

PROTOTIPO DIDÁCTICO DE UN TRAZADOR DE CURVAS PARA UN TRANSISTOR BJT

Juárez Avilés Manuel Alejandro, Cadena Zepeda Edgar Omar, Pérez Uribe José Miguel,
Miranda Velasco Manuel Moisés, Martínez Rosas Miguel Enrique,

Gómez Agis Carlos y Martínez Reyes Horacio Luis

FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y DISEÑO

CARRETERA TRANSPENINSULAR ENSENADA-TIJUANA NUMERO 3917, COLONIA PLAYITAS.

Ensenada, B.C., C.P. 22860. Teléfono 646-1750744, Fax 646-1744333.

e-mail: juarez.manuel@uabc.edu.mx , emartine@uabc.edu.mx

RESUMEN.

Para calcular los parámetros dinámicos (dependientes del punto de operación) de Transistores Bipolares de Unión (BJT por sus siglas en inglés) es necesario obtener sus curvas de operación. En la mayoría de los diseños de amplificadores, el parámetro indispensable para diseño con dispositivos tipo BJT es la ganancia de corriente en directa (forward current gain h_{FE}) también conocido como parámetro beta (β).

En éste trabajo se muestra el diseño e implementación de un prototipo didáctico de trazador de curvas basado en un microcontrolador. Los resultados de las mediciones realizadas a transistores 2N2222 (NPN) se muestran tanto en las gráficas correspondientes de corriente de colector contra voltaje colector-emisor (I_C vs V_{CE}) para distintos valores de corriente de entrada I_B , como en los valores de h_{FE} calculados.

Palabras Clave: Trazador de curvas, Transistor bipolar (BJT), Ganancia de corriente en directa (h_{FE}), parámetros h .

ABSTRACT.

In order to calculate bias point dependent dynamic parameters of Bipolar Junction Transistors (BJT), it is required to get reliable values of dynamic I-V curves. A key parameter to design circuits with BJTs is the forward current gain (h_{FE}) also known as β .

In this work it is shown the design and practical implementation of a didactical curve tracer prototype based on a microcontroller. Obtained measurements for NPN 2N2222 BJTs are shown as I_C - V_{CE} plots as a function of I_B , as well as their corresponding h_{FE} values.

Keywords: curve tracer, Bipolar Junction Transistor (BJT), Forward Current Gain (h_{FE}), h -parameters

1. INTRODUCCIÓN

Los trazadores de curvas, son instrumentos electrónicos utilizados para extraer los parámetros de comportamiento dinámico de dispositivos semiconductores (diodos, transistores bipolares y transistores de efecto de campo) [1],[2]. Los valores de los parámetros dinámicos de los dispositivos activos son un requisito fundamental para analizar el comportamiento de amplificadores basados en este tipo de dispositivos, ya que se

utilizan para diseñar las ganancias de voltaje y corriente, así como las impedancias de entrada y salida de dichos amplificadores. Debido a las razones expuestas, es claro que se debe contar con instrumentos que midan los valores de los parámetros dinámicos con un alto grado de confiabilidad. A pesar de su utilidad no es común encontrar trazadores de curvas de dispositivos semiconductores fuera de laboratorios especializados o centros de educación superior, los motivos principales de su falta de popularidad son: su alto costo y la falta de entrenamiento para su correcta utilización.

El transistor bipolar de unión es uno de los elementos activos más populares para el diseño de amplificadores, se trata básicamente de un dispositivo activo de tres terminales (base, colector y emisor) y el término bipolar indica que está formado por la unión de dos materiales semiconductores, uno tipo N y otro tipo P. Dependiendo de su construcción física (yuxtaposición de los materiales P-N) se clasifican en transistores tipo NPN o PNP (ver Figura 1).

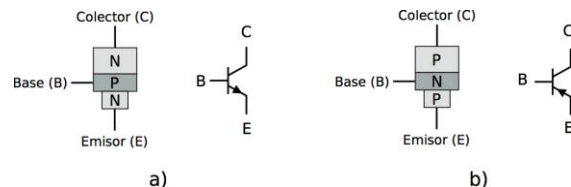


Figura 1.- a) Esquema de las uniones y símbolo esquemático del transistor tipo NPN. b) Esquema de las uniones y símbolo esquemático del transistor tipo PNP.

La diferencia básica entre los dos tipos de transistores BJT, radica en las uniones P-N utilizadas en su construcción. Un material tipo N se diferencia de un material tipo P por el dopaje interno de cada material semiconductor [3], [4].

Para distinguir entre un transistor NPN y otro PNP se utiliza la dirección de la flecha de la terminal del Emisor, tal como se muestra en la Figura 1, la dirección de la flecha indica el sentido de la corriente que circula a través el emisor del transistor.

Las características de los materiales correspondientes a cada terminal se pueden resumir de la manera siguiente:

- El Emisor está formado por una región fuertemente dopada, de manera que puede aportar una gran cantidad de portadores a la corriente de salida.
- La Base debe ser muy estrecha y con poco dopaje, para que en su interior se produzca poca recombinación de portadores y se permita el flujo total de portadores por esta capa.
- El Colector tiene un dopaje menor que el emisor, aunque en esta región ocurre la recombinación de portadores que provienen del emisor [3].

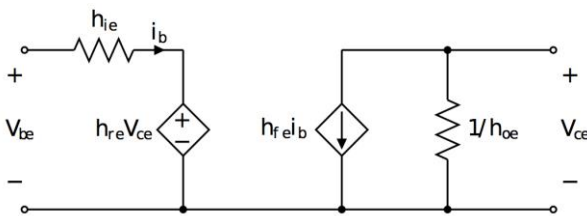


Figura 2.- Modelo de parámetros híbridos para análisis de amplificadores en corriente alterna.

Para que funcionen como amplificadores, los transistores se polarizan de tal manera que se establece un punto de operación (Q) para trabajar en las distintas regiones de operación descritas en las gráficas de entrada y salida del dispositivo. El dispositivo es básicamente una fuente de corriente controlada por corriente y se puede modelar como una red de dos puertos, tal como se puede observar en el circuito equivalente mostrado en la Figura 2. Por medio del análisis en corriente alterna del circuito equivalente y su red de polarización, es posible diseñar amplificadores con características adecuadas para múltiples aplicaciones, entre las que se pueden mencionar: amplificadores de audio, acopladores de impedancia, amplificadores de RF y amplificadores de alta potencia, entre otros. Un tipo de amplificador comúnmente utilizado por la alta ganancia de voltaje que proporciona es el amplificador en configuración Emisor-Común (E-C), para dicha configuración sus parámetros híbridos se expresan de la manera indicada a continuación [4]:

$$\begin{bmatrix} v_{be} \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_b \\ v_{ce} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{ie} & h_{re} \\ h_{fe} & h_{oe} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_b \\ v_{ce} \end{bmatrix}$$

$$h_{ie} = \left. \frac{v_{be}}{i_b} \right|_{v_{ce}=0} = \left. \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} \right|_Q \quad (\text{impedancia de entrada})$$

$$h_{re} = \left. \frac{v_{be}}{v_{ce}} \right|_{i_b=0} = \left. \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}} \right|_Q \quad (\text{ganancia de voltaje en inversa})$$

$$h_{fe} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{v_{ce}=0} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_Q \quad (\text{ganancia de corriente en directa})$$

$$h_{oe} = \left. \frac{i_c}{v_{ce}} \right|_{i_b=0} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}} \right|_Q \quad (\text{admitancia de salida})$$

Para el amplificador en configuración Emisor-Común se conecta una fuente de alimentación a través de unos resistores de polarización entre las terminales de colector y de emisor, dicha fuente proporciona la corriente de salida I_C , cuya magnitud se puede controlar por medio de la señal de corriente de entrada I_B que se aplica en la terminal de base. Ésta configuración permite conseguir grandes variaciones de corriente de salida (I_C) por medio de pequeñas variaciones de corriente de entrada (I_B), es decir se tiene una amplificación de señal, tal como se indica en el esquema de la Figura 3.

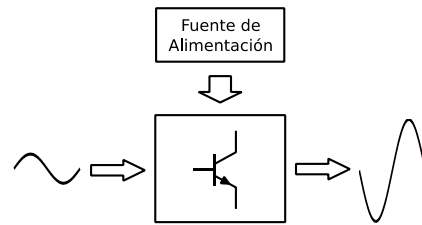


Figura 3.- Esquema básico de amplificación

Los valores de los resistores del circuito de polarización externo establecen un punto de operación (Q) cuya posición sobre las rectas de carga definen el comportamiento del amplificador en una de las 3 regiones de operación del transistor mostradas en la Figura 4, dichas regiones son conocidas como: Región de operación Lineal, Región de Saturación y Región de Corte.

Para el caso de amplificadores típicos, en general se desea que funcionen dentro de la región de operación lineal, la cual corresponde a la región de funcionamiento en donde la señal de salida del transistor es directamente proporcional a la señal de entrada y no genera distorsión (se cumple la relación $I_C = h_{FE} I_B$). En este caso se observa que la unión P-N formada entre las terminales de Base y Emisor se encuentra polarizada directamente mientras que la unión P-N formada entre las terminales de Colector y Base se encuentra polarizada inversamente.

La región de corte se distingue porque la etapa de salida del amplificador se comporta como un circuito abierto, ya que no

circula corriente entre las terminales de Colector y Emisor ($I_C=0$). Para mantener al transistor en la región de corte se requiere polarizar inversamente la unión Base-Emisor del mismo, es decir, se establece un voltaje $V_{BE} \leq 0$.

Con respecto a la región de saturación, las uniones Base-Emisor y Base-Colector del transistor se encuentran polarizadas directamente, en tal caso se obtiene el valor máximo de corriente I_C a través de las terminales de Colector y Emisor (en este caso I_C deja de ser proporcional a I_B), mientras que el voltaje entre dichas terminales es mínimo, es decir: $V_{CE}=V_{CE(Sat)} \approx 0$, para fines prácticos se considera que existe un corto circuito a la salida del transistor [3], [4].

Tanto en la región de Corte como en la región de Saturación, la señal de salida sufre distorsión con respecto a la señal de entrada.

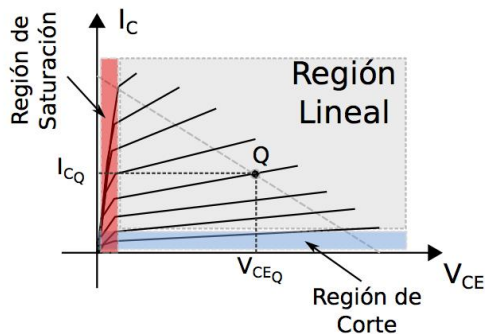


Figura 4.- Regiones de trabajo de un Transistor.

La importancia de conocer las curvas características del transistor estriba en poder diseñar y simular el comportamiento de un amplificador basado en el cálculo tanto del punto de operación (punto Q) de corriente directa (cd) como en corriente alterna (ca). Aun cuando el fabricante proporciona parámetros de operación del transistor, los valores que entrega son valores promedio de los lotes de dispositivos, por lo que el diseño de amplificadores basados en los valores proporcionados por el fabricante en general son aproximados. Dado que, los valores de los componentes para polarizar un transistor se pueden calcular a partir del modelo del amplificador, es necesario conocer los valores de los parámetros dinámicos del transistor de la manera más precisa posible para que su funcionamiento corresponda fielmente al diseño, respetando por supuesto los límites impuestos por el fabricante.

2. METODOLOGÍA

Para la obtención de las curvas características de un transistor, que posteriormente permiten extraer los valores de parámetros $[h]$ del dispositivo, es necesario verificar sus intervalos de

trabajo máximo y mínimo, es decir sus regiones de operación: lineal, de corte y saturación. Posteriormente se diseña la circuitería para generar las señales de barrido de corriente y voltaje que excitarán al dispositivo de manera controlada.

Para facilitar la descripción del sistema implementado, en la Figura 5 se muestra un diagrama a bloques del proceso de caracterización del dispositivo, en el cual se incluyen las etapas de generación de las curvas del transistor BJT.

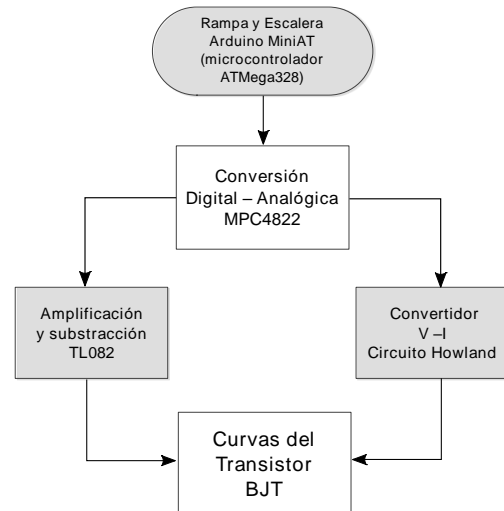


Figura 5.- Diagrama bloques del sistema para caracterización de transistores.

Para producir las señales de excitación y poder realizar la adquisición de datos se utiliza un módulo Arduino Mini-AT, el cual esta basado en el microcontrolador ATmega328 [5] (ver Figura 6).

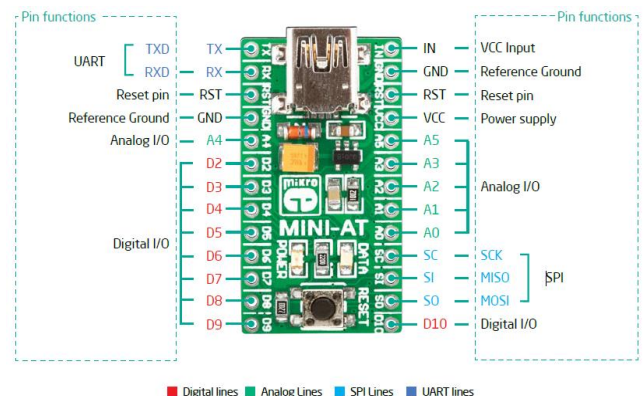


Figura 6.- Módulo tipo Arduino Mini-AT (ATmega328).

El microcontrolador genera los niveles de voltaje en forma de escalera y de diente de sierra (las formas de onda generadas se muestran en la Figura 7), requeridas para excitar al transistor.

De manera simultanea a la excitación del dispositivo se realiza la lectura de los datos medidos a la salida del transistor y se registran en un formato tipo texto. Los datos obtenidos sirven para trazar las curvas $i-v$ correspondientes con ayuda de software con capacidad de graficado, tal como Matlab, Excel, Phytion, etc.

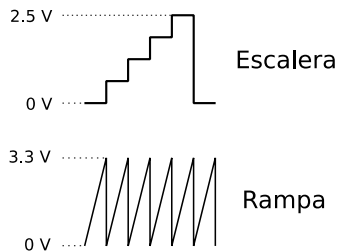


Figura 7.- Señales de escalera y diente de sierra generadas por el microcontrolador.

Para obtener las formas de onda de escalera y diente de sierra a partir de una señal digital generada por el microcontrolador, es necesario realizar una conversión digital-analógica (DAC), que en este caso se realiza por medio del convertidor de circuito integrado (CI) MPC4822 [6] tal como se muestra en el esquema de la Figura 8.

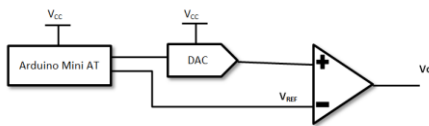


Figura 8.- Conversión y acondicionamiento de señal generada por el microcontrolador.

El ajuste de la amplitud y las operaciones de suma y resta de señales eléctricas se realiza por medio de amplificadores operacionales en configuraciones sumador o restador, tanto del tipo inversor como no inversor. Las condiciones de polarización del transistor BJT y la configuración del amplificador diferenciador para inyectar el voltaje V_{CE} , se describen a continuación:

Se considera el valor de $V_C=0$, debido a la condición de "conexión virtual" ($I_+=I_-=0$ y $V_+=V_-$) que presenta a la entrada el amplificador operacional, tal como se indica en la Tabla 1.

El voltaje en el emisor V_E , tiene que ser negativo para que cumpla con las características de polarización del transistor BJT – NPN por lo que es necesario invertir el signo de la señal entregada por el DAC antes de que se inyecte al transistor.

Para el caso de un transistor tipo PNP no se requiere modificar el signo de la señal, por lo que solo se refuerza la señal diente

de sierra procedente del DAC que se inyecta al transistor. La forma de onda diente de sierra que se inyecta en V_E permite realizar un barrido desde 0 V hasta el valor límite V_{CC} , tal como se utiliza en las gráficas de salida típicas proporcionadas por los fabricantes de transistores.

NPN	PNP
$V_{CE} = V_C - V_E$	$V_{CE} = V_C - V_E$
$V_{CE} = 0 - V_E$	$V_{CE} = 0 - V_E$
$V_{CE} = - (-V_E)$	$V_{CE} = - V_E < 0$
$V_{CE} = +V_E > 0$	

Tabla 1.- Condiciones para V_E .

La corriente de entrada (o de control) I_B que se inyecta por la terminal de Base del transistor corresponde a una forma de onda de tipo escalera y se obtiene por medio de una fuente de corriente controlada por voltaje (convertidor V-I), la configuración utilizada es conocida como fuente de Howland [7], [8]. Por otro lado, la forma de onda de escalera que excita a la fuente Howland es una señal de voltaje generada por el microcontrolador y en principio solo puede proporcionar voltajes con signo positivo como lo indica la expresión siguiente:

$$0 \leq V_{DAC} \leq V_{REF} \leq V_{CC}$$

Puesto que se desea caracterizar tanto transistores del tipo NPN como PNP, es necesario ajustar el signo de los voltajes de barrido para fuente Howland en función del tipo de transistor bajo prueba. Las condiciones de niveles de voltaje en función de los requerimientos para el tipo de transistor se muestran en la Tabla 2.

Transistor	NPN	PNP
V_0	$(V_{DAC} - 0) \geq 0$	$(V_{DAC} - V_{CC}) \leq 0$
V_{CC} (V)	2.5	- 2.5
Resolución (mV)	500	500
Límites	$0 \leq V_0 \leq V_{CC}$	$- V_{CC} \leq V_0 \leq 0$

Tabla 2.- Condiciones para V_0 .

Se propuso un valor de corriente $I_B \approx 30 \mu A$ para poder ajustar los valores de operación del transistor máximos y mínimos, así como los valores de los resistores R_2 y R_1 , posteriormente se calculó un valor de R_{4B} para que la operación del sistema fuera estable. Dado que el factor de ganancia estática de corriente del transistor está dada por $h_{FE} = I_C / I_B$, se puede calcular el valor de h_{FE} del transistor con los valores propuestos dentro de la región de operación lineal.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El diagrama esquemático del circuito trazador de curvas didáctico que se implementó se muestra en la Figura 9, se incluyen las etapas de generación de señales de voltaje en forma de escalera y diente de sierra por medio del microcontrolador, así como las etapas de acondicionamiento de señales.

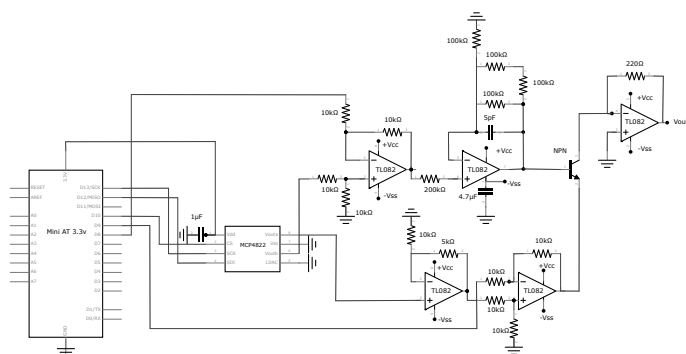


Figura 9.- Circuito trazador de curvas.

La lista de materiales utilizados en la implementación del circuito se indica a continuación:

- 1 Módulo Mini-AT (ATmega328) 3.3 V
- 1 Convertidor DAC MCP4822 de 12-Bits
- 3 Amplificadores Operacionales Duales TL082
- 1 Capacitor 1nF
- 9 Resistores de 10 kΩ
- 5 Resistores 100 kΩ
- 1 Resistor 5 kΩ
- 1 Resistor 220 kΩ

4. RESULTADOS

En la Tabla 3 se muestran los valores de I_B , I_C y h_{FE} medidos con nuestro circuito (a partir de las señales de excitación mostradas en las Figuras 10 y 11), en donde h_{FE} es el factor de ganancia de corriente estática del transistor y puede obtenerse de sus curvas características.

I_C (mA)	I_B (μA)	h_{FE}
0.6	5	120
1.4	10	140
2	15	133
2.6	20	130
3.5	25	140

Tabla 3.- Valores medidos I_C , I_B y h_{FE} .

Los niveles de voltaje entregados por el microcontrolador varían en incrementos 0.5 V por cada escalón (como se muestra en la Figura 11), debido a que tanto la forma de onda como el

tamaño de cada incremento se pueden modificar por medio de programación, se facilita el ajuste de los parámetros de excitación en función de los requerimientos particulares de los dispositivos bajo prueba.

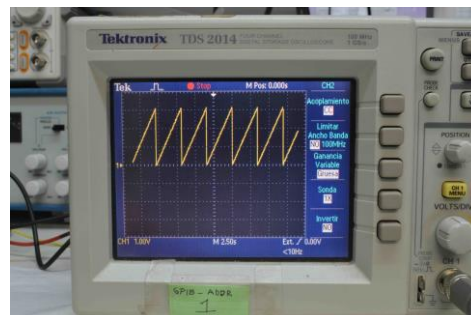


Figura 10.- Señal de diente de sierra.

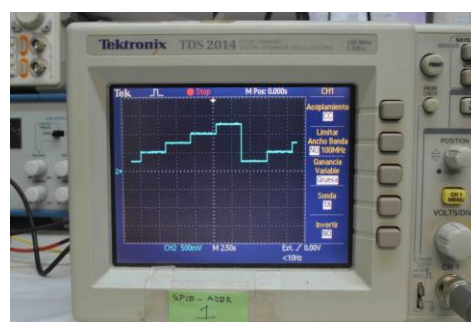


Figura 11.- Escalones: 0.5V, 1.0V, 1.5V, 2.0V y 2.5V.

La corriente inyectada por la fuente de Howland generó una corriente de salida I_C de ~ 5 mA, de manera que el transistor trabajó con valores de corriente muy inferiores a los límites especificados por el fabricante.

Las curvas dinámicas de salida de un transistor 2N2222A (NPN) [9] obtenidas con nuestro circuito trazador se muestran en la Figura 12, como complemento, en la Figura 13 se muestran las curvas graficadas a partir de los valores de corriente y voltaje medidos.

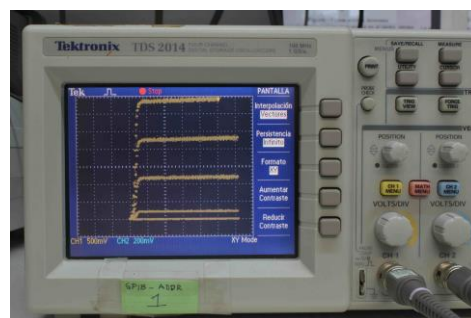


Figura 12.- Curvas características de un transistor BJT NPN.

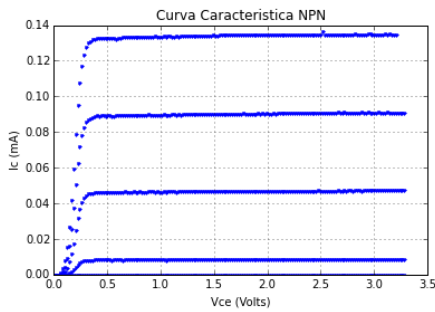


Figura 13.- Curvas obtenidas con los valores medidos de I_C y V_{CE} .

5. CONCLUSIONES

La extracción de parámetros [h] de transistores NPN ó PNP se puede realizar a partir de las curvas dinámicas obtenidas por medio de un trazador de curvas en la región de operación lineal del dispositivo. En este trabajo se aseguró que el transistor bajo prueba trabajara en la región de operación lineal, ajustando su corriente de polarización en una posición del punto de operación Q con un valor de corriente de salida ($I_{CQ} \approx 5$ mA) muy inferior a los límites de trabajo indicados por el fabricante.

Para excitar al dispositivo bajo prueba se generaron dos formas de onda en forma digital por medio de un microcontrolador y posteriormente con ayuda de un convertidor DAC se obtuvieron las formas de onda analógicas. Una de dichas señales corresponde a una señal de escalera, la cual se utilizó para inyectar una corriente de control (I_B) con ayuda de un convertidor de voltaje a corriente en la base del transistor, mientras que para hacer el barrido de voltaje entre el colector y el emisor se generó una señal diente de sierra. De manera simultanea se realizó la captura de los valores de salida (I_C y V_{CE}) a través de los puertos ADC del microcontrolador y se almacenaron en memoria como un arreglo de datos. Las gráficas de salida se obtuvieron posteriormente por medio de una rutina de graficado implementada en Matlab.

La visualización de las curvas de salida del transistor se realizó en tiempo real en la pantalla de un osciloscopio, utilizando la opción de graficado X-Y, en donde X correspondía a la señal de voltaje V_{CE} y Y a una señal de voltaje proporcional a la corriente de salida I_C del transistor, el trazo grueso que se observa en las imágenes se debe a que el osciloscopio se ajustó con un tiempo de retención infinito y por lo tanto se tiene la superposición de un número muy grande de trazos.

Los resultados obtenidos demuestran que es posible medir los valores de las curvas características de transistores por medio de sistemas de bajo costo basados en microcontroladores, con la ventaja adicional de que dichos sistemas tienen la capacidad

de entregar un archivo en formato digital genérico para extraer los parámetros híbridos de los dispositivos bajo prueba.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por la FIAD-UABC y el CONACYT para la realización de este trabajo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. Banzhaf, "Using the Agilent 54621A Digital Oscilloscope as a Curve Tracer for a BJT (Bipolar Junction Transistor)," *EducatorsCorner.com*. p. 6.
- [2] Millman and Halkias, *Integrated Electronics*. Tata McGraw-Hill Publishing Company, 2001.
- [3] R. Boylestad and L. Nashelsky, *Electronic devices and circuit theory*, 6th ed. Prentice Hall International Inc., 1996.
- [4] G. A. Ruiz Robredo, *ELECTRONICA BASICA para INGENIEROS*, 1a. ed. Santander: Universidad de Cantabria, 2001.
- [5] MikroElektronika, "MINI-AT Small AVR development board." MikroElektronika, p. 17, 2014.
- [6] Microchip Technology Inc., "Mcp4802/4812/4822." DS22249A, p. 46, 2010.
- [7] Analog Devices, "BJT Curve Tracer." Lab Activity, Norwood, MA, pp. 1–13, 2012.
- [8] S. Brennan, "AN-843, Measuring a Loudspeaker Impedance Profile Using the AD5933 Application Note (Rev. A)." Analog Devices, Norwood, MA, pp. 1–12, 1970.
- [9] Philips Semiconductors, "2N2222 NPN switching transistors." Eindhoven, p. 9, 1997.