

## **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.

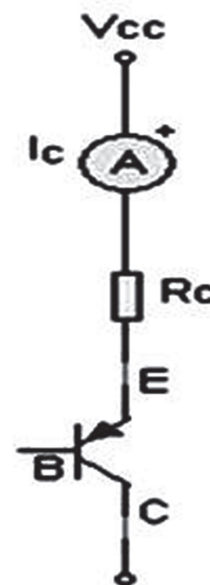
Con el fin de obtener corrientes de pocos amperios, algunos autores proponen utilizar amplificadores operacionales y combinación de tecnologías (BJT, FET, MOSFET y JFET) [6-9], sin embargo, los modelos presentados para altas corrientes (aproximadamente 5A), presentan complejidades adicionales en el diseño 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  $\Omega$ .

### 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).

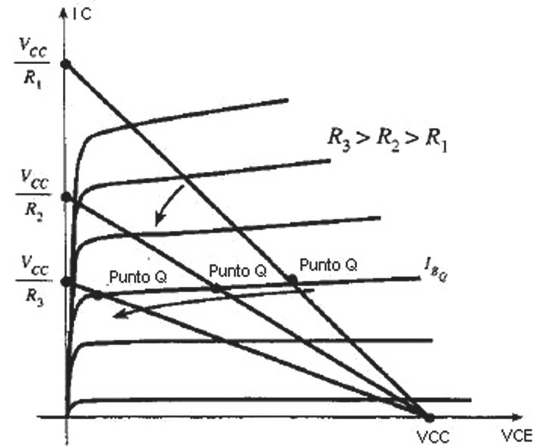


Figura 2 Curvas características del transistor ideal

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).

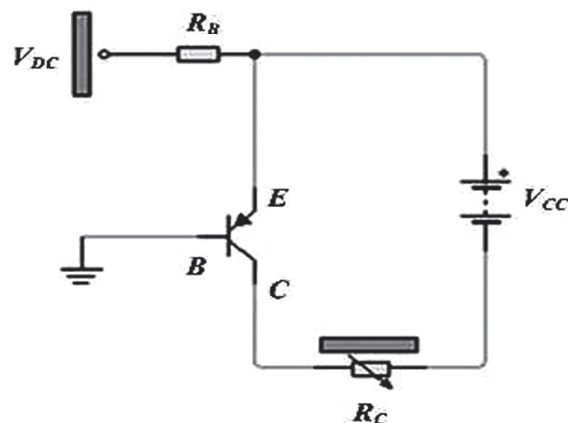


Figura 3 Montaje con transistor pnp y

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 ( $\beta$ ), 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).

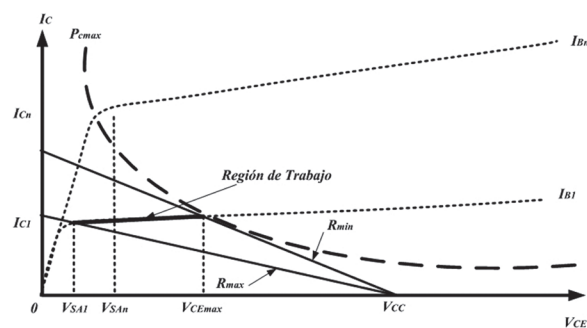


Figura 4 Región de trabajo del transistor como fuente de corriente

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 ( $V_{BE}$ ),  $I_B$ ,  $V_{RC}$ ,  $I_C$ ,  $\beta$ ,  $V_{SA}$ .
- 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.

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

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

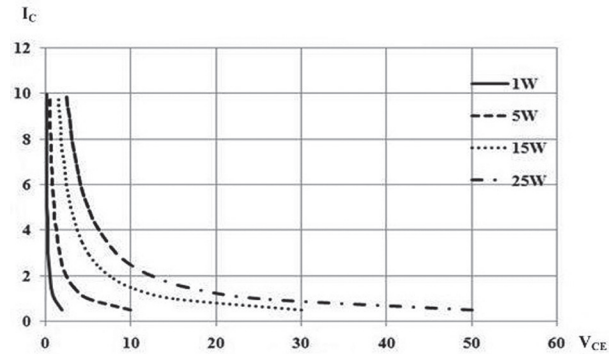


Figura 5 Curvas equipotenciales

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.

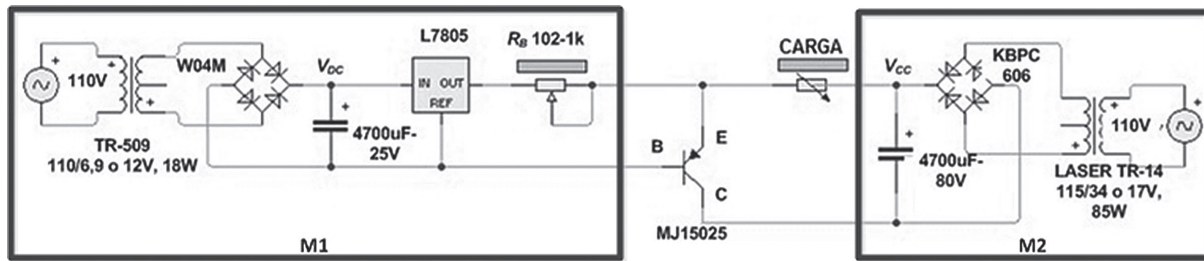


Figura 6 FCDC implementada

### 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  $R_B$ .

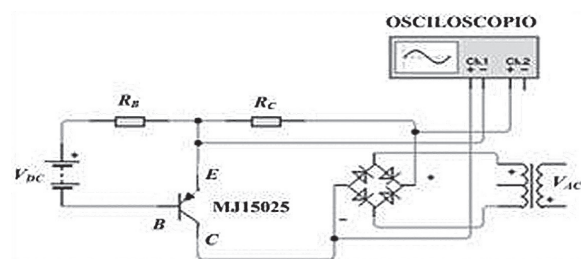


Figura 7 Montaje para hallar las curvas características del transistor

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  $14\Omega$  y  $220\Omega$  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] | $\beta$ | $V_{SA}$ [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          |

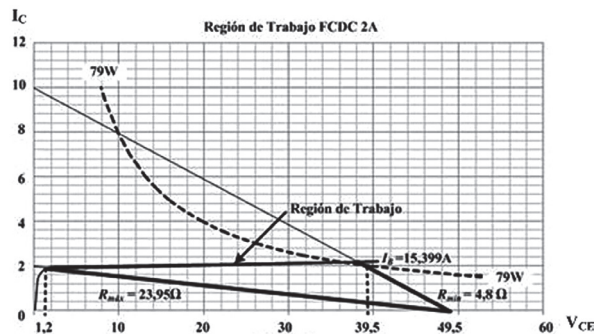
**Cálculo de resistencias mínima y máxima**

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:

- Se graficó la curva de trabajo del transistor para una  $I_B=15,399 \text{ mA}$  (figura 8), ajustada mediante la resistencia  $R_B$  de  $280\Omega$ .
- Se estableció la tensión de polarización  $V_{CC}=49,1 \text{ Vdc}$  como la máxima tensión para hallar las resistencias de carga.
- 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).
- 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%.

- 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*. 7<sup>th</sup> 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*. 6<sup>th</sup> 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*. 2<sup>nd</sup> 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.