax: + 57 + 4 + 211 05 07, correo electrónico: evelilla@udea.edu.co (E. Velilla)

Introducción

Una de las prácticas más comunes en los laboratorios de circuitos eléctricos están relacionadas con la validación de los teoremas de Thevenin y Norton, para los cuales se requieren de fuentes de tensión y fuentes de corriente respectivamente [1-5]; las fuentes de voltaje son de uso frecuente, por tanto de fácil adquisición y se ofrece una amplia gama de opciones comerciales (tensiones, corrientes, potencias), sin embargo, las fuentes de corriente son menos comunes y más restringidas en su comercialización, ofreciéndose rangos muy estrechos de corrientes y potencias. Las fuentes de corrientes son utilizadas en equipos de medición para caracterizar la resistencia o la impedancia de ciertos elementos (como los telurómetros), en algunos laboratorios para validar el teorema de Norton y en aplicaciones de electro medicina o electro química para llevar a cabo algunos procesos que requieren corrientes constantes.

Las fuentes de corriente se caracterizan por mantener constante la corriente, independiente de la carga, y pueden suministrar corriente A.C, D.C o tipo impulso. Para el caso particular de las fuentes de corriente continua (FCDC) se documentan varias alternativas de diseño que van desde la utilización de dispositivos electrónicos básicos como transistores BJT y FET, amplificadores operacionales y circuitos realimentados, hasta sistemas discretos como son la utilización de circuitos de suicheo de elementos de potencia [6 - 9]. Cuando se usan los transistores BJT y FET, su desempeño depende principalmente de la región de trabajo (curvas características) en la cual operan y de los niveles de corriente de la carga.

Con el fin de obtener corrientes de pocos amperios, algunos autores proponen utilizar amplificadores operacionales y combinación de tecnologías (BJT, FET, MOSFET y JFET) [6-9], sin embargo, los modelos presentados para altas corrientes (aproximadamente 5A), presentan complejidades adicionales en el diseño de una FCDC y su operación está restringida a un rango

muy estrecho de corrientes y resistencias de carga.

En este artículo, se presenta una revisión general de las particularidades y problemáticas de las fuentes de corriente continua y se propone una metodología para el diseño de una FCDC, a partir, de la utilización de transistores BJT. Dicha metodología se utiliza en la concepción, diseño e implementación de un prototipo de fuente de corriente constante de 2A, para el rango de resistencia de carga de 4.8 a 23.99 Ω .

Generalidades de la FCDC

Las fuentes de corriente presentan particularidades en la operación, enlazadas a la interdependencia entre la corriente, la tensión de polarización, la impedancia de carga y el elemento de control (transistores BJT, FET, MOSFET, entre otros). Esta relación se puede observar al hacer un análisis circuital de cada una de las variables eléctricas involucradas, en el caso particular de una FCDC utilizando como elemento de control un transistor BJT (figura 1), se obtienen las ecuaciones (1-3).

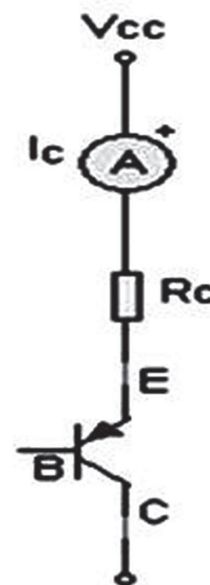


Figura 1 Modelo de FCDC utilizando como elemento de control un transistor BJT

$$V_{CC} = V_{CE} + V_{RC} \quad (1)$$

$$P_{CE} = P_{CC} - P_{RC} \quad (2)$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C \quad (3)$$

Donde:

I_C Corriente de colector (Carga)

R_C Resistencia de carga

V_{CC} Tensión de polarización

V_{RC} Tensión resistencia de carga

V_{CE} Tensión colector-emisor

P_{CC} Potencia de la fuente de alimentación

P_{RC} Potencia de la resistencia de carga

P_{CE} Potencia elemento de control (Transistor BJT)

De las ecuaciones (1) a (3), se observa que:

- Si se asume una V_{CC} y una I_C constante, en la medida que aumenta R_C , aumenta V_{RC} , lo que limita la operación de la FCDC a valores de R_C , restringidos a la relación: $R_C < \frac{V_{CC} - V_{CEmin}}{I_C}$, donde V_{CEmin} corresponde al voltaje mínimo del transistor BJT para garantizar la operación en un rango lineal.
- Bajo las mismas condiciones anteriores, si R_C es muy pequeña, el elemento de control deberá disipar una potencia de $P_{CE} = (V_{CC} - R_C \cdot I_C) \cdot I_C$, lo cual restringe el valor de dicha resistencia a la capacidad del elemento de control (transistor más disipador).
- Si se precisa una fuente que opere en amplios rangos de corriente, es necesario entonces evaluar las restricciones de V_{CC} y R_C .

De esta manera, “Diseñar una FCDC para un amplio rango de valores de corriente y resistencias”, implica muchas limitaciones, exigiendo la restricción tanto de rangos de corriente como de R_C .

Restricciones de los transistores

Como elemento de control en la FCDC se decidió trabajar con transistores BJT de potencia, dado que por su principio de operación en su región activa, ofrece un comportamiento lineal de I_C , con lo que se puede esperar una I_C constante ante variaciones de la R_C [6] (figura 2).

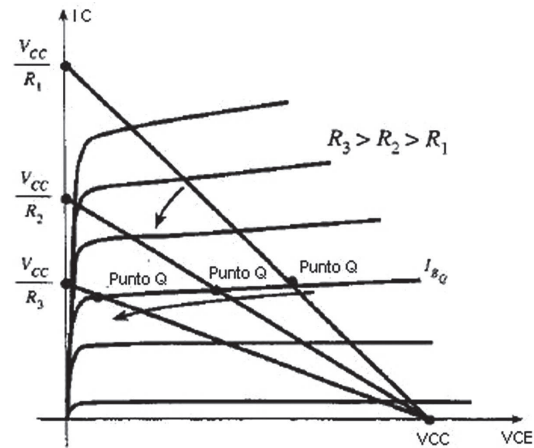


Figura 2 Curvas características del transistor ideal

No obstante, al analizar los transistores operando bajo corrientes y potencias relativamente altas, se evidenció que esta propiedad es válida para rangos pequeños de I_C . Por ejemplo, al evaluar el comportamiento del transistor (MJ15025), que nominalmente permite corrientes del orden de 15A [10], se observó que para valores de I_C aproximadamente de 3A, el transistor no operó linealmente y la I_C presentó una variación muy notoria para cambios de V_{CE} .

Esta dificultad, exigió reevaluar los conceptos de diseño y elección del dispositivo de control (BJT), fuentes de alimentación y rangos de carga, que a su vez, motivó proponer una metodología que facilite al diseñador elegir los elementos y rangos apropiados de trabajo, cuando se diseñen fuentes de corriente mediante transistores BJT, debido a que las expresiones resultantes del análisis circuital, evidencian la importancia de controlar cada uno de los parámetros involucrados, con el fin de conocer el punto de linealidad de la I_C .

y mantener un nivel de potencia adecuado del dispositivo de control.

Metodología

Como resultado del análisis y restricciones mencionadas, es clara la dificultad de diseñar fuentes de corriente en amplios rangos de operación, evidenciándose la necesidad de facilitar la elección de los dispositivos ajustados a las necesidades y condiciones más apropiadas para el diseño de una FCDC basada en transistores BJT; para ello, se propone un procedimiento sistemático que ayuda a identificar la región de trabajo del transistor y los rangos de tensión y carga soportados por el elemento de control.

El transistor BJT como elemento de control de una FCDC

La región de trabajo del transistor estará dada por el rango de valores de R_C que permite una I_C constante ante las variaciones de R_C , lo cual se puede lograr bien sea controlando la corriente de base (I_B) por medio de la tensión de control (V_{DC}), o variando la resistencia de base (R_B) (figura 3).

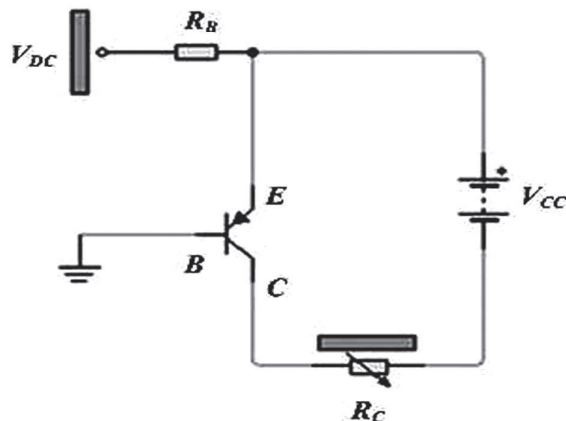


Figura 3 Montaje con transistor pnp y

Para encontrar la región de trabajo del transistor BJT como elemento de control en una FCDC, se propone:

1. Hallar las curvas características reales del transistor a utilizar. Teóricamente deberían

ser similares a las curvas mostradas en la figura 2, sin embargo, cuando los valores de I_C son relativamente altos, las curvas difieren mucho de las ideales y las tensiones de codo (V_{SA}) varían significativamente con la corriente (Figura 4); adicionalmente, la I_C deja de ser constante, por lo que es muy importante registrar el punto donde dicha corriente es aproximadamente constante ante las variaciones de V_{CE} .

2. Identificar el voltaje de saturación V_{SA} , valor que permitirá definir la resistencia máxima de carga (R_{max}) (Figura 4).
3. Definir la I_C deseada, identificar la I_B con lo cual es posible calcular la ganancia del transistor (β), expresión (4).

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (4)$$

4. Graficar la curva de potencia máxima (P_{Cmax}), valor que dependerá de la capacidad del transistor. Se recomienda manejar potencias de aproximadamente el 25% de la capacidad teórica máxima registrada en la hoja de datos técnicos del dispositivo [10], este dato es indispensable para el cálculo de la resistencia mínima de carga (R_{min}) (figura 4).

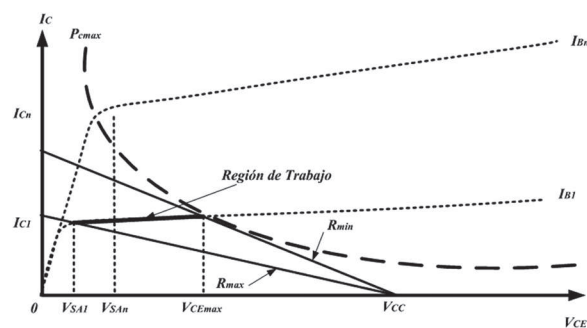


Figura 4 Región de trabajo del transistor como fuente de corriente

En la figura 4 se presentan las curvas características para un transistor BJT, siendo la región de trabajo la delimitada por los puntos de intersección de la curva de I_{B1} con la curva de P_{Cmax} y con V_{SA1} .

Observándose que para una I_B relativamente alta (I_{Bn}), la línea de tensión de codo V_{SA1} corta la recta de I_C por encima de la equipotencial P_{Cmax} , indicando que este valor de I_C está por fuera de la región de trabajo; adicionalmente, en la medida que se aumenta I_B , la pendiente de la I_C en la región activa cambiará, y por tanto ésta no será constante.

La figura 4 ilustra el caso particular de la I_{B1} , en el cual se identifica las rectas de carga permitidas, cuando se polariza el sistema con una tensión V_{CC} . La pendiente de las rectas, en cada caso definirán R_{min} y R_{max} para garantizar que la fuente de corriente sea constante y que no exceda los límites de potencia ni de operación [5-6]. En consecuencia, a medida que se va aumentando I_B , se disminuye el rango de variación de la resistencia de carga $[R_{min} - R_{max}]$. Obsérvese la dependencia de este rango con los valores obtenidos anteriormente: P_{Cmax} , V_{CEmax} , V_{SA} y la V_{CC} .

Rango de resistencia de carga

Conocidas las características y limitaciones del transistor, el procedimiento para hallar las resistencias R_{min} y R_{max} de cada curva, para una fuente de corriente específica, es el siguiente:

- Se define una V_{CC} .
- Se registran los datos medidos en las pruebas de laboratorio y se hallan las curvas características del transistor. Tomándose los siguientes datos: V_{DC} , Voltaje base-emisor (V_{BE}), I_B , V_{RC} , I_C , β , V_{SA} .
- Se define la curva equipotencial, con base en la capacidad del transistor [11]. En la figura 5, se ilustra un conjunto de curvas para diferentes potencias.
- El cruce de la curva de I_{C1} deseada, con la curva equipotencial del transistor, definirá el V_{CEmax} admisible para no destruir el transistor (figura 4).
- Se hallan las resistencias R_{min} y R_{max} con las expresiones (5) y (6) respectivamente, estos 2 valores definirán el rango dónde la I_C permanecerá aproximadamente constante. Las ecuaciones (5) y (6), se deducen de la figura 4.

$$R_{min} = \frac{V_{CC} - V_{CEmax}}{I_{C1}} \quad (5)$$

$$R_{max} = \frac{V_{CC} - V_{SA1}}{I_{C1}} \quad (6)$$

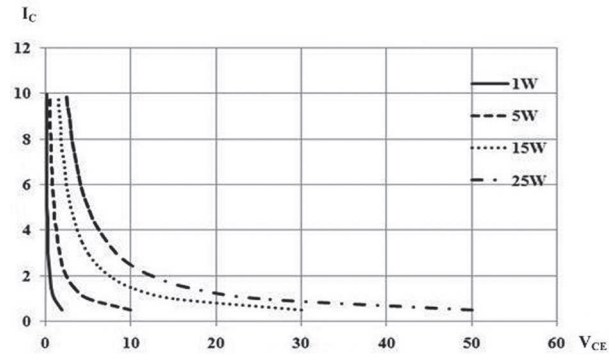


Figura 5 Curvas equipotenciales

Es importante resaltar que para una FCDC definida, los rangos de R_C varían ostensiblemente con V_{CC} , de tal suerte que cuando se requieren pequeñas corrientes, es posible polarizar el transistor con tensiones relativamente altas, con lo que el rango de resistencias de carga se hace más amplio, mientras que para valores de corriente muy altas, V_{CC} ha de ser relativamente pequeño para garantizar un rango de R_C que permita mantener constante el valor deseado de corriente. Esta dependencia está restringida por las características y requerimientos de la aplicación.

FCDC implementada

Con el fin de ejemplificar los procedimientos y validar el análisis previo, se diseñó e implementó un prototipo de FCDC de 2A organizado por módulos (M) que representan cada una de las partes del prototipo desarrollado (figura 6):

- M1 garantiza mediante una fuente de tensión regulada, una I_B que controla la I_C deseada.
- M2 suministra la tensión necesaria para alimentar la FCDC, que permite polarizar el transistor. La tensión se obtiene mediante: la transformación de la magnitud de la señal de $110V_{ac-rms}$ a $36,7V_{ac-rms}$, la rectificación y el filtrado de la señal, para disminuir el rizado. Con ello se logra un $49,1V_{dc}$, que no requiere ser muy regulado.

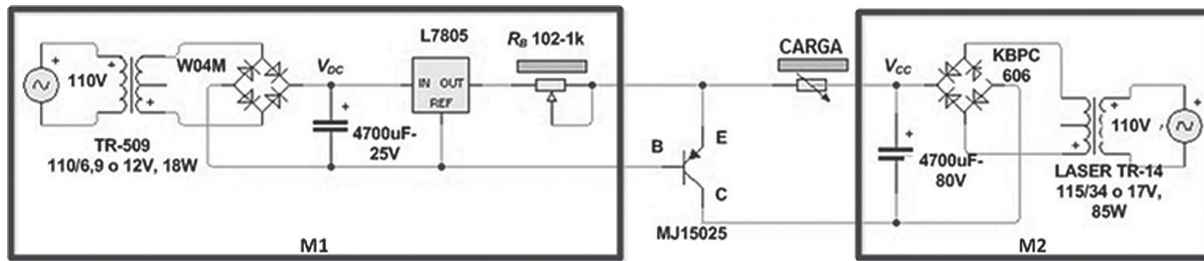


Figura 6 FCDC implementada

Desarrollo de la metodología (Caso de Estudio)

Con miras a ilustrar la metodología propuesta, a continuación se explica el procedimiento seguido, en el diseño de la fuente de 2A.

Se hallaron las curvas características reales del transistor *MJ15025*, para determinar su variación de ganancia con el cambio de I_B e I_C , con miras a identificar la región activa del transistor; además, se identificó el rango de tensión que hay entre V_{SA} y la intercepción con la curva equipotencial, siendo estos los límites para evitar el calentamiento excesivo del transistor.

De las curvas reales del transistor halladas con un osciloscopio digital, partiendo del montaje de la figura 7 y cambiando la I_B , se tomó la medida de I_C y V_{SA} , para cada caso. Se registraron otros parámetros de interés como: la tensión base-emisor (V_{BE}), V_{CC} y R_B .

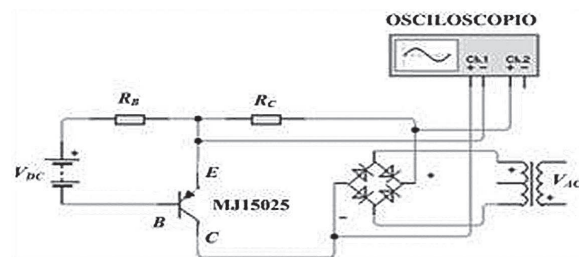


Figura 7 Montaje para hallar las curvas características del transistor

Es importante garantizar que las curvas características del transistor utilizado, presente el comportamiento mostrado en la figura 2. Por tanto, para determinar los parámetros reales del transistor (*MJ15025*), se polarizó el transistor a una tensión de $49,1V_{dc}$, poniéndose una R_C y una R_B aproximadamente constante de 14Ω y 220Ω respectivamente, y se varió V_{DC} para obtener una variación de I_B con el fin de determinar la variación de la I_C , la estabilidad de la ganancia y la capacidad máxima del transistor.

En la tabla 1 se registran los valores y parámetros medidos experimentalmente. A partir de estos valores, se observa que la corriente máxima obtenida con este tipo de transistor, sin causar daños a éste fue de aproximadamente 3A, a pesar de que su capacidad teórica es de 15A [10]. Para un incremento mayor de corriente, la ganancia deja de ser constante, lo que disminuye la eficiencia del transistor, y la potencia aumenta considerablemente a medida que se incrementa I_C . Es de resaltar que la tensión entregada por el transformador que se utilizó para polarizar el transistor, permite una región de trabajo mayor, sin embargo la potencia máxima que puede soportar el transistor la limita.

Tabla 1 Resultados experimentales del transistor MJ15025

V_{dc} [V]	V_{BE} [V]	I_B [mA]	V_{RC} [V]	I_C [A]	β	V_{SA} [V]
1	0,584	0,420	1,0	0,075	178,57	0,4
2	0,614	1,400	3,2	0,239	170,71	0,4
3	0,624	2,400	5,0	0,373	155,42	0,4
4	0,635	3,399	7,0	0,522	153,57	0,4
5	0,655	4,389	9,5	0,709	161,54	0,6
6	0,665	5,389	11,5	0,858	159,21	0,6
8	0,675	7,399	14,5	1,082	146,24	0,8
10	0,705	9,389	17,0	1,269	135,16	1,0
12	0,725	11,389	22,0	1,642	144,17	1,2
14	0,743	13,390	25,0	1,866	139,36	1,2
16	0,755	15,399	28,0	2,089	135,66	1,2
18	0,771	17,403	32,0	2,388	137,22	1,2
20	0,788	19,406	34,0	2,537	130,73	1,5
22	0,806	21,408	36,0	2,686	125,47	2,0
24	0,820	23,414	38,0	2,836	121,12	2,0
26	0,832	25,422	40,0	2,985	117,42	2,5

Cálculo de resistencias mínima y máxima

Después de obtener las restricciones y parámetros del transistor MJ15025 (tabla 1), se procedió al diseño de la fuente de corriente, definiendo que la I_C sería de 2A. El procedimiento utilizado para hallar la R_{min} y R_{max} fue:

- a) Se graficó la curva de trabajo del transistor para una $I_B=15,399 mA$ (figura 8), ajustada mediante la resistencia R_B de 280Ω .
- b) Se estableció la tensión de polarización $V_{CC}=49,1 Vdc$ como la máxima tensión para hallar las resistencias de carga.
- c) Se graficó la curva equipotencial, buscando el valor de tensión V_{CEmax} para I_C , tal que no supere la potencia máxima elegida (figura 8).
- d) La potencia máxima del transistor MJ15025, según las especificaciones del fabricante,

es de 250W, no obstante, a pesar de que al transistor se fijó un buen disipador, cuando se superaban los 90W éste se quemaba, por dicha razón un criterio muy conservador para la selección de la potencia máxima del transistor es la del 25% de su capacidad máxima [11]. Para el diseño de la FCDC se optó por trabajar con la curva equipotencial de 79W, la cual se encuentra entre la potencia máxima permitida sin dañar el elemento de control y la potencia establecida con el criterio del 25%.

- e) Se hallaron las resistencias R_{min} y R_{max} , con las ecuaciones (5) y (6), obteniéndose $R_{min}=4,8\Omega$ y $R_{max}=23,95\Omega$, siendo estos valores los límites del rango de la resistencia de carga para mantener aproximadamente constante la corriente de 2A en la FCDC con el transistor utilizado.

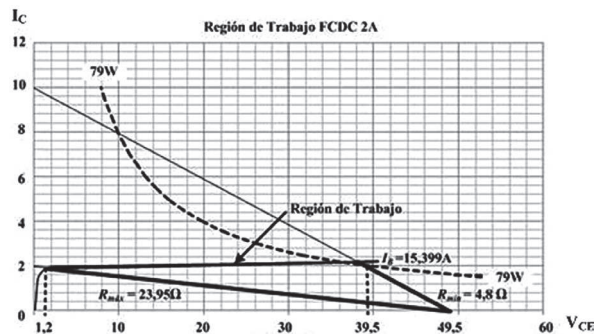


Figura 8 Región de trabajo FCDC 2A

La FCDC desarrollada fue sometida a algunas pruebas para verificar el rango de operación y la estabilidad de la corriente en el momento de variar la R_C . En la tabla 2 se presentan algunos resultados obtenidos de las variables que deben permanecer aproximadamente constantes (V_{CC} , V_{RB} , V_{BE} y I_C) y de las variables que cambian debido al incremento de la carga (R_C , V_{CE} y P_{CE}).

Tabla 2 Resultados obtenidos con el prototipo de FCDC

$R_c [\Omega]$	$V_{CE} [V]$	$V_{RC} [V]$	$V_{BE} [V]$	$V_{CC} [V]$	$V_{RB} [V]$	$I_c [A]$	$P_{CE} [W]$
4,070	34,080	9,468	0,654	43,720	4,350	2,326	79,280
5,030	31,700	11,420	0,665	43,300	4,348	2,270	71,971
6,060	30,600	12,960	0,700	43,850	4,310	2,139	65,442
7,190	28,050	15,700	0,700	43,890	4,300	2,184	61,250
8,023	26,300	17,230	0,700	43,960	4,310	2,148	56,481
10,099	22,400	21,100	0,700	43,800	4,300	2,089	46,801
12,503	18,730	25,040	0,710	44,100	4,290	2,003	37,511
16,100	13,570	30,500	0,730	44,350	4,280	1,894	25,707

Los resultados de la tabla 2 muestran que, para un aumento de 395.6% en la R_c con respecto a la resistencia mínima, el cambio que se presentó en la I_c fue de un 18,6% con respecto a la máxima corriente; además, la potencia en el transistor disminuyó a medida que se incrementó la carga. Bajo estas condiciones de diseño fue posible mantener una I_c aproximadamente constante, donde el límite de potencia máximo seleccionado evitó el calentamiento excesivo del transistor.

Conclusiones

Se desarrolló una metodología que permite encontrar la región activa de cualquier transistor BJT utilizado en el esquema de FCDC (figura 7), a partir de las curvas características, teniendo en cuenta: la tensión de polarización, la tensión de codo y la potencia máxima que soporta el dispositivo de control. Con estos parámetros, se encuentra el rango específico de resistencias que garantiza que la corriente de carga sea constante.

Se utilizó la metodología propuesta para encontrar la región activa de un transistor BJT MJ15025, y se desarrolló un prototipo de FCDC de 2A (figura 6). El rango de resistencias que garantizó la salida constante de corriente fue entre $4,8\Omega$ y $23,95\Omega$ (tabla 2); obteniéndose, para una variación en la carga del 395.6%, un cambio en la corriente de carga del 18,6%.

Se observó que en una FCDC que tenga como elemento de control un transistor, se deberá

definir adecuadamente su región de trabajo, con el fin de garantizar la corriente de carga aproximadamente constante (región activa), la cual a su vez está limitada por la potencia máxima que disipa el transistor. Por esta razón y apoyados en trabajos previos [11], se propone trabajar con el 25% de la potencia nominal del transistor, criterio que resulta ser conservador, evitando el calentamiento excesivo del transistor y garantizando así una relación lineal entre la corriente de base y de colector.

La potencia del dispositivo de control es un parámetro de suma importancia en el desarrollo de FCDC, puesto que la dependencia con la resistencia de carga y el voltaje de polarización crean una limitante en el manejo de altas potencias. Para evitar esto, se requiere variar la fuente de polarización, en la medida que varíe la resistencia de carga, para una corriente determinada.

Referencias

1. L. Marshall. "Circuits and Systems Expositions on the Application of Thevenin and Norton Equivalent Circuits and Signal Flow Graphs to the Small-Signal Analysis of Active Circuits". *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Application*. Vol. 43. 1996. pp. 885-893.
2. F. Mohamed. "On Thevenin's and Norton's Equivalent Circuits". *IEEE Transactions on Education*. Vol. 25. 1982. pp. 99-102.
3. H. Zhao. *Discussion on the Thevenin's theorem and Norton's theorem*. International Conference on

- Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology. Harbin, Heilongjiang, China. 2011. pp 520-522.
4. W. Hayt. *Análisis en circuitos en ingeniería*. 7th ed. Ed. McGraw-Hill. México D.F, México. 2010. pp. 131-145.
 5. Bruce. A. *Circuitos - Ingeniería, conceptos y análisis de circuitos eléctricos lineales*. Ed. Thomson Learning. México D.F, México. 2001. pp. 66-78.
 6. R. Boylestad, L. Nashelsky. *Electronic Devices and Circuit Theory*. 6th ed. Ed. Prentice –Hall Inc. A Simon & Schuster Company. New Jersey, US. 1997. pp.138-180.
 7. H. Rashid, *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. 2nd ed. Ed. Pearson Education. México D.F, México. 1995. pp. 267-287.
 8. S. Erné, H. Luther. “High-Precision DC-Current Source”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol. 24. 1975. pp. 345-348.
 9. D. Holburn. *A current source based on JFET*. Department of Engineering, University of Cambridge. Available on: <http://www.eng.cam.ac.uk> . Accessed: 2-May-2010.
 10. Semiconductor Components Industries. *Silicon Power Transistor*. Available on: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet2/6/0e6c74usfjslcuocssiwi9j1p4cy.pdf>. Accessed: 1-Nov-2009.
 11. Y. Osorno. *Diseño e implementación de fuentes de corriente DC, para aplicaciones didácticas en el laboratorio de circuitos eléctricos*. Trabajo de Grado. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. 2011. pp. 51-64.