

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ciencias y Humanidades

Departamento de Ingeniería Electrónica



**Diseño de guías de laboratorio para
el curso de circuitos impresos.**

Cristian Alejandro Castañeda Ramírez

**Guatemala
2002**

**Diseño de guías de laboratorio para
el curso de circuitos impresos.**

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ciencias y Humanidades

Departamento de Ingeniería Electrónica




**Diseño de guías de laboratorio para el
curso de circuitos impresos.**

**Trabajo de investigación presentado por
Cristian Alejandro Castañeda Ramírez
para optar al grado académico de
Licenciado en Ingeniería Electrónica.**

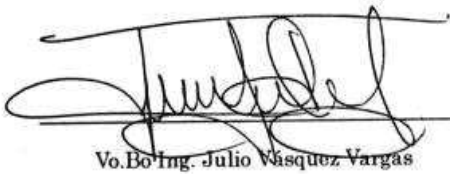
**Guatemala
2002**




Vo.Bo Dr-Ing Carlos Tercero Villagrán



Vo.Bo MSc. José Ricardo Quan



Vo.Bo Ing. Julio Vásquez Vargas



Vo.Bo Dr-Ing Carlos Tercero Villagrán
Director
Departamento de Ingeniería Electrónica

Guatemala 31 de octubre de 2002

Índice

Resumen	vi
I. Introducción	1
II. Objetivos generales	4
III. Metodología	6
IV. Guías de laboratorio sobre los parámetros y características del transistor.	9
V. Guías de laboratorio sobre la etapa de amplificación	10
VI. Conclusiones generales.	11
VII. Bibliografía.	12

RESUMEN.

El laboratorio de circuitos impresos está conformado por varios módulos: generador de funciones a partir de un circuito integrado 555, modulación FSK, la implementación de compuertas lógicas, los parámetros del transistor, una etapa de amplificación por medio de transistores y como proyecto final la implementación de un bus de datos. Estos módulos se simularán en un programa computacional conocido como Circuit Maker 2000, siendo éste una herramienta muy útil en el estudio y realización de circuitos electrónicos.

En este trabajo se presentarán las guías de laboratorio del alumno y del profesor correspondientes a los parámetros del transistor y la etapa de amplificación. Debido a que la implementación del bus de datos es el proyecto final sólo se incluirá, en la guía del profesor para la etapa de amplificación, una breve descripción y un diagrama sugerido.

Para conocer, analizar y determinar los parámetros del transistor se debe manejar ciertos conocimientos teóricos sobre este componente electrónico. Siendo el transistor un componente de tres terminales se iniciara su estudio por medio de la "Teoría de dos puertos"; esta teoría se basa en analizar al componente por medio del análisis de dos puertos, uno de entrada y otro de salida, en los cuales se tiene a los voltajes y a las corrientes de entrada y salida como variables de interés a partir de las cuales se genera una serie de ecuaciones con la cual se encontraran varios parámetros característicos del transistor, entre estos podemos mencionar la "impedancia de entrada en corto circuito", el inverso a la ganancia de voltaje o "parámetro de relación de voltaje de transferencia en un circuito abierto", a la ganancia de corriente o "parámetro de relación de corriente de transferencia directa en corto circuito" y por último el "parámetro de admitancia de salida en un circuito abierto", siendo estos parámetros conocidos como "parámetros híbridos del transistor" debido a que aparecen juntas las configuraciones de Thevenin y de Norton.

En este trabajo se usará el transistor en la configuración de emisor común, para el análisis de esta configuración se harán ciertas suposiciones, las cuales se detallarán más adelante, y se tomará el modelo r_e para obtener datos del circuito equivalente.

Conocido el análisis teórico del transistor se procederá a simular dichos parámetros por medio del uso del Circuit Maker 2000. Como primera instancia se generarán las curvas características del transistor (I_c Vrs V_{ce}) por medio del análisis de la simulación del circuito que será proporcionado en la guía, luego teóricamente se calcularán las ecuaciones de la recta " $I_c = m * V_{ce} + b$ " y luego se calculará el Voltaje Early. Los resultados de estos cálculos se anotarán en sus respectivas tablas y servirán para introducirlos como valores iniciales de las distintas simulaciones que nos llevaran a la obtención de las curvas características del transistor. Una vez determinadas estas curvas se procederá a determinar y graficar, por medio de un segundo circuito, el parámetro de ganancia de corriente tanto para señales grande como para pequeñas señales, la resistencia colector-emisor y la resistencia base-emisor; concluyendo así con los parámetros y características del transistor.

El segundo tema de este trabajo está enfocado a la etapa amplificadora, la cual tiene como objetivo fabricar y analizar un circuito en el cual se introduzca una señal de amplitud relativamente pequeña y se obtener una señal de la misma forma que la de la de entrada y con una mayor amplitud a su salida, llamando a este fenómeno amplificación.

Para este fin se empleará un circuito que conste de un transistor y otros componentes como dispositivo de amplificación o etapa de amplificación en configuración de emisor común, para esto se deben encontrar dos grupos de gráficas o curvas: las características de entrada o características estáticas de base y las características de salida o características estáticas de colector. En el laboratorio se obtendrán por medio del análisis DC de simulador.

El transistor consta de tres regiones de regiones operativas, la de corte, la de saturación, y la activa siendo esta última la de más interés en este trabajo. En la región activa se encuentra el punto Q, establecer correctamente este punto tiene como objetivo que la señal original será amplificada a su mayor intervalo y con la mejor fidelidad posible. Se empleará un circuito de auto polarización o polarización por divisor de voltaje para disminuir las variaciones en el punto Q producidas por alteraciones de la temperatura o variaciones de voltajes y corrientes del circuito. Una vez establecido y analizado el circuito de auto polarización se procederá a diseñar el circuito amplificador teniendo en cuenta varias especificaciones dadas en el laboratorio, luego se calculará la resistencia interna y se llevará a cabo la simulación del circuito.

Al tener los datos y simulación del transistor en configuración de emisor común se procederá a construir y analizar un circuito de emisor-seguidor el cual se empleara como acoplador de impedancia. Por último se unirán los dos circuitos, emisor-seguidor y circuito de auto polarización para formar la etapa de amplificación y se someterá a un segundo programa conocido como Trax Maker el cual dará como resultado una plantilla gráfica que podrá ser utilizada para trasladar el circuito simulado a una placa de cobre y con esto se dará por terminada la práctica de la etapa amplificadora.

I. Introducción

Este trabajo está conformado por las guías que se usarán en el laboratorio del curso de Circuitos Impresos, el cual tiene como fin desenvolver los conocimientos adquiridos en los cursos fundamentales de electrónica, tanto analógica como digital, en un marco que permite simular circuitos completos antes de su implementación real. Para efectos prácticos se ha elegido, de una gran variedad de simuladores, el programa Circuit Maker 2000.

La simulación de circuitos electrónicos por medio de software especializado proporciona ventajas sobre los circuitos que se simulan, tales como conocer los posibles estados y comportamientos semejantes a los resultados reales; así mismo permite descubrir las posibles fallas, pudiendo eliminarlas y así optimizar el circuito que se desea construir sin tener que gastar en componentes físicos de una manera innecesaria. Del mismo modo existen desventajas al usar dichas simulaciones, puesto que los programas, aunque sean muy avanzados, poseen ciertos parámetros ideales tanto en componentes como en líneas de alimentación y otros aspectos que están fuera de sus alcances; se puede tener de ejemplo la potencia que requieren ciertos circuitos integrados al momento de realizar transiciones de estado tales como el 555, el cual en la realidad demanda cierta corriente al momento de “dispararse” lo que ocasiona ruido y distorsiones en elementos y circuitos cercanos a el, por lo cual se debe de desacoplar y alimentar de una forma aislada. Otro caso interesante es la caída de voltaje en las líneas de alimentación, dicho problema es observado en la realidad en circuitos que contengan muchos componentes que demanden una corriente y potencia considerable. Estos problemas se llegan a detectar con el tiempo y la puesta en práctica al momento de montar los circuitos.

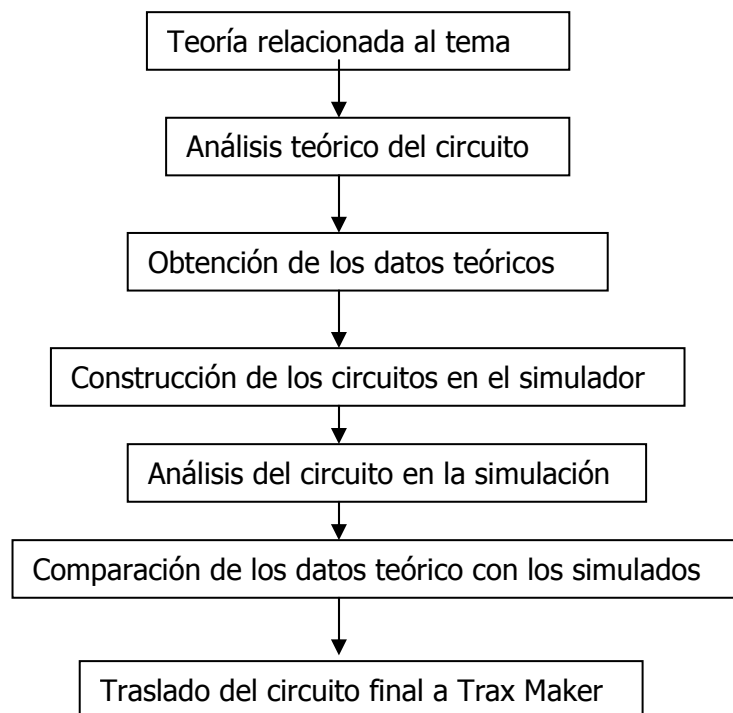
Los módulos que conforman el laboratorio de circuitos impresos son los siguientes: parámetros del transistor, una etapa de amplificación por medio de transistores, un generador de funciones a partir de un circuito integrado 555, modulación en FSK, la

implementación de compuertas lógicas y el diseño de un bus de datos, por medio del cual se acoplarán todos los módulos y se podrá seleccionar uno a la vez.

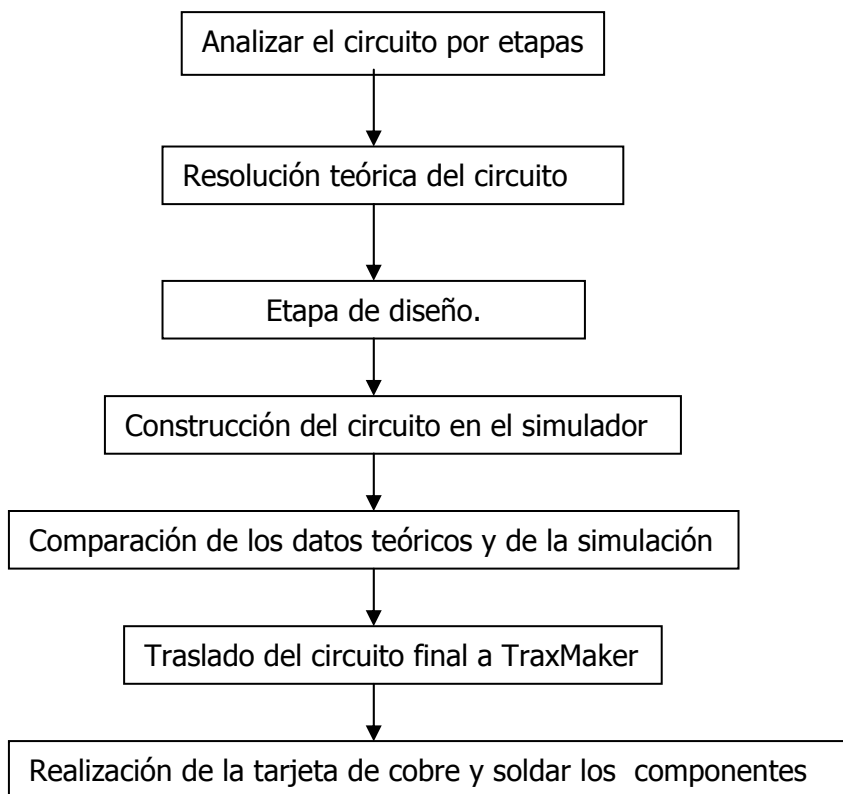
El interés de este trabajo de graduación radica en el diseño de las guías de laboratorio para los módulos de los parámetros del transistor, la etapa de amplificación y el bus de datos; dichas guías se presentan en dos formatos: la Guía para el estudiante, la cual no es más que una serie de instrucciones que el alumno debe realizar y obtendrá resultados que son de interés para el curso. El segundo formato es la Guía del instructor la cual es la solución de la Guía del alumno, haciendo énfasis en los aspectos importantes al construir el circuito resaltando los resultados a los que se desean llegar al momento de resolver la Guía del alumno.

Los dos formatos incluyen la teoría correspondiente al experimento que se realizará; las fórmulas respectivas a los distintos cálculos, así como notas y ciertas ayudas al momento de realizar el laboratorio.

El siguiente diagrama de bloques presenta la forma y orden en que se desenvuelven las guías del instructor:



El orden que en la que se realizó la guía del alumno es el siguiente:



Como se puede observar en los diagramas de bloques, las guías están diseñadas de tal manera que se da la teoría necesaria para resolver el circuito que se desea implementar, luego de la resolución teórica se procede a diseñar y simular, siendo en esta etapa donde se aplican todas las mediciones y variaciones necesarias para obtener un circuito como el que se diseñó en la teoría; al llegar al punto donde se obtienen los parámetros y especificaciones deseadas se procede con el traslado del circuito a Trax Maker, el cual es otra herramienta del Circuit Maker con la cual podremos realizar un diagrama del circuito el cual será el usado para construir una tarjeta impresa en cobre, por medio de procesos químicos, foto químicos o mecánicos; en donde se soldarán los componentes físicos de la aplicación que se está realizando.

II. Objetivos generales.

A. Que el profesor aliente al alumno a tener una participación activa en el laboratorio, así mismo un espíritu investigativo sobre la materia que estudia y sus aplicaciones en la vida profesional.

B. Despertar en el alumno un criterio analítico con rápida solución al momento de presentarse problemas al trabajar en cualquier aplicación ya sea en el ámbito estudiantil como en el profesional.

1. Parámetros del transistor.

a. Con la ayuda del Circuit Maker 2000 sea capaz de obtener los gráficos de los parámetros característicos del transistor, mediante la correcta medición y colocación de los distintos instrumentos que proporciona dicho programa.

b. Obtener una serie de datos que describan el comportamiento del transistor y ayude al alumno al momento de realizar la implementación de la etapa de amplificación.

2. Etapa de amplificación.

a. Conociendo los parámetros característicos del transistor se logre implementar y dimensionar con éxito la etapa de amplificación, con las especificaciones propuestas en las guías de laboratorio.

b. Al momento de usar el programa Circuit Maker 2000 el estudiante pueda generar las gráficas características del transistor, tanto la gráfica de V_{BE} Vrs I_c como V_{CE} Vrs I_c con las que obtendrá la transconductancia y las regiones de saturación y corte del transistor con distintos puntos de operación en una forma gráfica.

c. Utilizar a fondo las herramientas del Circuit Maker 2000 para conocer el comportamiento de la etapa de tal manera que el circuito que se plasmará en la tarjeta impresa sea un circuito optimizado.

d. Inducir al alumno a diseñar de una manera eficiente un bus de datos con el cual seleccione a gusto la señal de salida de los módulos implementados en el laboratorio.

III. Metodología.

Debido al contexto de este trabajo se debe analizar por separado la metodología utilizada en la guía del alumno de la utilizada en la guía del profesor.

A. Metodología de las guías del alumno.

1. Analizar el circuito por etapas: Esto significa que será proporcionada, de una forma gradual, la teoría necesaria para analizar el circuito central de la guía.

2. Resolución teórica del circuito: Con ayuda del análisis del circuito obtener, de forma teórica, la configuración de la implementación que deseada plasmar en una tarjeta impresa.

3. Construcción del circuito en el simulador: En base a los datos y resultados obtenido en el paso anterior se construye en el simulador el circuito central de a guía y se procede a realizar una serie de análisis que son proporcionados por el programa y así obtener información que ayudara a la fabricación de un circuito optimizado, conociendo de antemano un comportamiento cercano al real.

4. Comparación de datos teóricos y simulados: En este punto se procede a comparar los datos obtenidos en el análisis teórico y en la simulación con lo cual se observaran las posibles variaciones que se puedan presentar en un circuito real y así tener la ventaja de realizar las correcciones necesarias antes de trasladar el circuito a una tarjeta impresa.

5. Traslado del circuito final a TraxMaker: Una vez concluidos los análisis en el simulador y lograr la optimización del circuito se procede trasladar, por medio de TraxMaker, el circuito de un formato del simulador a un formato de tarjeta impresa.

6. Realización de la tarjeta de cobre: Obtenido el formato de tarjeta impresa del circuito se procede a la realización física de la tarjeta, ya sea utilizando una fresadora o por medio químico o foto-químicos y así poder soldar los componentes de los módulos trabajados.

B. Metodología de las guías del profesor.

1. Teoría relacionada al laboratorio: Se le proporcionará al profesor la teoría necesaria para la resolución del experimento, de tal manera que pueda resolver las dudas e inquietudes de los alumnos al momento de resolver el laboratorio propuesto.

2. Análisis teórico del circuito: Se analizará teóricamente el circuito propuesto con la ayuda de la teoría proporcionada, de tal manera que el profesor conocerá de antemano los resultados y resolución de la guía del alumno.

3. Obtención de datos teóricos: Por medio de la teoría propuesta en el paso anterior se procede a mostrar la resolución de la guía de una manera clara y enfatizando en los puntos donde al estudiante pudieran presentarse problemas.

4. Construcción de circuito en el simulador: Con base a los datos y resultados obtenidos en el paso anterior se construye en el simulador el circuito central de la guía y se procede a realizar una serie de análisis que son proporcionados por el programa y así obtener información que ayudara a la fabricación de un circuito optimizado, conociendo de antemano un comportamiento cercano al real.

5. Análisis del circuito en la simulación: Con la obtención de los datos teóricos y el diseño del circuito se procede a utilizar los análisis que se incluyen en el simulador de tal manera que se conozca el circuito con el que se trabajará.

6. Comparación de los datos teórico y los datos simulados: En este punto se procede a comparar los datos obtenidos en el análisis teórico y en la simulación con lo cual se observarán las posibles variaciones que se puedan presentar en un circuito real y así tener la ventaja de realizar las correcciones necesarias antes de trasladar el circuito a una tarjeta impresa.

7. Traslado del circuito a Trax Maker: Se refiere al traslado del circuito en formato del simulador al formato de TraxMaker, siendo este el último paso de la guía del profesor, puesto que no se realiza la tarjeta impresa de manera física.

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ciencias y Humanidades

Departamento de Ingeniería Electrónica



**Simulación y Fabricación de Circuitos Impresos -
FE461**

VI. Guías de laboratorio parámetros y características del transistor.

Elaborado por Cristian A. Castañeda R.

A. Guía para el alumno sobre los parámetros y características del transistor

1. Pre-laboratorio	1
2. Introducción	2
3. Objetivos específicos	2
4. Teoría de dos puertos	2
5. Modelo r_e	6
6. Determinación de los parámetros de un transistor en Circuit Maker.	9
a. Voltaje Early	9
b. Ganancia en corriente h_{fe} o B para señales grandes y β para pequeña señal.	12
c. Resistencia entre colector y emisor ($1/h_{oe}$)	14
d. Resistencia entre la base y el emisor R_{be}	15

A. Guía del alumno para parámetros y características del transistor.

1. Preguntas de Pre-Laboratorio.

Instrucciones: antes de llegar a la práctica sobre parámetros y características del transistor investigue los siguientes temas los cuales le servirá para entender con mayor facilidad el laboratorio que realizará.

1. Investigar los distintos tipos de transistor que existen.
2. Leer sobre las aplicaciones básicas de los transistores.
3. ¿Cuáles son las características del transistor por las que son tan empleados en la electrónica?
4. Factores y agentes externos que influyen en el comportamiento del transistor.
5. Componentes y procesos de fabricación de los transistores.

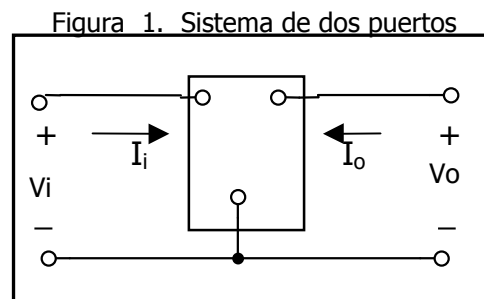
2. Introducción. En esta guía se obtendrán de forma teórica y simulada los parámetros característicos de un transistor, de tal manera que se conocerá el comportamiento del transistor sujeto a distintas especificación y así se diseñará en el cual se anticipa el comportamiento del componente.

3. Objetivos específicos.

a. Que el alumno se capaz de encontrar la B y β de un transistor por medio de los análisis teóricos de señales grandes y señales pequeñas y observe las diferencias encenices entre estos dos parámetros,

b. Obtención de datos gráficos como teóricos de los parámetros del transistor sujetos a los distintos cambios de las especificaciones tanto en corrientes como en voltajes en un transistor.

4. Teoría de dos puestas. Los componentes de tres terminales se pueden estudiar bajo esta teoría, así es el caso del transistor. En la figura 1 se muestran dos puertos o pares de terminales, en donde las terminales de la izquierda representaran la entrada y las de la derecha la salida del dispositivo. Se debe de notar también que para cada par de terminales se tienen dos variables de interés, tales como el voltaje y la corriente, ya sea de entrada o salida con las cuales se generaran las siguientes ecuaciones de donde se encontraran varios parámetros característicos del dispositivo.



$$V_i = h_{11} I_I + h_{12} V_o \quad (1)$$

$$I_o = h_{21} I_I + h_{22} V_o \quad (2)$$

donde los elementos h_{nn} son los **parámetros – h** o **parámetros híbridos**, pues cada ecuación resulta de un conjunto "híbrido" de medidas para las distintas h .

Trabajando con estos parámetros, se tomarán algunas consideraciones para poder encontrar una función matemática que los describa a cada uno de ellos. Primero se considerará que $V_o = 0$, despejando de (1) se llega a:

$$h_{11} = \frac{V_i}{I_i} \Big|_{V_o = 0} \quad (3)$$

Este parámetro está dado en ohmios y siendo conformada por elementos de entrada V_i e I_i se le conoce como "**impedancia de entrada en corto circuito**".

Ahora se toma a $I_i = 0$ al rededor de las conexiones de entrada, con lo que se llega a:

$$h_{12} = \frac{V_i}{V_o} \Big|_{I_i = 0} \quad (4)$$

Este parámetro carece de unidades y se puede notar que es el inverso a la ganancia en voltaje, denominando parámetro de "**relación de voltaje de transferencia en circuito abierto**".

Ahora bien, se toma en (2) $V_o = 0$ se logra que:

$$h_{21} = \frac{I_o}{I_i} \Big|_{V_o = 0} \quad (5)$$

Siendo éste igual a la ganancia en corriente del circuito y se le conoce como "**parámetro de la relación de corriente de transferencia directa en corto circuito**", al igual que el anterior, no posee unidades.

Por último se asume $I_i = 0$ y se determina el último parámetro:

$$h_{22} = \left. \frac{I_o}{V_o} \right| I_i = 0 \quad (6)$$

Denominado **"parámetro de admitancia de salida en circuito abierto"**. Tiene unidades Siemens, siendo inversos a los ohmios.

Para encontrar los componentes eléctricos que se comporten de esta manera, se emplean las leyes de Kirchhoff a la inversa y se obtendrán los circuitos de la figura 2. , siendo (a) el circuito equivalente híbrido de entrada, obtenido por la ley de voltajes a la inversa y (b) el circuito equivalente híbrido de salida, obtenido por la ley de corriente a la inversa.

Fig. 2. (a) Circuito híbrido de entrada

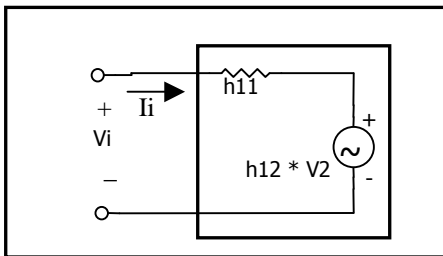
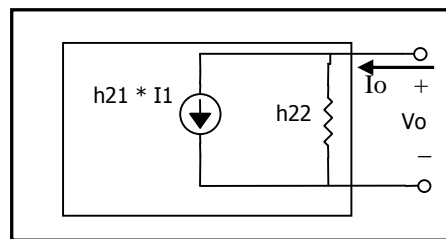


Fig. 2. (b) Circuito híbrido de salida



Los parámetros h tienen su respectiva notación al momento de ser empleados en los transistores, sus equivalentes se darán a continuación.

$h_{11} \Rightarrow$ resistencia de entrada $\Rightarrow h_i$

$h_{12} \Rightarrow$ razón de transferencia de voltaje inversa $\Rightarrow h_r$

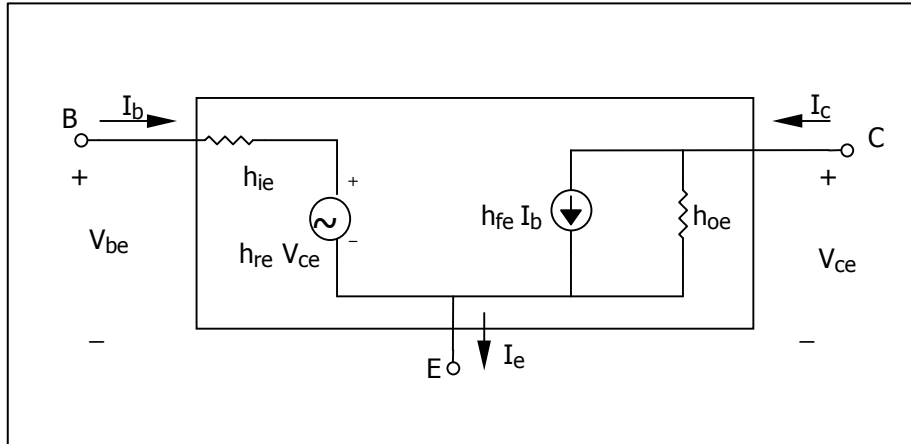
$h_{21} \Rightarrow$ razón de corriente de transferencia directa
o ganancia de corriente $\Rightarrow h_f$

$h_{22} \Rightarrow$ conductancia de salida $\Rightarrow h_o$

La configuración que se usará en este trabajo es conocida como emisor común, pues el emisor se conecta con tierra directamente o por medio de una resistencia. El circuito equivalente híbrido completo que caracteriza a un transistor en la configuración de emisor común se observa en la figura 3. Este circuito funciona para cualquier dispositivo lineal de tres terminales que no

posea fuentes internas independientes. Se denomina circuito híbrido debido a que aparecen juntas las configuraciones de Thevenin y de Norton.

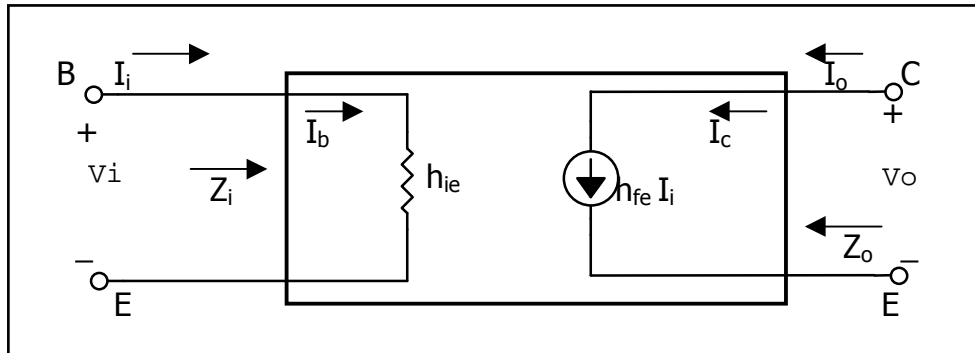
Fig. 3. circuito híbrido completo de emisor común.



En la figura 3. se debe de decir que $I_b = I_i$; $I_o = I_c$; $V_o = V_{ce}$; $V_i = V_{be}$; $h_{ie} = Z_i$; $h_{oe} = 1/Z_o$; $h_{re} = V_i/V_o = 1/A_v$ y por último $h_{fe} = I_o/I_i = A_i$.

Para simplificar el manejo matemático del circuito híbrido se realizaron ciertas suposiciones tales como $h_r \rightarrow 0$ puesto que se toma $V_o = 0$ en el análisis. También se toma a $1/h_o$ muy grande, por lo que esta rama se convierte en un abierto, teniéndose en cuenta que la impedancia de salida de un transistor es muy grande; debido a estas suposiciones, se llega a un nuevo circuito, figura 4; el cual es más sencillo de analizar y así mismo de manejar matemáticamente.

Fig. 4. Circuito híbrido simplificado en configuración de emisor común.



Como se puede apreciar

$$\boxed{I_i = I_b} \quad (7)$$

$$\boxed{I_o = I_c = h_{fe} I_b} \quad (8)$$

$$\boxed{Z_I = h_{ie}} \quad (9)$$

5. Modelo r_e . Una vez conocido el modelo híbrido se introducirá el modelo r_e , el cual es similar al anterior y con su manejo y uso de valores del análisis c.d. se pueden obtener datos del circuito equivalente aproximado tales como h_{ie} , r_e o resistencia del emisor.

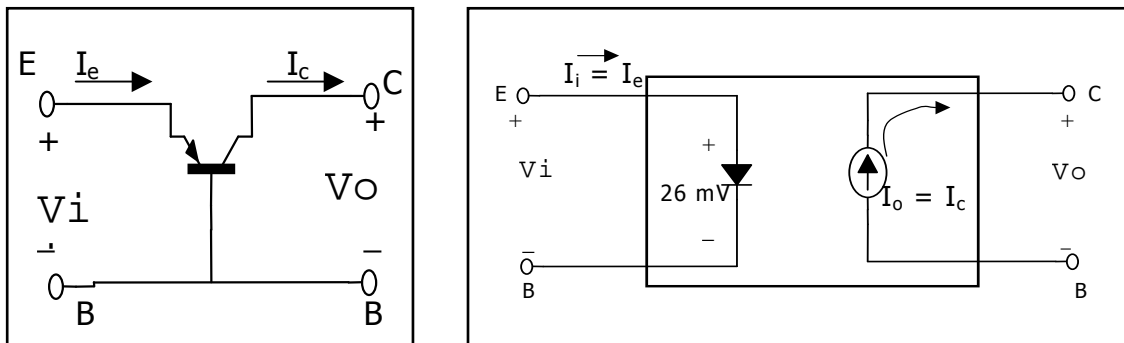
Este método toma la malla de emisor base, en configuración de base común, como un diodo y así se puede calcular la impedancia de entrada en el emisor.

$$\boxed{R_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_E \text{ mA}}} \quad \text{ohmios (46)}$$

donde 26 mV es el voltaje del diodo e I_E la corriente del emisor.

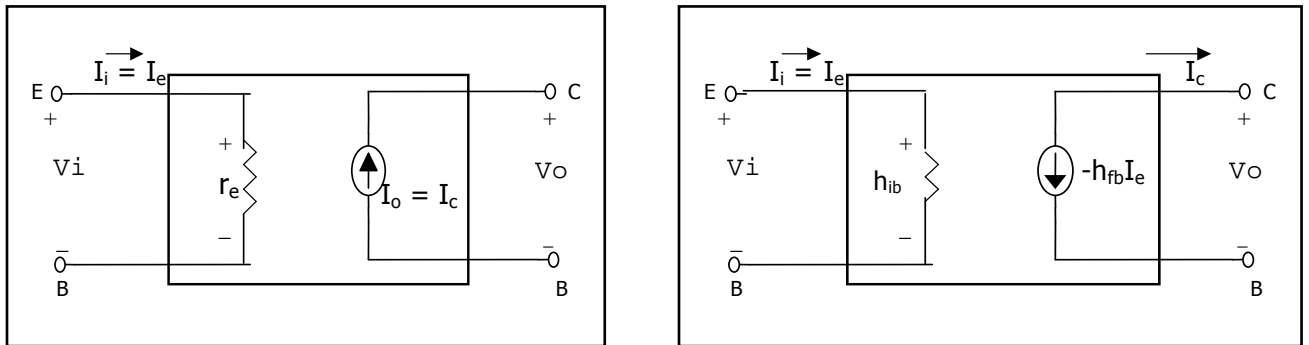
A r_e se le conoce como resistencia dinámica de un diodo y se puede deducir de la siguiente figura:

Fig. #17. a) Configuración de base-común, b) circuito equivalente con diodo.



En el circuito anterior se puede sustituir el diodo por la r_e que se encuentra en la ecuación (46) y así el diagrama se transforma de la siguiente manera:

Fig. #18. Circuito aproximado de BC a) equivalente re y b) híbrido equivalente.



Nótese que:

$$\begin{cases} h_{ib} = r_e \\ h_{fb} = 1 \end{cases} \quad (47)$$

$$\begin{cases} I_I = I_e \\ Z_I = r_e \\ Z_o = \infty \text{ ohm} \\ I_o = I_c = I_e \end{cases} \quad (48)$$

Si $I_i = I_e = 0 \therefore I_c = I_e = 0$

En el modelo r_e se supone que $h_{rb} = h_{ob} = 0$.

Para llevar a cabo este método en la configuración de emisor común se toma de nuevo las características de un diodo y se ignora el efecto de V_{CE} ; de aquí se tienen que:

$$r_{ac} = \frac{26 \text{ mV}}{I_B} \quad (49)$$

Pero

$$I_E \cong I_C = \beta I_B$$

Entonces

$$r_{ac} = \frac{26 \text{ mV}}{I_E/\beta} = \beta \frac{26 \text{ mV}}{I_E}$$

$$\Rightarrow r_{ac} = \beta r_e \quad (50)$$

Fig. #19 Determinación de r_{ac} para EC.

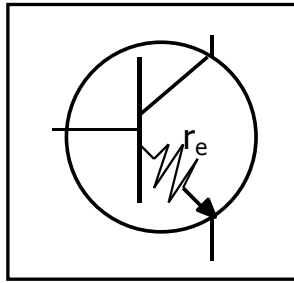
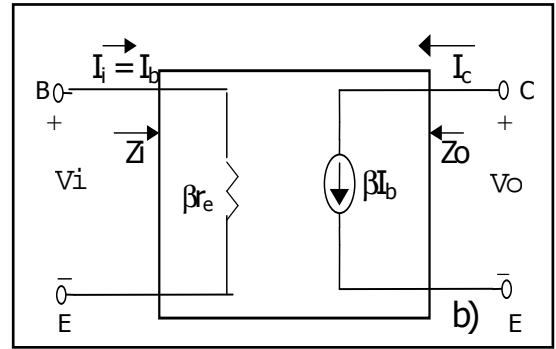
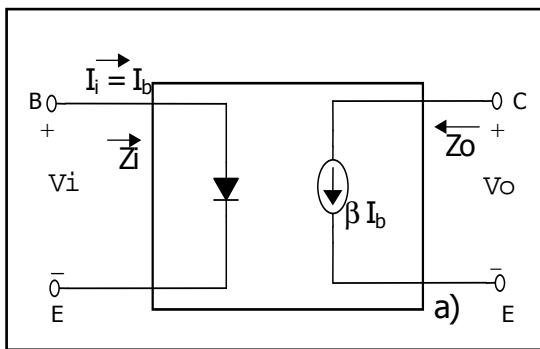


Fig. # 20 Circuitos equivalentes a) aproximado y b) modelo r_e .



Donde

$$\begin{cases} \beta = h_{fe} \\ \beta r_e = h_{ie} \end{cases} \quad (51)$$

Se debe mencionar que r_e se calcula con I_e en c.d. antes de realizar el análisis a.c.

Las magnitudes de los parámetros h se pueden demostrar utilizando las siguientes ecuaciones parciales:

$$h_{ie} = \frac{\partial v_i}{\partial i_i} = \frac{\partial v_{be}}{\partial i_b} \cong \frac{\Delta v_{be}}{\Delta i_b} \quad \left| \begin{array}{l} v_{ce} = \text{const.} \end{array} \right. \quad (10)$$

$$h_{re} = \frac{\partial v_i}{\partial v_o} = \frac{\partial v_{be}}{\partial v_{ce}} \cong \frac{\Delta v_{be}}{\Delta v_{ce}} \quad \left| \begin{array}{l} i_b = \text{const.} \end{array} \right. \quad (11)$$

$$h_{fe} = \frac{\partial i_o}{\partial i_i} = \frac{\partial i_c}{\partial i_b} \cong \frac{\Delta i_c}{\Delta i_b} \quad \left| \begin{array}{l} v_{ce} = \text{const.} \end{array} \right. \quad (12)$$

$$h_{oe} = \frac{\partial i_o}{\partial v_o} = \frac{\partial I_c}{\partial v_{ce}} \cong \frac{\Delta i_c}{\Delta v_{ce}} \quad \Big|_{I_b = \text{const.}} \quad (13)$$

Los parámetros h_{ie} y h_{re} se obtienen por medio de las características de entrada o de base; mientras h_{fe} y h_{oe} se pueden obtener de las características de salida o colector. Antes de determinar estos parámetros se debe de escoger un punto de operación adecuado a la aplicación y así no sobre dimensionar el circuito.

6. Determinación de los parámetros de un transistor en

Circuit Maker. El transistor que se analizará es el ECG26 debido a sus características las cuales son ideales para el circuito que se diseñará posteriormente.

a. Voltaje Early.

1) Generación de las curvas características (I_c Vrs. V_{ce}). Para simular estas curvas de salida del transistor se emplea el circuito 1 con los análisis y dimensiones necesarias se muestran en la figura 1.

Circuito 1. Circuito para generar las curvas características del transistor.

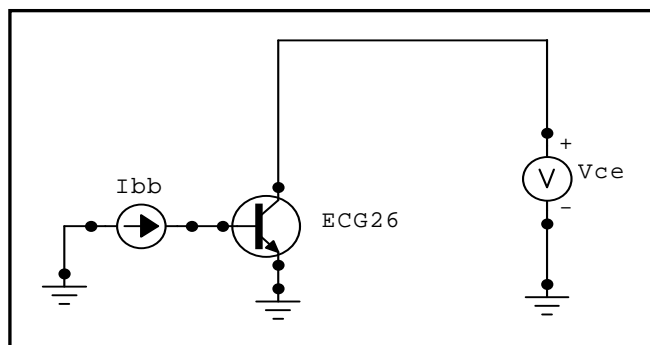
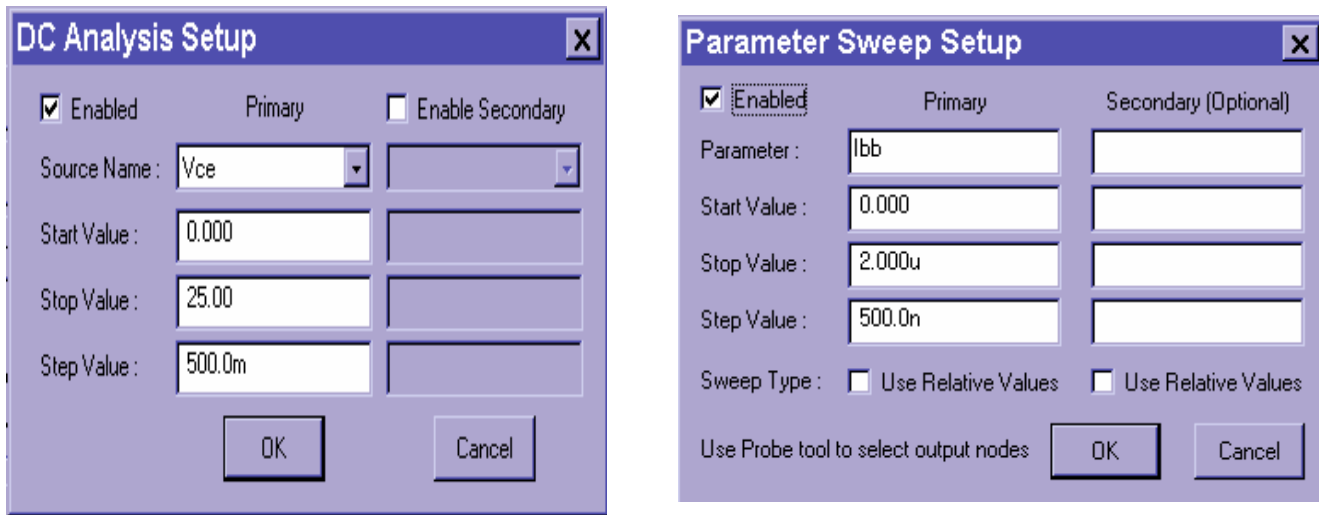


Figura 1. Análisis y dimensiones.



Con el análisis DC se mide la corriente del colector, generando así una gráfica formada por cinco curvas correspondientes al cambio de la corriente en la base (I_{bb}), lo que se dimensiono en el análisis de barrido de parámetros.

2) Cálculo de la ecuación de la recta " $I_c = m \cdot V_{ce} + b$ ". Primero tome las coordenadas ($X = V_{ce}$ y $Y = I_c$) de varios puntos en una mismas curva. Con los mismos V_{ce} medidos en la primera curva anote la corriente de colector correspondiente a estos en las curvas restantes. Con estos datos llene la tabla 1. en donde notará que a distintos V_{ce} se tendrán distintas corrientes de colector.

Tabla 1.

Curva Medición	I_{c_p1}	I_{c_p2}	I_{c_p3}	I_{c_p4}	I_{c_p5}
Vce 1 (V)					
Vce 2 (V)					
Vce 3 (V)					
Vce 4 (V)					
Ic 1 (μA)					
Ic 2 (μA)					
Ic 3 (μA)					
Ic 4 (μA)					

Ahora bien se procede a calcular la pendiente "m" y el intercepto en el eje Y "b" de cada recta por medio de las siguientes ecuaciones:

$$m_n = (Y_n - Y_{n-1}) / (X_n - X_{n-1}) \quad (A)$$

$$(Y - Y_{n-1}) = m_n (X - X_{n-1})$$

$$Y = m_n * X - m_n * X_{n-1} + Y_{n-1} \quad (B)$$

donde

$$b_n = Y_{n-1} - m_n * X_{n-1} \quad (C)$$

Nota: debe recordarse que en estas ecuaciones $Y = I_c$ y $X = V_{ce}$.

3) Cálculo del voltaje Early. Se despeja X de la ecuación (B) cuando $Y = I_c = 0$, de donde se tienen que:

$$X = X_{n-1} - (Y_{n-1}/m_n) = V_{Early\ n}$$

Con los resultados de los cálculos anteriores se debe de llenar la tabla 2.

Tabla 2.

Calculo \ Curva	Ic_p1	Ic_p2	Ic_p3	Ic_p4	Ic_p5
m2 (1/Ω)					
m3 (1/Ω)					
m4 (1/Ω)					
Promedio de m(1/Ω)					
b2 (μA)					
b3 (μA)					
b4 (μA)					
Promedio de b (μA)					
$V_{Early\ 2}$ (V)					
$V_{Early\ 3}$ (V)					
$V_{Early\ 4}$ (V)					
Promedio de V_{Early}(V)					

Para graficar las rectas completas de las curvas características, se introducen en el simulador las ecuaciones con los valores de sus respectivas pendientes e interceptos, siendo estos los valores promedios de cada parámetro anotados en la tabla 2. El formato matemático que entenderá el simulador se muestra en la siguiente función:

$$\boxed{((m_n * Vce_1) + b_n)} \quad (D)$$

donde Vce_1 es la etiqueta que le asigna el simulador a Vce.

Una vez introducidas todas las funciones que representan las distintas rectas se observa el punto donde estas se interceptan, siendo éste el valor del Voltaje Early.

b. Ganancia en corriente h_{fe} o β para señales grandes y β para pequeña señal. Para determinar este parámetro se utiliza el circuito 2 en el cual se observa que el transistor permanecerá polarizado por medio de la fuente Vbe, así mismo se genera una corriente de emisor por medio de Ie1. En la figura 2 se muestran los análisis y las dimensiones necesarias para simular y analizar esta característica del transistor.

Circuito 2.

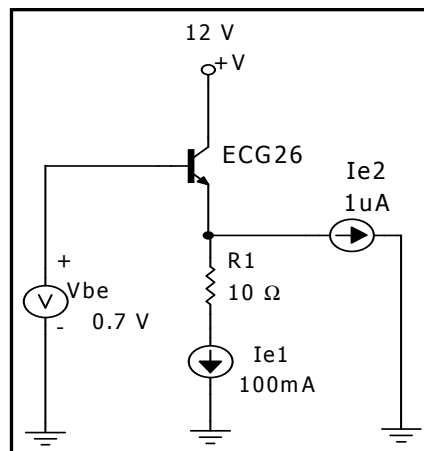
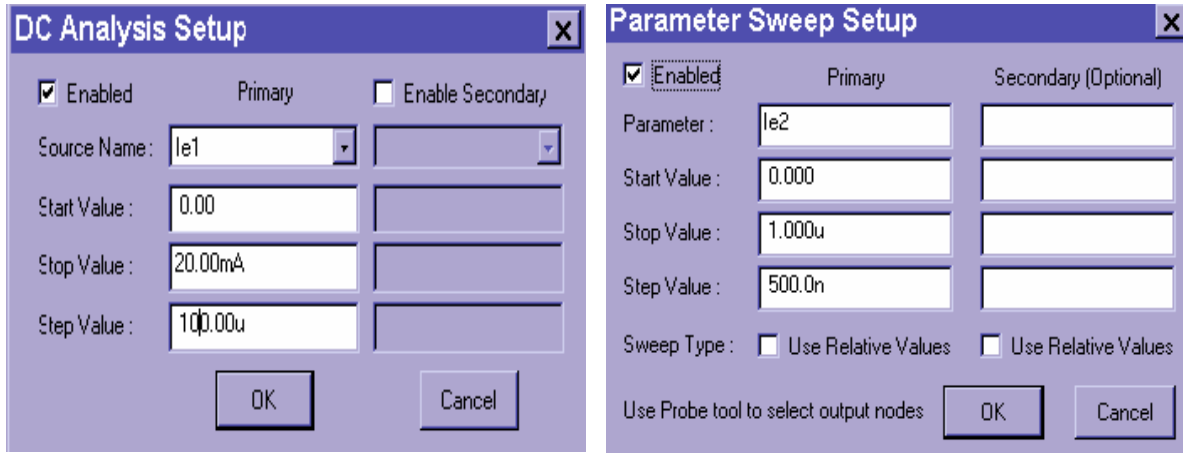


Figura 2. Análisis y dimensiones de que se utilizan en la determinación de la ganancia en corriente.



La fuente de corriente Ie2 genera el diferencial en Ie y como se sabe que $I_e \cong I_c$ genera así mismo el diferencial en Ic necesario para determinar beta.

1) Gráficas de B y β Vrs Ic. Para generar la gráfica de gran señal " B " se simula en el análisis DC la siguiente función matemática, teniendo en cuenta que las curvas tendrán en el eje X la variación aproximada de Ic:

$$(q1 [ic]/q1 [ib])$$

y para pequeña señal " β " se emplea la siguiente:

$$(q1 [ic]_p2 - q1[ic]) / (q1 [ib]_p2 - q1[ib]).$$

Nota: Se toma q1[ic]_p2 en lugar de q1[ic]_p1 o q1[ic]_p3, puesto que esta medición la genera el diferencial que se necesita, mientras que q1[ic]_p1 = 0 y q1[ic]_p3 = 1uA siendo este el estado inicial de la simulación y por lo tanto no se produce ningún cambio con la gráfica de gran señal.

Obtenidas las curvas anteriores se debe determinar en cada curva, mediante el uso de los cursores, el máximo valor de la ganancia en corriente y a qué corriente de colector corresponde. Para el transistor elegido la ganancia en corriente **B** es de 450.

Tabla 3.

	Máximo	Ic (uA)
Gran señal B		
Pequeña señal β		

En la tabla 4 se colocan varias Ic las cuales tendrán un beta distinto, se debe completar con los datos correspondientes.

Tabla 4.

Ic μA	B	β
100		
200		
500		
1000		

c. Resistencia entre colector y emisor (1/h_{oe}). Este parámetro esta dado por la variación de Ic con respecto a Vce, ver ecuación (13).

1) Generar la gráfica de Rce Vrs Ic: La ecuación de la pendiente de Ic está dado por $m = I_c / (V_{ce} - V_{Early})$, podemos definir

$$R_{CE} \cong - V_{Early} / I_C$$

tomando en cuenta que:

$$| - V_{Early} | \gg | V_{ce} |$$

Para generar esta curva se utiliza nuevamente el circuito 2, con la variación en el análisis DC de que Ie1 se barre desde 100uA a 2mA con un paso de 50uA mientras que el barrido de parámetros no cambia.

Para este parámetro la función matemática que se introduce en el análisis DC es la siguiente:

$$- V_{Early} / q1[ic]$$

Siendo q1[ic] la etiqueta que le asigna el simulador a la corriente del colector.

Introducir la misma función matemática poniendo en lugar del voltaje Early calculado el voltaje Early utilizado por el simulador (-197 V). ¿Cuánto varía Rce entre estas dos curvas? Para esto se toma una Ic determinada y se mide la Rce sobre las dos curvas y se calcula la variación entre ellas.

Tabla 5.

	Voltaje Early	Ic	Rce	Variación de Rce
Calculado				
Simulador				

Al igual que beta, Rce varía con Ic, encuentre esa variación llenando la tabla 6.

Tabla 6.

Ic μ A.	R _{CE} k Ω .	Teórica	Simulada
100			
200			
500			
1000			

d. Resistencia entre la base y el emisor R_{be}. Como se muestra en la ecuación (10) este parámetro se obtiene por el diferencial de Vbe entre el diferencial de Ib. Se emplea el circuito 2 con los barridos de Ie1 del análisis DC desde 100uA hasta 4mA y un paso de 100uA, sin variar el análisis de barrido de parámetros utilizado en la determinación de Beta.

1) Generar la gráfica de Rbe Vrs Ic. La función matemática que se introduce en el simulador es:

$$\frac{((vbe_1 - ie2_1) - (vbe_1_p2 - ie2_1_p2))}{(q1[ib] - q1[ib]_p2)}$$

donde vbe_1 es el voltaje de base e ie2_1 es el voltaje de emisor; nuevamente se toma el segundo parámetro del barrido (_p2) pues con éste se genera el diferencial de Ic.

Para conocer la variación de Rbe con respecto a Ic debe completarse la tabla 7.

Tabla 7.

Ic μ A.	R _{be} k Ω .	Teórica	Simulada
100			
200			
500			
1000			

B. Guía para el profesor sobre los parámetros y características del transistor

1. Pre-laboratorio	1
2. Introducción	2
3. Objetivos específicos	2
4. Teoría de dos puertos	2
5. Modelo r_e	6
6. Determinación de los parámetros de un transistor en Circuit Maker .	9
a. Voltaje Early	9
b. Ganancia en corriente h_{fe} o B para señales grandes y β para pequeña señal.	12
c. Resistencia entre colector y emisor ($1/h_{oe}$)	14
d. Resistencia entre la base y el emisor R_{be}	15

B. Guía del profesor para parámetro y características del transistor.

1. Preguntas de Pre-Laboratorio.

Instrucciones: antes de llegar a la práctica sobre parámetros y características del transistor investigue los siguientes temas los cuales le servirá para entender con mayor facilidad el laboratorio que realizará.

1. Investigar los distintos tipos de transistor que existen.
2. Leer sobre las aplicaciones básicas de los transistores.
3. ¿Cuáles son las características del transistor por las que son tan empleados en la electrónica?
4. Factores y agentes externos que influyen en el comportamiento del transistor.
5. Componentes y procesos de fabricación de los transistores.

2. Introducción. En esta guía se obtendrán de forma teórica y simulada los parámetros característicos de un transistor, de tal manera que se conocerá el comportamiento del transistor sujeto a distintas especificación y así se diseñará en el cual se anticipa el comportamiento del componente.

3. Objetivos específicos:

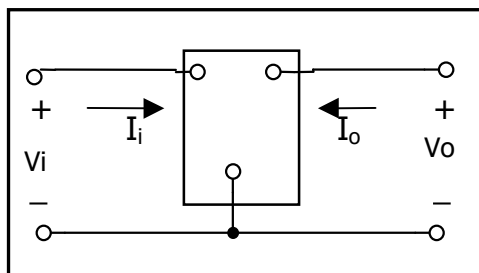
c. Que el alumno sea capaz de encontrar la B y β de un transistor por medio de los análisis teóricos de señales grandes y señales pequeñas y observe las diferencias esenciales entre estos dos parámetros,

d. Obtención de datos gráficos como teóricos de los parámetros del transistor sujetos a los distintos cambios de las especificaciones tanto en corrientes como en voltajes en un transistor.

e. Que el profesor sea capaz de resolver cualquier duda y dificultad que se le presente al alumno en la realización del experimento.

4. Teoría de dos puertos. Los componentes de tres terminales se pueden estudiar bajo esta teoría, así es el caso del transistor. En la figura 1 se muestran dos puertos o pares de terminales, en donde las terminales de la izquierda representarán la entrada y las de la derecha la salida del dispositivo. Se debe notar también que para cada par de terminales se tienen dos variables de interés, tales como el voltaje y la corriente, ya sea de entrada o salida con las cuales se generaran las siguientes ecuaciones de donde se encontraran varios parámetros característicos del dispositivo.

Figura 1. Sistema de dos puertos



$$\boxed{V_i = h_{11} I_i + h_{12} V_o} \quad (1)$$

$$\boxed{I_o = h_{21} I_i + h_{22} V_o} \quad (2)$$

Donde los elementos h_{nn} son los **parámetros – h** o **parámetros híbridos**, pues cada ecuación resulta de un conjunto “híbrido” de medidas para las distintas h .

Trabajando con estos parámetros, se tomarán algunas consideraciones para poder encontrar una función matemática que los describa a cada uno de ellos. Primero se considerará que $V_o = 0$, despejando de (1) se llega a:

$$\boxed{h_{11} = \frac{V_i}{I_i} \Big|_{V_o = 0}} \quad (3)$$

Este parámetro está dado en ohmios y siendo conformada por elementos de entrada V_i e I_i se le conoce como **“impedancia de entrada en corto circuito”**.

Ahora se toma a $I_i = 0$ al rededor de las conexiones de entrada, con lo que se llega a:

$$\boxed{h_{12} = \frac{V_i}{V_o} \Big|_{I_i = 0}} \quad (4)$$

Este parámetro carece de unidades y se puede notar que es el inverso a la ganancia en voltaje, denominando parámetro de **“relación de voltaje de transferencia en circuito abierto”**.

Ahora bien, tomando $V_o = 0$ en (2) se logra que:

$$\boxed{h_{21} = \frac{I_o}{I_i} \Big|_{V_o = 0}} \quad (5)$$

Siendo éste igual a la ganancia en corriente del circuito y se le conoce como **“parámetro de la relación de corriente de transferencia directa en corto circuito”**, al igual que el anterior, no posee unidades.

Por último se asume $I_i = 0$ y se determina el último parámetro:

$$h_{22} = \left. \frac{I_o}{V_o} \right|_{I_i = 0} \quad (6)$$

Denominado **“parámetro de admitancia de salida en circuito abierto”**. Tiene unidades Siemens, siendo inversos a los ohmios.

Para encontrar los componentes eléctricos que se comporten de esta manera, se emplean las leyes de Kirchhoff a la inversa y se obtendrán los circuitos de la figura 2. , siendo (a) el circuito equivalente híbrido de entrada, obtenido por la ley de voltajes a la inversa y (b) el circuito equivalente híbrido de salida, obtenido por la ley de corriente a la inversa.

Fig. 2. (a) Circuito híbrido de entrada

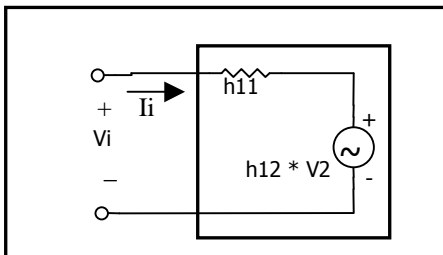
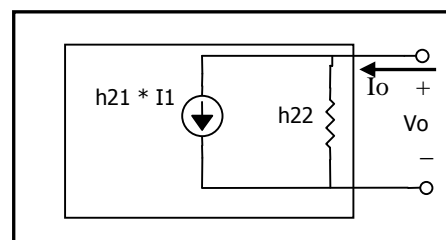


Fig. 2. (b) Circuito híbrido de salida.



Los parámetros h tienen su respectiva notación al momento de ser empleados en los transistores, sus equivalentes se darán a continuación.

$h_{11} \Rightarrow$ resistencia de entrada $\Rightarrow h_i$

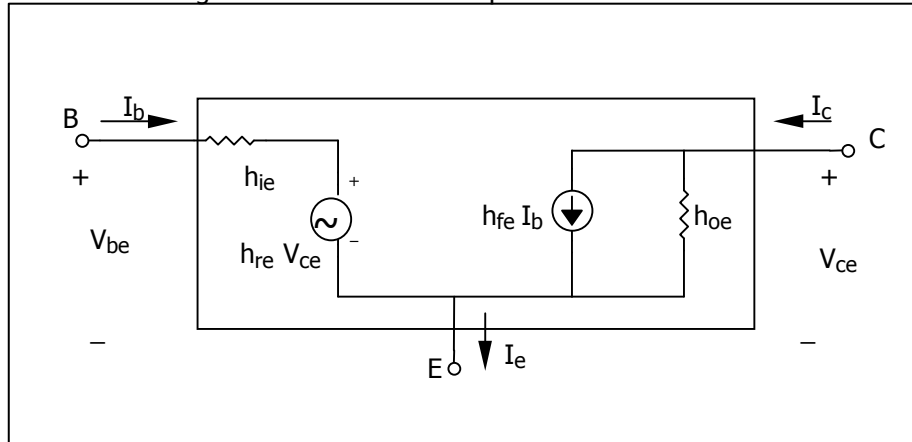
$h_{12} \Rightarrow$ razón de transferencia de voltaje inversa $\Rightarrow h_r$

$h_{21} \Rightarrow$ razón de corriente de transferencia directa
o ganancia de corriente $\Rightarrow h_f$

$h_{22} \Rightarrow$ conductancia de salida $\Rightarrow h_o$

El circuito equivalente híbrido completo que caracteriza a un transistor se observa en la figura 3. Este circuito funciona para cualquier dispositivo lineal de tres terminales que no posea fuentes internas independientes. Se denomina circuito híbrido debido a que aparecen juntas las configuraciones de Thevenin y de Norton.

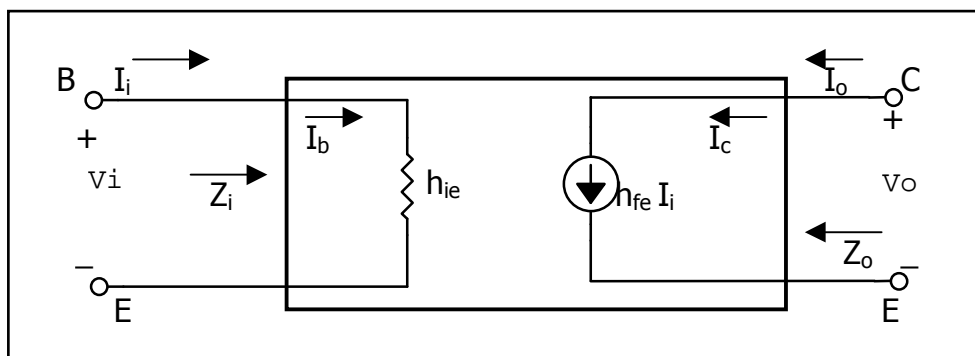
Fig. 3. circuito híbrido completo de emisor común.



En la figura 3. Se debe de decir que $I_b = I_i$; $I_o = I_c$; $V_o = V_{ce}$; $V_i = V_{be}$; $h_{ie} = Z_i$; $h_{oe} = 1/Z_o$; $h_{re} = V_i/V_o = 1/A_v$ y por último $h_{fe} = I_o/I_i = A_i$.

Para simplificar el manejo matemático del circuito híbrido se realizaron ciertas suposiciones tales como $h_r \rightarrow 0$ puesto que se tomo $V_o = 0$ en el análisis. También se toma a $1/h_o$ muy grande, por lo que esta rama se convierte en un abierto, teniéndose en cuenta que la impedancia de salida de un transistor es muy grande; debido a estas suposiciones, se llega a un nuevo circuito, figura 4; el cual es más sencillo de analizar y así mismo de manejar matemáticamente.

Fig. 4. Circuito híbrido simplificado en configuración de emisor común.



Como se puede apreciar

$$\boxed{I_i = I_b} \quad (7)$$

$$\boxed{I_o = I_c = h_{fe} I_b} \quad (8)$$

$$\boxed{Z_i = h_{ie}} \quad (9)$$

5. Modelo r_e . Una vez conocido el modelo híbrido se introducirá el modelo r_e , el cual es similar al anterior y con su manejo y uso de valores del análisis c.d. se pueden obtener datos del circuito equivalente aproximado tales como h_{ie} , r_e o resistencia del emisor.

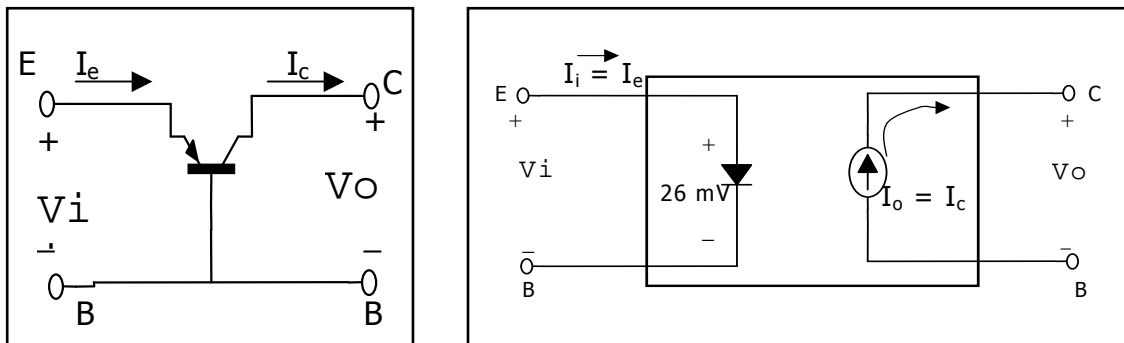
Este método toma la malla de emisor base, en configuración de base común, como un diodo y así se puede calcular la impedancia de entrada en el emisor.

$$\boxed{r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_E \text{ mA}}} \quad \text{ohmios (10)}$$

donde 26 mV es el voltaje del diodo e I_E la corriente del emisor.

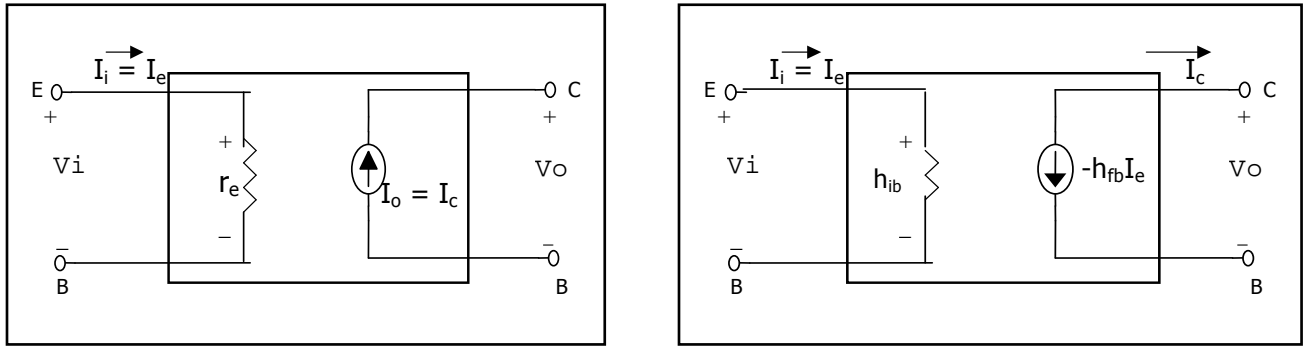
A r_e se le conoce como resistencia dinámica de un diodo y se puede deducir de la figura 5.

Fig. 5. a) configuración de base-común, b) circuito equivalente con diodo.



En la figura 5 se puede sustituir el diodo por la r_e que se encuentra en la ecuación (10) y así el diagrama se transforma en la figura 6.

Fig. 6. Circuito aproximado de BC a) equivalente re y b) híbrido equivalente.



Nótese que

$$\begin{cases} h_{ib} = r_e \\ h_{fb} = 1 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} I_I = I_e \\ Z_I = r_e \\ Z_O = \infty \text{ ohm} \\ I_O = I_C = I_e \end{cases} \quad (12)$$

si $I_i = I_e = 0 \therefore I_c = I_e = 0$

En el modelo r_e se supone que $h_{fb} = h_{ob} = 0$.

Para llevar a cabo este método en la configuración de emisor común se toma de nuevo las características de un diodo y se ignora el efecto de V_{CE} ; de aquí se tienen que:

$$r_{ac} = \frac{26 \text{ mV}}{I_B} \quad (13)$$

Pero

$$I_E \cong I_C = \beta I_B$$

Entonces

$$r_{ac} = \frac{26 \text{ mV}}{I_E/\beta} = \frac{\beta}{I_E} 26 \text{ mV}$$

$$\Rightarrow r_{ac} = \beta r_e \quad (14)$$

Fig. 7. Determinación de r_{ac} para EC.

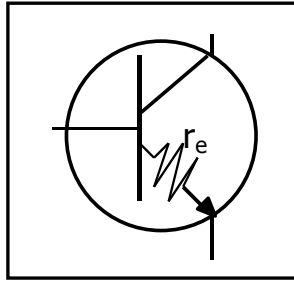
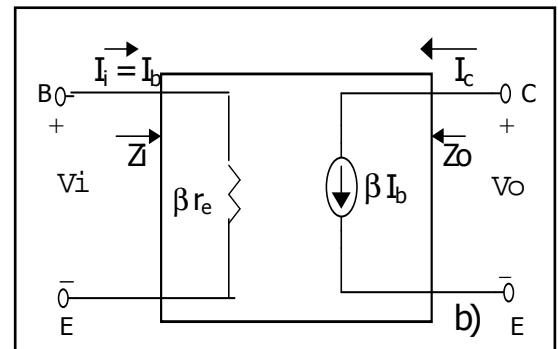
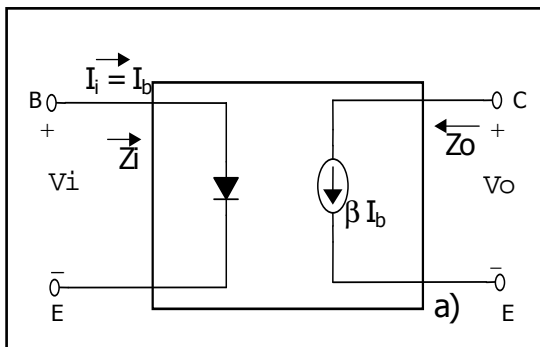


Fig. 8. Circuitos equivalentes a) aproximado y b) modelo r_e .



donde

$$\begin{cases} \beta = h_{fe} \\ \beta r_e = h_{ie} \end{cases} \quad (15)$$

se debe mencionar que r_e se calcula con I_e en c.d. antes de realizar el análisis a.c.

Las magnitudes de los parámetros h se pueden demostrar utilizando las siguientes ecuaciones parciales:

$$h_{ie} = \frac{\partial v_i}{\partial i_i} = \frac{\partial v_{be}}{\partial i_b} \cong \frac{\Delta v_{be}}{\Delta i_b} \quad \left| \quad v_{ce} = \text{const.} \right. \quad (16)$$

$$h_{re} = \frac{\partial v_i}{\partial v_o} = \frac{\partial v_{be}}{\partial v_{ce}} \cong \frac{\Delta v_{be}}{\Delta v_{ce}} \quad \left| \quad I_b = \text{const.} \right. \quad (17)$$

$$h_{fe} = \frac{\partial i_o}{\partial i_i} = \frac{\partial i_c}{\partial i_b} \cong \frac{\Delta i_c}{\Delta i_b} \quad \left| \quad v_{ce} = \text{const.} \right. \quad (18)$$

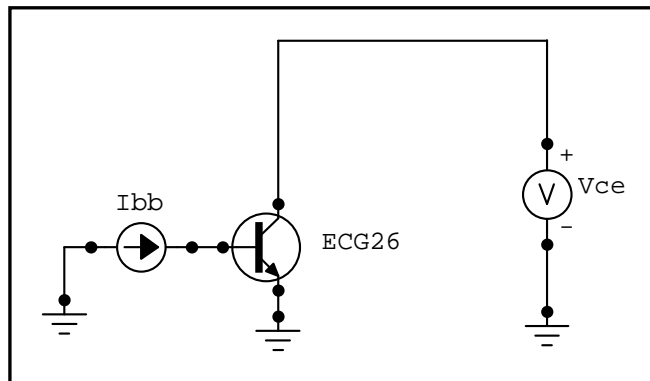
$$h_{oe} = \frac{\partial i_o}{\partial v_o} = \frac{\partial I_c}{\partial v_{ce}} \cong \frac{\Delta i_c}{\Delta v_{ce}} \quad \Bigg| \quad I_b = \text{const.} \quad (19)$$

Los parámetros h_{ie} y h_{re} se obtienen por medio de las características de entrada o de base; mientras h_{fe} y h_{oe} se pueden obtener de las características de salida o colector. Antes de determinar estos parámetros se debe escoger un punto de operación adecuado a la aplicación y así no sobre dimensionar el circuito.

6. Determinación de los parámetros en Circuit Maker.

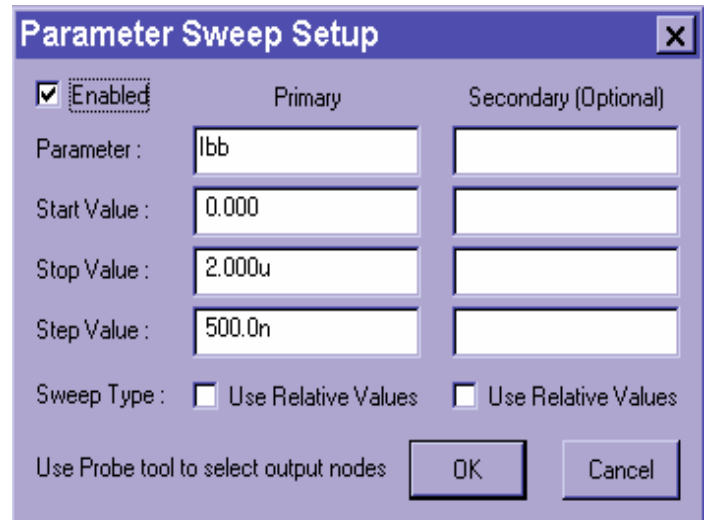
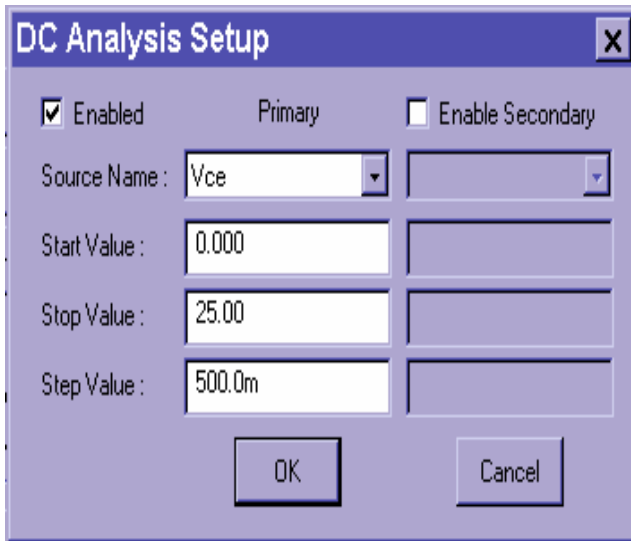
a. Voltaje Early. Para determinar este parámetro se utilizan las curvas características de salida del transistor (I_c Vrs. V_{CE}) generadas por el circuito 1. Se tomarán la pendiente de cada curva y se encontrará el punto donde se intercepten, siendo éste el valor del voltaje Early.

Circuito 1.
Circuito para generar las curvas características del transistor.

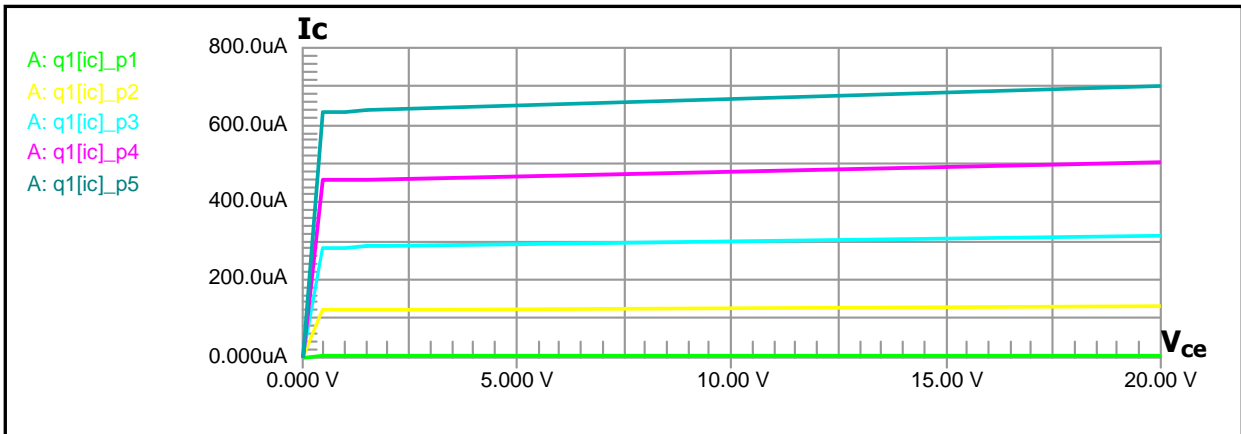


En la figura 1 se muestran los análisis y las dimensiones necesarias para generar este grupo de curvas.

Figura 1.



Gráfica 1. Curvas características de salida de un transistor (I_c , Vrs. V_{ce}).



Una vez obtenidas las curvas características de salida, gráfica 1, se procede a calcular la ecuación de la recta ($I_c = m \cdot V_{ce} + b$) de cada curva para encontrar el punto en donde se intercepten el cual corresponde al valor del voltaje Early. Para esto se toman las coordenadas "X,Y" de dos punto distintos.

En este caso se midieron la I_c de cada curva correspondiente a los $V_{ce} = 105$ V y 111 V, siendo estos X_1 y X_2 respectivamente. Esta mediciones se muestran a continuación en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de las coordenadas.

	vce1= X1 volts	vce2=X2 Volts	Y1 A	Y2 A
Ic2	105	111	1.86E-04	1.90E-04
ic3	105	111	4.40E-04	4.49E-04
ic4	105	111	7.09E-04	7.23E-04
ic5	105	111	9.84E-04	1.00E-03

Con estos datos se procede a calcular la pendiente m

$$m = (Y2 - Y1) / (X2 - X1) \quad (A)$$

y el intercepto en el eje "Y" = b

$$(Y - Y1) = m (X - X1)$$

$$Y = m*X - m*X1 + Y1 \quad (B)$$

donde

$$b = Y1 - m*X1 \quad (C)$$

en estas ecuaciones Y = Ic y X = Vce.

Para calcular el voltaje Early se despeja X de la ecuación (B) cuando Y = Ic = 0, se tiene que:

$$X = X1 - (Y1/m) = V_{early}$$

Los resultados obtenidos a partir de los datos tomados se presentan en la tabla 2.

Tabla 2.

	vce1= X1	vce2=X2	Y1 (A)	Y2 (A)	m (A/V)	b (A)	V Early (V)
Ic2	105	111	1.86E-04	1.90E-04	6.31667E-07	1.20E-04	-189.95
ic3	105	111	4.40E-04	4.49E-04	1.49167E-06	2.83E-04	-189.985
ic4	105	111	7.09E-04	7.23E-04	2.40333E-06	4.56E-04	-189.903
ic5	105	111	9.84E-04	1.00E-03	3.345E-06	6.33E-04	-189.09
						Promedio	-189.732

El voltaje Early obtenido por este procedimiento es de -189.732 V mientras que en el utilizado por el simulador es de -197 voltios. Para trazar las rectas correspondientes a cada curva se realizan las siguientes funciones matemáticas en el Circuit Maker:

$$I_c = (m \cdot V_{ce}) + b$$

$$I_{c2} = ((.000000631667 \cdot v_{ce_1}) + 0.000120)$$

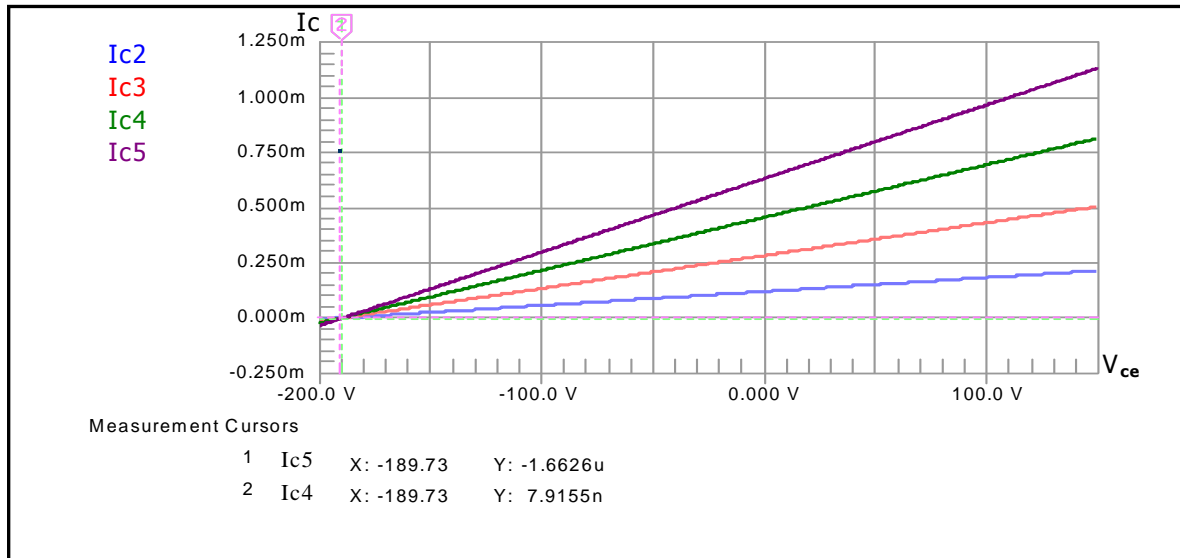
$$I_{c3} = ((.00000149167 \cdot v_{ce_1}) + 0.000283)$$

$$I_{c4} = ((.00000240333 \cdot v_{ce_1}) + 0.000456)$$

$$I_{c5} = ((.000003345 \cdot v_{ce_1}) + 0.000633)$$

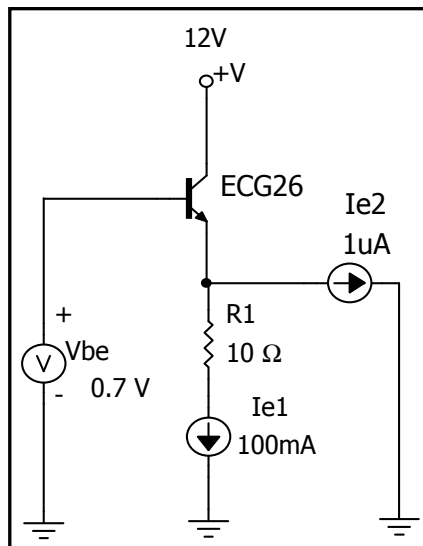
Las curvas obtenidas con estos resultados se muestran en la gráfica 2 y así mismo se marca el voltaje Early.

Gráfica 2. Voltaje Early.



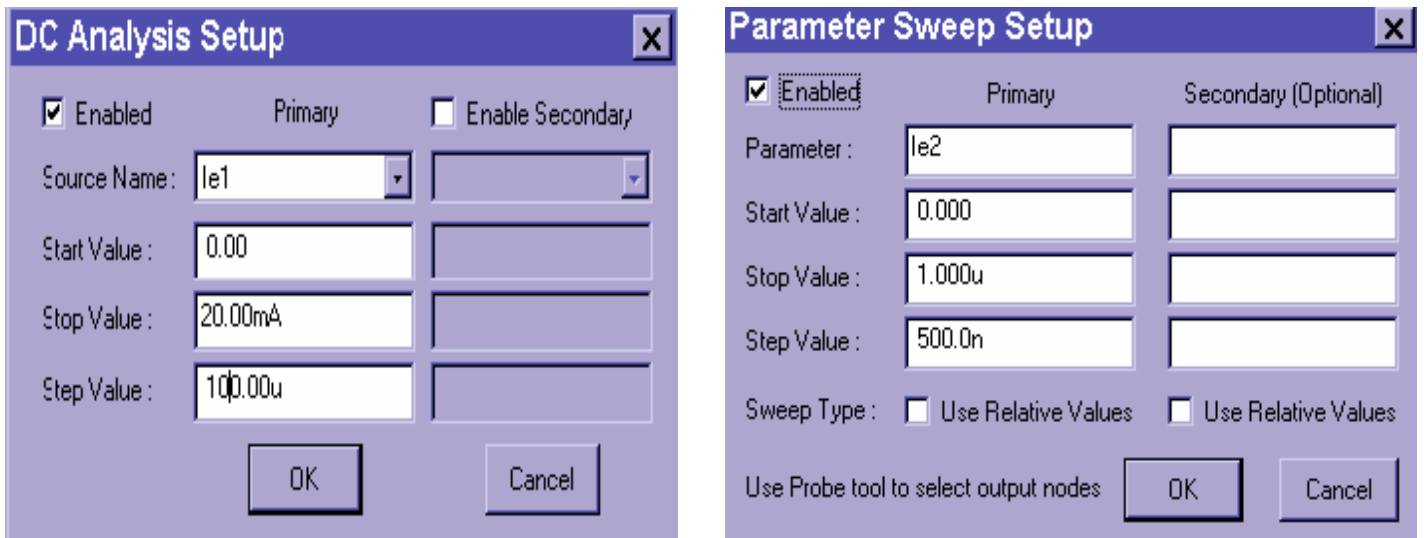
b. Ganancia en corriente h_{fe} o β para señales grandes y β para pequeña señal.

Circuito 2.



El circuito 2 será utilizado para determinar la ganancia en corriente del transistor ECG26.

Figura 2. Análisis y dimensiones de que se utilizan en la determinación de la ganancia en corriente.



La fuente de corriente I_{e2} genera el diferencial en I_e y como se sabe que $I_e \cong I_c$ genera así mismo el diferencial en I_c necesario para determinar beta.

Para generar la gráfica de gran señal se simula la siguiente función matemática:

$$(q1[ic]/q1[ib])$$

y para pequeña señal se emplea la siguiente:

$$(q1[ic]_{p2}-q1[ic])/(q1[ib]_{p2}-q1[ib]).$$

nótese que se toma $q1[ic]_{p2}$ en lugar de $q1[ic]_{p1}$ o $q1[ic]_{p3}$, puesto que esta medición es la que genera el diferencial que se necesita, mientras que $q1[ic]_{p1} = 0$ y $q1[ic]_{p3} = 1\mu A$, no generan ningún cambio con la de gran señal.

Las curvas generadas por estas funciones matemáticas se muestran en la Gráfica #3.

Gráfica #3. Beta de gran señal y pequeña señal.

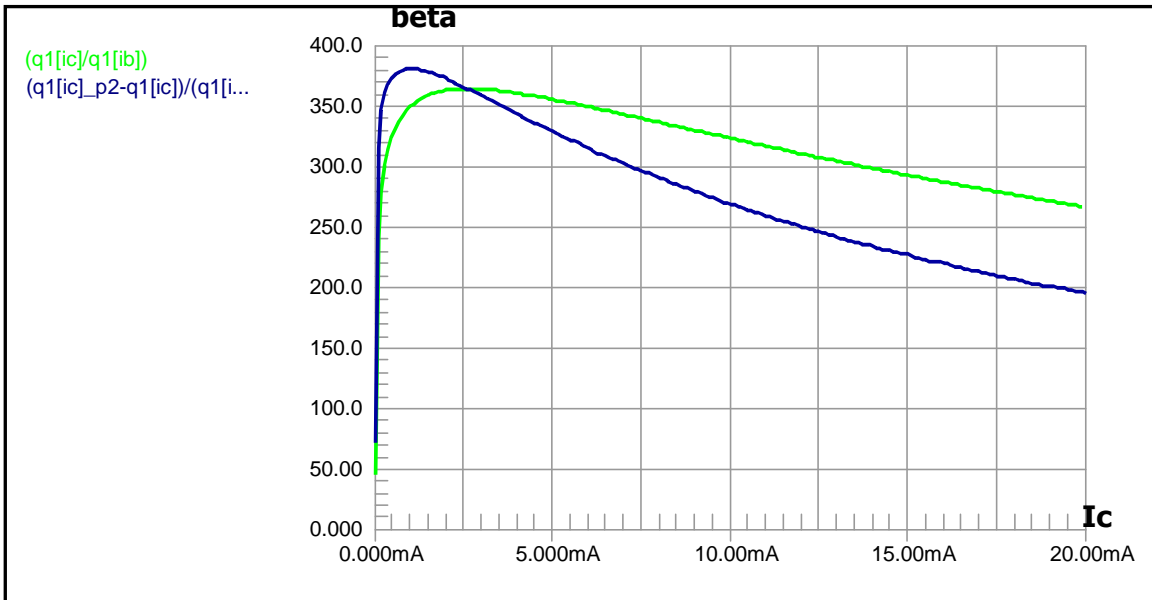


Tabla 3.

Ic μ A	B	β
100	191.27	247.18
200	276.61	341.19
500	368.50	368.50
1000	349.67	381.40

c. Resistencia entre colector y emisor ($1/h_{oe}$). Este parámetro está dado por la variación de I_c con respecto a V_{ce} , ver ecuación (13). Como la ecuación de la pendiente de I_c está dado por $m = I_c / (V_{ce} - V_{Early})$, podemos definir

$$R_{CE} \cong -V_{Early} / I_c = 189.73 / q1[ic]$$

$$\text{ya que } |-V_{Early}| \gg |V_{ce}|$$

El circuito 2 se utiliza nuevamente para generar esta gráfica, con la variación en el análisis DC de que I_{e1} se barre desde 100uA a 2mA con un paso de 50uA mientras que el barrido de parámetros no cambia.

Para este parámetro la función matemática que se introduce en el análisis DC es la siguiente:

$$- V_{\text{Early}} / I_c = 189.73 / q1[ic]$$

las curvas generada por esta ecuación se muestra en la gráfica #4.

Gráfica #4. Rce con el Voltaje Early calculado y con el proporcionado por el simulador.

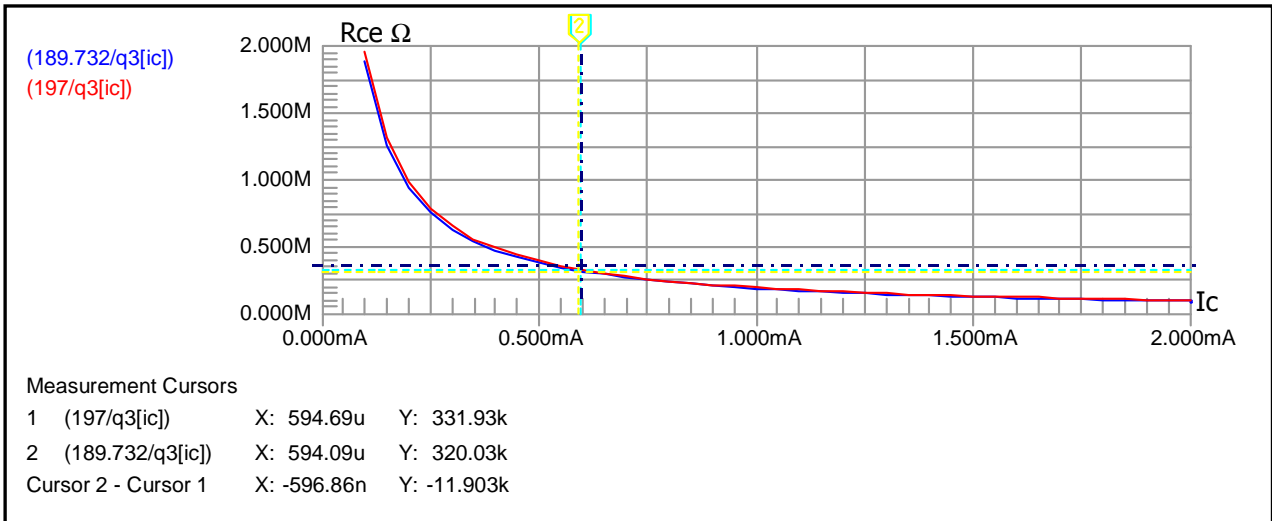


Tabla 4.

Ic μA.	R _{CE} kΩ.	Teórica	Simulada
100	1897.3	1886.2	1886.2
200	984.65	947.29	947.29
500	379.46	320.02	320.02
1000	189.73	190.08	190.08

d. Resistencia entre la base y el emisor R_{be}: Como se muestra en la ecuación (10) este parámetro se obtiene por el diferencial de V_{be} entre el diferencial de I_b. Se emplea el circuito 2 con los barrido de I_{e1} del análisis DC desde 100uA hasta 4mA y un paso de 100uA, sin variar el análisis de barrido de parámetros utilizado en la determinación de Beta.

La función matemática que se introduce en el simulador es:

$$((vbe_1-ie2_1)-(vbe_1_p2-ie2_1_p2))/(q1[ib]-q1[ib]_p2)$$

donde v_{be_1} es el voltaje de base e i_{e2_1} es el voltaje de emisor; nuevamente se toma el segundo parámetro del barrido ($_p2$) pues con este se genera el diferencial de I_c .

La gráfica que genera esta función se observa en la gráfica #5.

Gráfica #5. R_{be} del transistor ECG26.

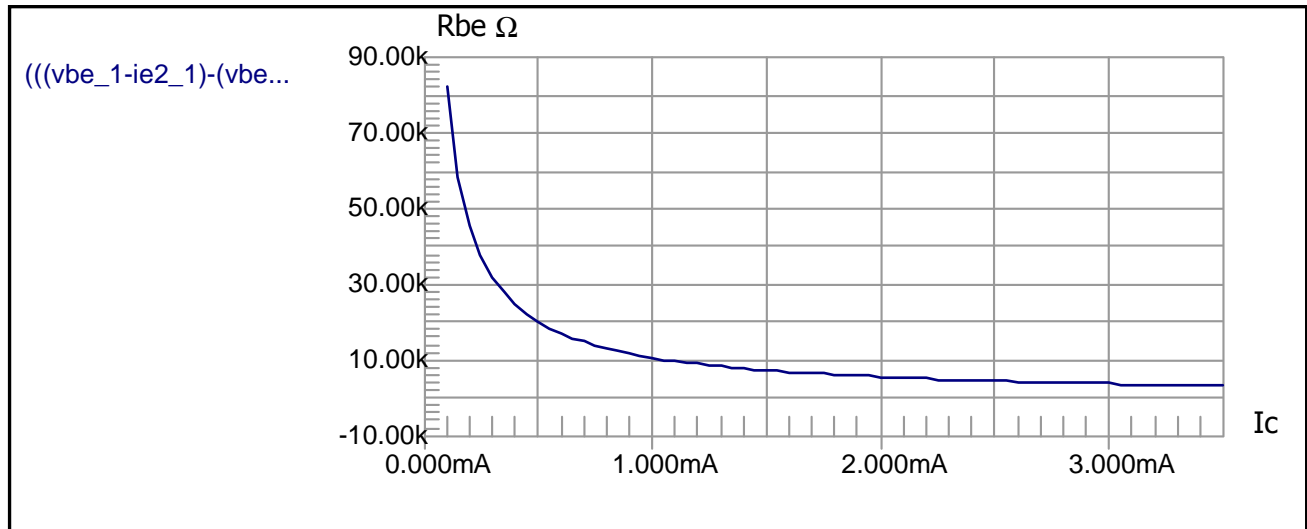


Tabla 5.

I_c μA .	R_{BE} k Ω .	Teórico	Simulado
100	91		82.313
200	45.5		45.510
500	18.2		20.086
1000	9.1		10.601

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ciencias y Humanidades

Departamento de Ingeniería Electrónica



**Simulación y Fabricación de Circuitos Impresos -
FE461**

V. Etapa de amplificación.

Elaborado por Cristian A. Castañeda R.

A. Guía para el alumno sobre la etapa de amplificación

1. Pre-laboratorio	1
2. Introducción	2
3. Objetivos específicos	3
4. Punto de operación "Q"	3
5. Regiones de un transistor	5
6. Diseño de un circuito de auto polarización	12
7. Especificaciones y diseño del circuito amplificador	13
8. Cálculo de la resistencia de entrada	13
9. Simulación	14
10. Configuración de emisor-seguidor	15
11. Etapa amplificadora completa	17
12. Simulación de la etapa amplificadora	17
13. Trax Maker	18

A. Guía del alumno para la etapa de amplificación.

1. Preguntas de Pre-Laboratorio.

Instrucciones: antes de llegar a la práctica sobre la etapa de amplificación investigue los siguientes temas los cuales le servirán para entender con mayor facilidad el laboratorio que realizará.

1. ¿Qué es el punto "Q"?
2. ¿Cuáles son las regiones de funcionamiento de un transistor?
3. ¿Qué es auto polarización?
4. ¿Posibles configuraciones de un transistor?

2. Introducción. Al introducir una señal de amplitud relativamente pequeña en un circuito de cuya salida se obtiene una señal con la misma forma que la de entrada y con una mayor amplitud se dice que dicha señal fue amplificada. Esto se logra por medio de una etapa de amplificación. En esta guía se llevara a cabo dicho circuito conformado por transistores, analizándose sus distintas configuraciones y características tanto del circuito amplificador como del mismo transistor.

Como ya se sabe, el transistor es un dispositivo no lineal lo cual hace necesario conocer sus propiedades, esto se hará por medio de la representación gráfica de las mismas. Es necesario tener dos grupos de gráficas o curvas características; uno que represente las características de entrada o **características estáticas de base** en donde se muestran V_{BE} Voltaje de base-emisor Vrs. La corriente de base I_B y el otro representa las características de salida del transistor o **características estáticas de colector**, donde se muestran el voltaje entre colector y emisor V_{CE} Vrs la corriente del colector I_C . Las gráficas son proporcionadas por el fabricante o pueden ser obtenidas mediante el análisis por osciloscopio del circuito. En este trabajo se obtendrán por medio del análisis DC en el simulador.

Se debe tener en cuenta que un transistor puede trabajar en distintas configuraciones tales como base común, emisor común o colector común, las cuales tiene cada una sus curvas características, tanto de entrada como de salida. En esta guía se empleará la configuración de emisor común.

Un transistor tiene tres regiones de operación, la región de corte, la región de saturación y la región activa; siendo esta última del interés de este trabajo, puesto que en dicha región el transistor se comporta de una forma lineal en cierto intervalo de voltajes y corrientes; así mismo en esta región se encuentra el punto de operación denominado **punto Q**. Establecer dicho punto tiene como objeto que la señal de entrada se transfiera con fidelidad además de obtener el máximo intervalo de amplificación sin encontrar distorsiones que afecten la señal de salida, las cuales producen variaciones con respecto a la señal original.

Para incrementar la magnitud de una señal eléctrica se usan elementos pasivos, tales como transformadores o circuitos L-C que cerca de resonancia logran amplificar los niveles de potencia o de corriente, pero para lograr que el nivel de potencia de una señal se eleve, es

necesario emplear dispositivos activos, tal es el caso de los transistores, en donde una señal pequeña de entrada controla las variaciones de potencial o la corriente de salida de mayor magnitud.

3. Objetivos específicos.

- a. Que el alumno logre una colocación óptima del punto de operación de la etapa de amplificación, utilizando las especificaciones que se le proporcionen.
- b. Que obtenga con éxito las curvas características del transistor que empleará en el experimento.
- c. Conocimiento de los efectos que produce la colocación tanto correcta como incorrecta del punto de operación.
- d. Que el alumno logre trasladar con éxito el diagrama del circuito simulado en Circuit Maker 2000 a una tarjeta impresa haciendo uso del programa Trax Maker.

4. Punto de operación "Q". Al momento de utilizar etapas con transistores se le da una gran importancia al hecho de establecer un punto de operación apropiado y mantenerlo fijo, independiente a las variaciones que pudieran presentarse por la manufactura y el envejecimiento de los componentes, así como el cambio de temperatura ambiente y otros factores que puedan afectar el funcionamiento deseado en la implementación electrónica.

Un punto Q óptimo se encuentra en la región activa (figura #4), del transistor lo que se logra suministrando voltajes directos en las terminales tanto de entrada como de salida; de tal manera que la unión base-emisor esté polarizada directamente y la unión de base-colector se encuentre en polarización inversa. Después de ubicar el punto de operación, las variaciones en el tiempo de la señal de entrada, tales como la corriente de base, deberán producir una señal de salida con la misma forma de onda y con mayor amplitud. La importancia del punto Q reside en mantener la señal amplificada sin distorsiones con respecto a la original, es decir, que no se pierda información y no se introduzca ruido alguno; si estas variaciones de salida están

recortadas o no reproducen satisfactoriamente la señal de entrada es probable que el punto de operación no haya sido bien seleccionado.

Se debe tener en cuenta que el punto de operación se puede definir por medio de I_B y V_{CE} , de I_B e I_C o bien I_C y V_{CE} , ya sea de una manera gráfica (figura #3), utilizando las curvas características del transistor (figuras #1 y #2), o de una forma matemática, por medio de los análisis DC y AC del circuito a utilizar.

Figura # 1. Curvas características de salida (colector) del transistor.

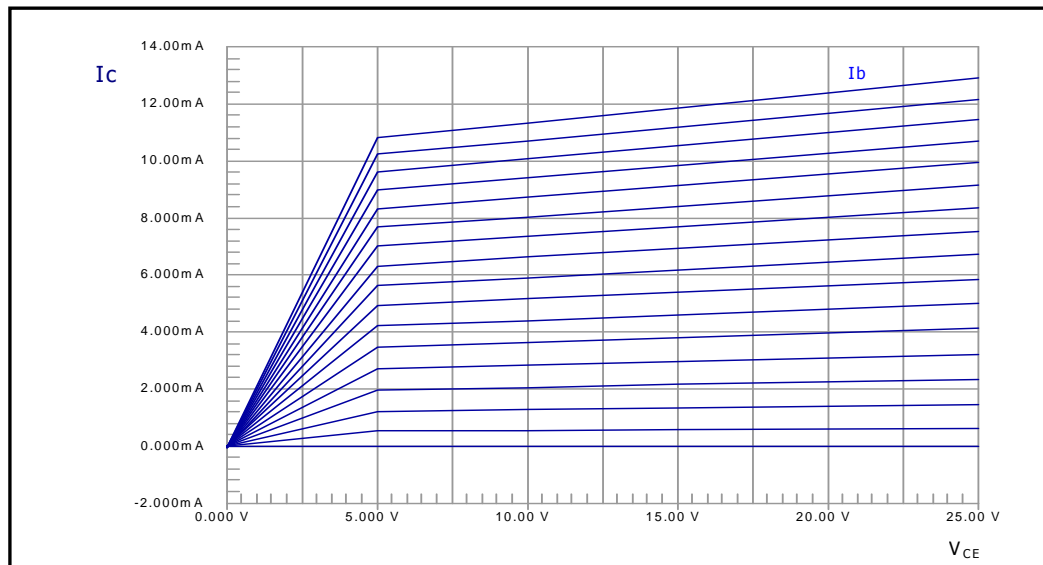


Figura # 2. Características de entrada del transistor.

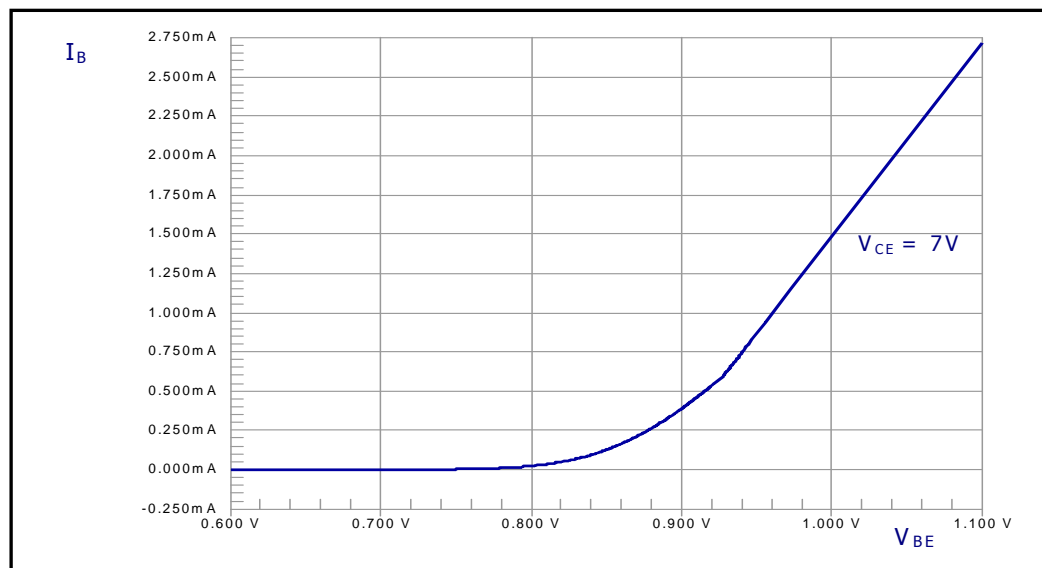
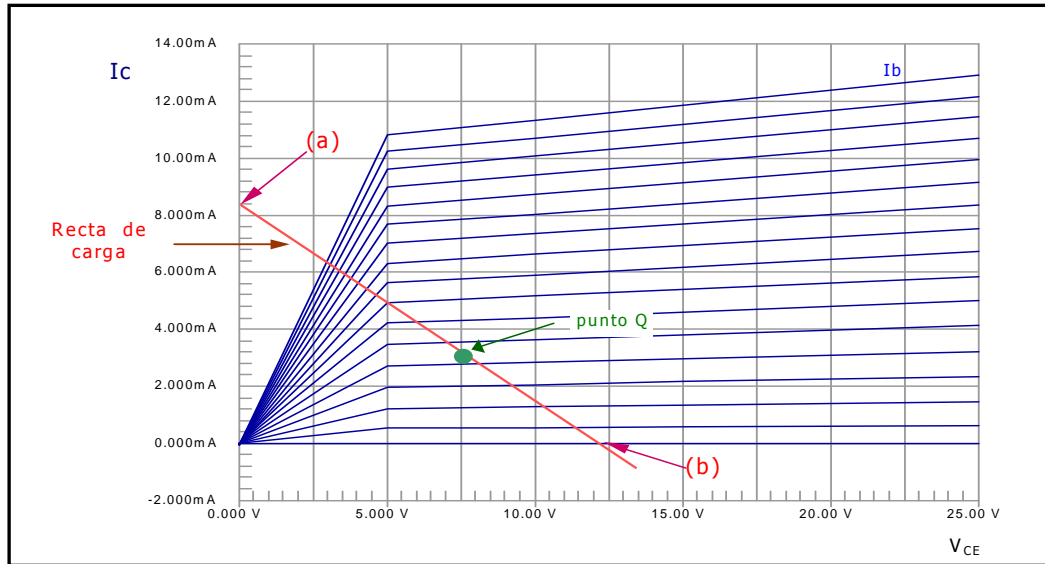
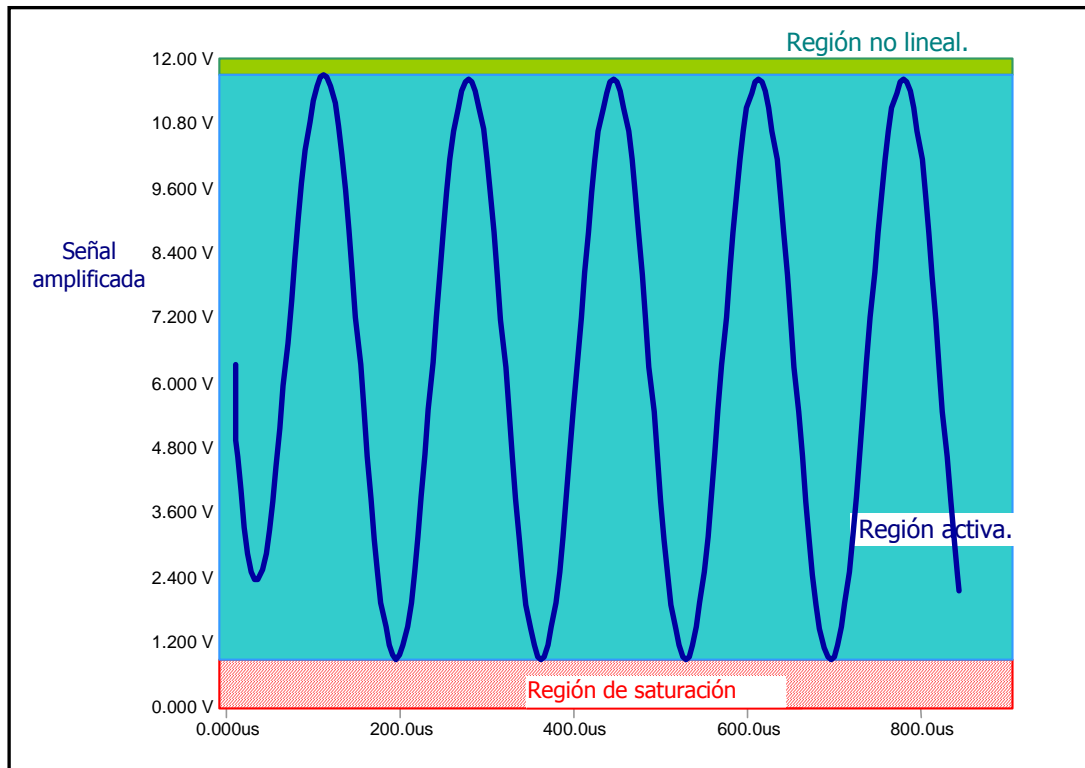


Figura # 3. Curvas características de entrada con la recta de carga y un punto Q bien seleccionado en $V_{ce} = 7V$, $I_c = 3m A$. La corriente I_c máxima se encuentra cuando V_{ce} es cero (a) y el V_{ce} máximo se encuentra con I_c igual a cero. (b)



5. Regiones de un transistor.



La región que se observa abajo de la señal se conoce como la región de saturación, teniendo un ancho de 1.2 volts. En esta región se puede perder información debido a cortes en la señal de salida, como los que se observan en las figuras #8 y #9.

La región de no linealidad se encuentra hasta arriba y tiene un ancho de 0.2 volts. En esta región, aunque no se pierda información, no se logra el efecto de ampliación deseado. La figura #5 muestra este efecto, obsérvese que la ampliación es mínima.

La región activa (figura #4), es la de mayor interés al manejar transistores como amplificadores. En esta región no se pierde información y tampoco se deforma la señal de salida, aunque se debe tener cuidado en la colocación del punto Q pues se corre el riesgo de estar muy cerca a cualquiera de las otras dos regiones y si la señal de entrada pasa los límites de voltaje se pueden producir efectos no deseados en la ampliación. Las figuras #5 y #6 muestran estas posibilidades.

Figura # 4. Señal amplificada con $\beta = 100$, con un punto de operación en 7 Voltios.
Amplificación óptima, sin deformaciones.

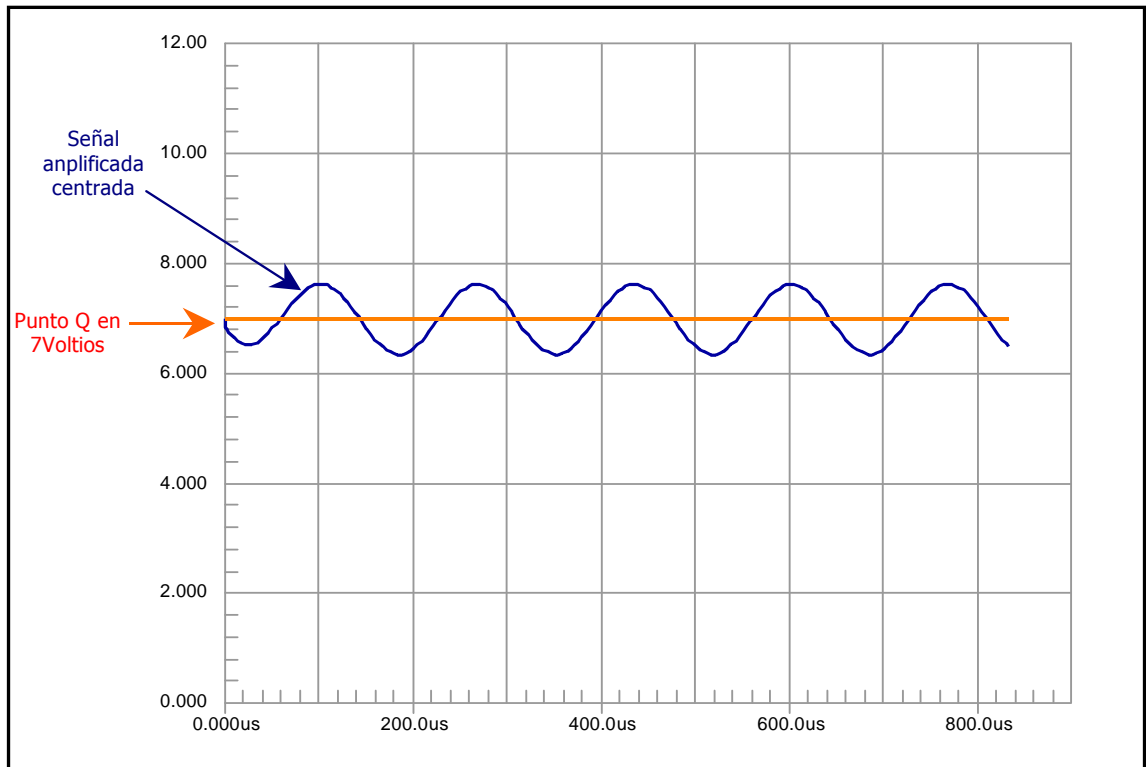


Figura # 5. Señal con un punto Q en 11.98 V; se encuentra en la región no lineal del transistor.

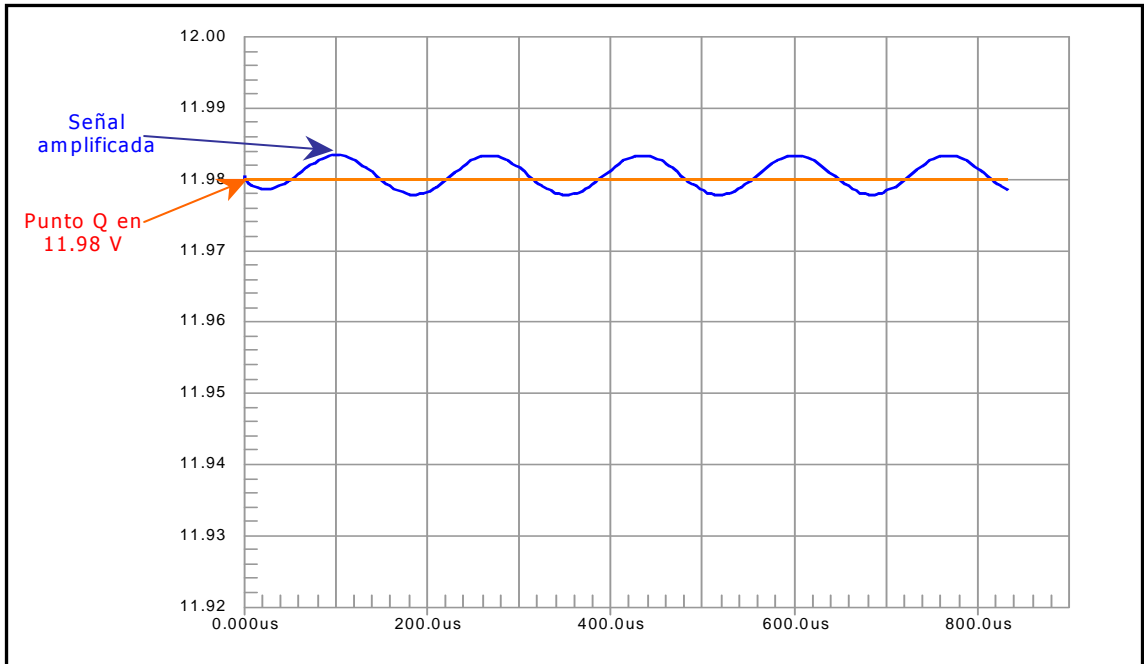


Figura # 6. Punto de operación en 9.5 V. No se pierde información de la señal original, pero está cerca de la región no lineal del transistor.

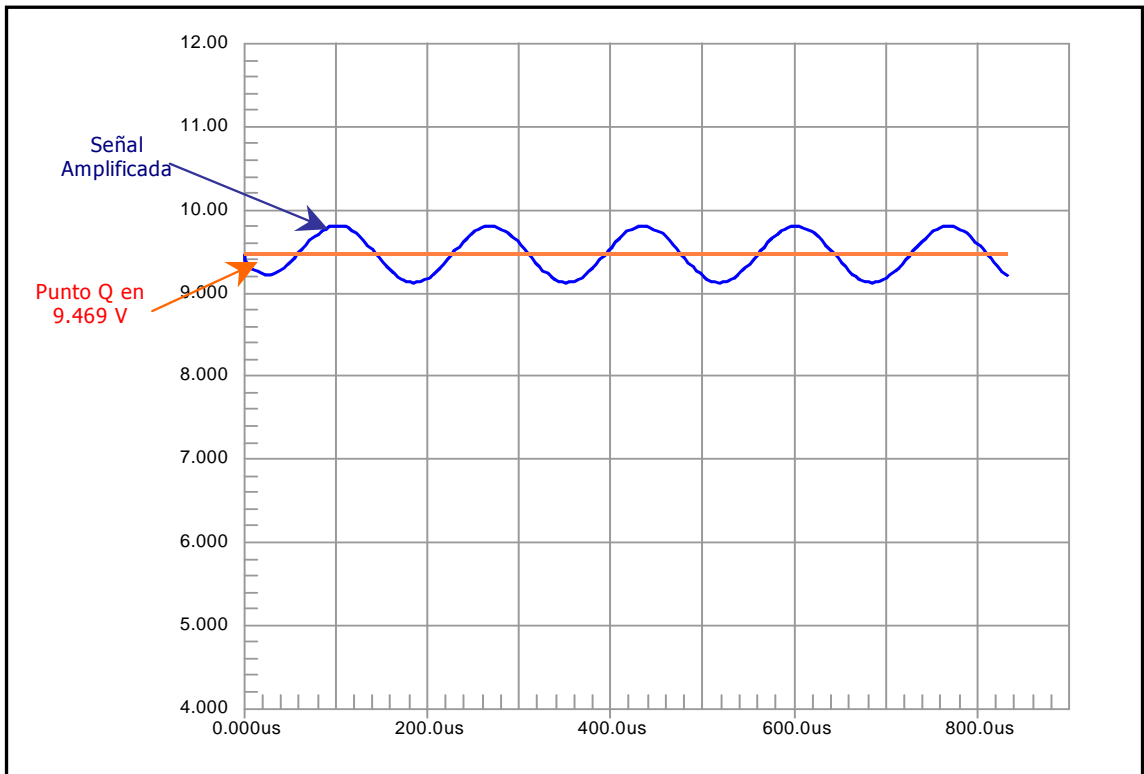


Figura # 7. Punto Q en 4.5 V. No se pierde información pero se corre el riesgo de entrar el la regio de saturación del transistor.

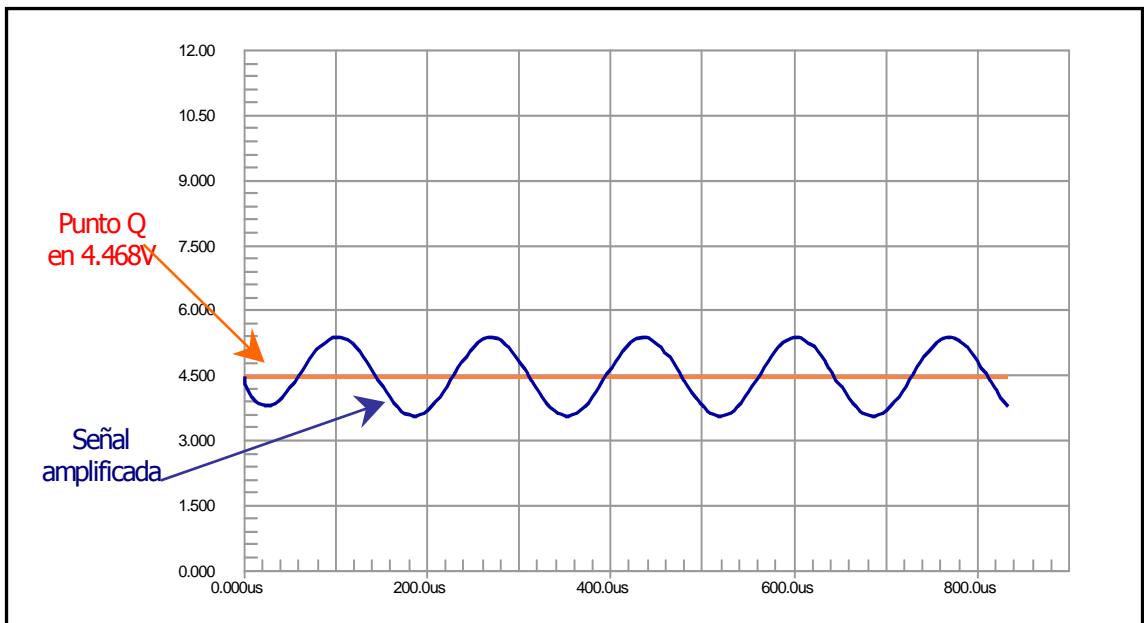


Figura # 8. Punto Q en 1.98 V. La parte baja de la señal entra en la región de saturación, perdiéndose información y deformándose la señal de salida

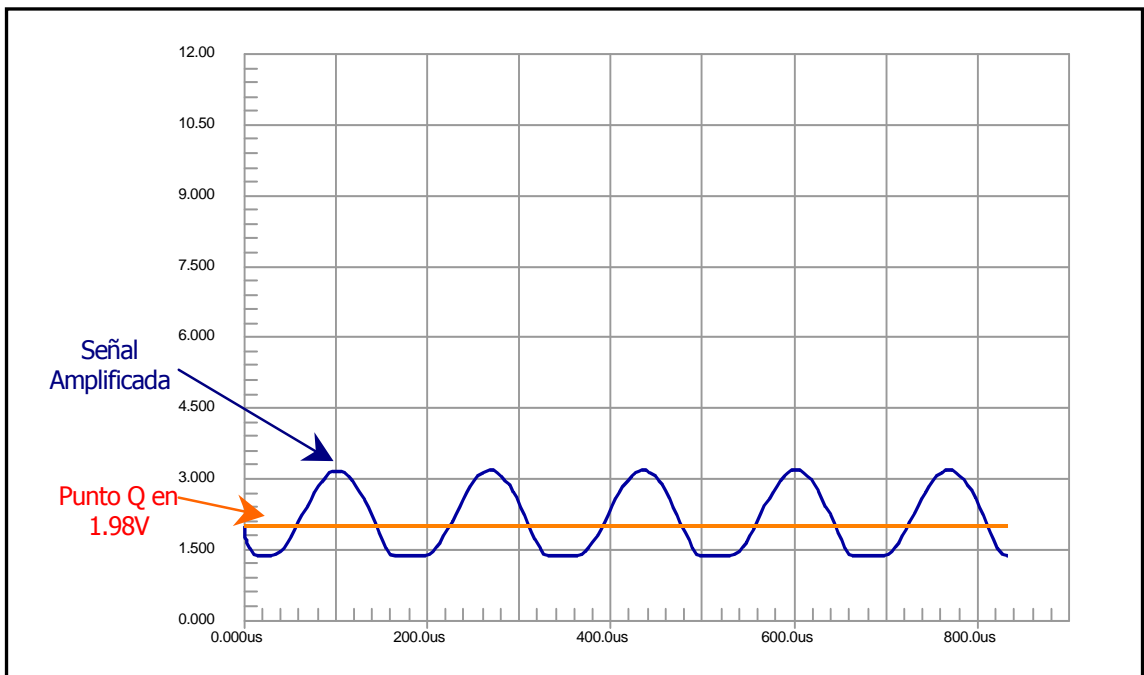
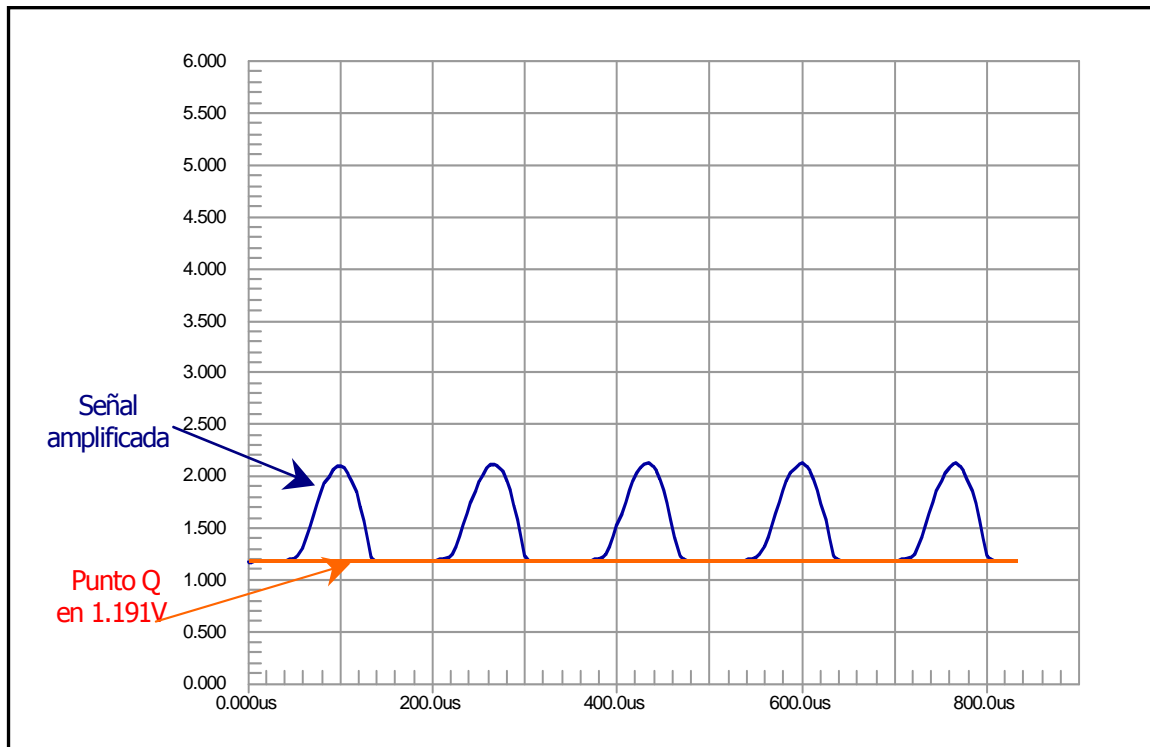


Figura # 9. Punto Q en 1.2 V. Se pierde la mitad de la onda original. Mala colocación del punto Q.



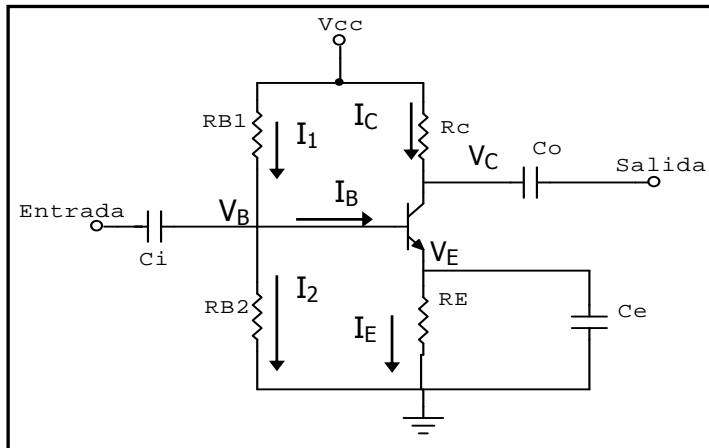
Para mantener al punto Q lo más invariable posible se han ideado circuitos de polarización con tales configuraciones que se ven poco afectados por los factores externos al sistema; este es el caso del **circuito de autopolarización o polarización por divisor de voltaje** (circuito #3), el cual se emplea para disminuir el efecto sobre el punto de operación de los cambios en β , ya sea por la variación de la temperatura ambiente o las variaciones en los voltajes y corrientes del circuito.

La operación de este circuito se basa en el hecho que la variable crítica que debe ser controlada es la corriente del colector en vez de la corriente de la base. Se debe cumplir que la resistencia del transistor vista desde la base hacia adentro (circuito #4), debe ser mucho mayor que R_{B2} para así poder ajustar el voltaje de Base V_B mediante el divisor de voltaje formado por R_{B1} y R_{B2} y así polarizar directamente la unión del emisor. Si I_C tiende a aumentar debido a un alza en la temperatura, la corriente I_E en R_E aumenta, elevando el potencial del emisor con respecto a tierra. Esto, a su vez, reduce la polarización directa en la unión del emisor,

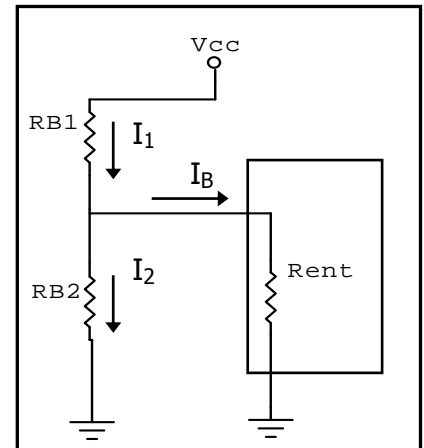
reduciendo la corriente del emisor y, por lo tanto, limita el incremento en I_C . Todo esto quiere decir que cualquier aumento en I_C modifica la polarización de tal manera que se opone a un aumento de I_C . (Smith, Ralph. Circuitos, dispositivos y Sistemas). Si esto sucede, la corriente I_2 es casi igual a I_1 en un lenguaje matemático se puede escribir de la siguiente manera:

$$\text{Si } R_{ent} \gg R_{B2} \\ \Rightarrow I_1 \cong I_2$$

Circuito #3.

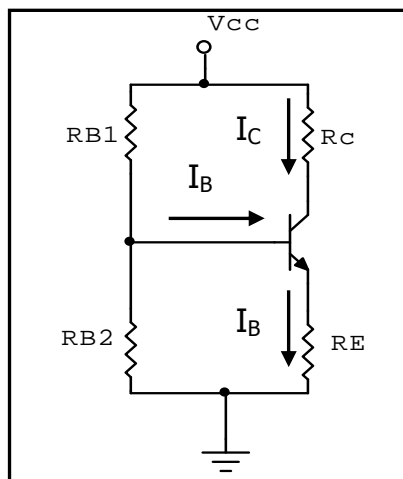


Circuito #4.

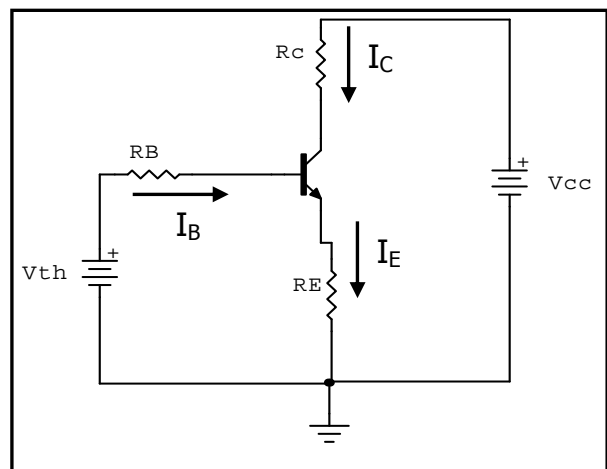


Al realizar el análisis c.d. en el circuito #3 los capacitores se comportan como abiertos quedando así un circuito como el circuito #5, el cual tienen un equivalente de Thevenin en el divisor de voltaje entre R_{B1} y R_{B2} de donde se obtendrá una resistencia y un voltaje equivalente de Thevenin ; teniendo así un nuevo diagrama que se muestra en la circuito #6.

Circuito #5.



Circuito #6. Equivalente de Thevenin



Donde:

$$V_{Th} = R_{B2} V_{CC} / R_{B2} + R_{B1} \quad (21)$$

$$R_B = R_{B1} \parallel R_{B2} = R_{B2} R_{B1} / R_{B2} + R_{B1} \quad (22)$$

Nota: Se debe mencionar que R_B es una resistencia vista desde la base del transistor hacia atrás. Al momento de utilizar la ecuación (22) se debe prestar atención que el voltaje que la alimenta es V_{Th} y no V_{CC} .

Aplicando la Ley de Kirchoff en el circuito de la base tenemos que:

$$V_{Th} = I_B R_B + V_{BE} + (I_B + I_C) R_E \quad (23)$$

$$V_{Th} = I_B (R_B + (\beta + 1) R_E) + V_{BE}$$

De donde se puede obtener I_B

$$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) R_E} \quad (24)$$

Recuerde que

$$\begin{aligned} I_E &= I_C + I_B \\ I_C &= \beta I_B \\ I_B &= I_E / 1 + \beta \end{aligned} \quad (25)$$

También se puede encontrar a I_E como

$$I_E = (V_{Th} - V_{BE}) / (R_E + R_B / 1 + \beta) \quad (26)$$

Por ultimo queda encontrar V_{CE} , el cual se obtiene a partir del análisis del circuito de colector:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - R_E(I_B + I_C) \quad (27)$$

Para asegurar de que el transistor trabaja en modo activo, debe cumplir lo siguiente:

$$\begin{aligned} V_{CB} &= V_C - V_B > 0 \\ V_B &= 0.7 + I_E R_E \\ V_C &= V_{CC} - I_C R_C \end{aligned} \quad (28)$$

6. Diseño de un circuito de auto polarización. Por medio de la resistencia entre el emisor y tierra se obtiene mayor "control" sobre la polarización c. d. de manera que las variaciones en la corriente de flujo o de beta no ocasionan gran corrimiento en el punto de operación

R_E no puede ser extremadamente grande puesto que el voltaje (V_E) que se genera en esta resistencia, limita el voltaje de colector a emisor (V_{CE}). Una vez seleccionado el voltaje del emisor V_E , entre 1/5 y 1/10 de V_{CC} , se calcula R_E y R_C de la siguiente forma:

$$V_{CC} / 5 \geq V_{EQ} \geq V_{CC} / 10 \quad (29)$$

$$R_E = V_{EQ} / I_{EQ} \cong V_{EQ} / I_{CQ} \quad (30)$$

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{EQ} - V_{CEQ}}{I_{CQ}} \quad (31)$$

$$I_{BQ} = I_{CQ} / \beta$$

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE} - V_{EQ}}{I_{BQ}} \quad (32)$$

Donde V_{EQ} es el voltaje del emisor en el punto Q, I_{BQ} es la corriente de base en Q; I_{CQ} la corriente del colector la se proporciona en las especificaciones de construcción del circuito o se toma como 2mA ; V_{CEQ} es el voltaje de colector-emisor que se desea obtener como punto Q.

A lo que se desea llegar es diseñar un circuito de ganancia en corriente estabilizada; para ello se deben de encontrar los valores de las cuatro resistencias cumpliendo con los pasos que describen las ecuaciones en orden de la # 29 a la # 32.

A las ecuaciones antes mencionadas debemos incluir la siguiente:

$$V_{Th} = V_{EQ} + V_{BE} \quad (33)$$

Con esto se podrá calcular R_{B1} Y R_{B2} al utilizar la ecuación de V_{Th} con las resistencias R_B

$$V_{Th} = \frac{R_{B2} V_{CC}}{R_{B2} + R_{B1}}$$

y con la deducción del análisis del equivalente de Thevenin en donde se dijo que I_1 e I_2 son casi iguales y que I_B es muy pequeña, de un orden de 1/10 de I_1 , de donde se tienen que

$$R_{B2} \leq \beta R_E / 10 \quad (34)$$

si se sustituye (34) en V_{Th} se logra llegar a

$$R_{B1} = \beta R_E (V_{CC} - V_{Th}) / 10V_{Th} \quad (35)$$

7. Especificaciones y diseño del circuito amplificador. Las especificaciones del circuito que se implementará son las siguientes:

Voltaje de colector de 7 voltios.

Corriente de colector de 0.2 mA.

Voltaje de emisor de 2 voltios.

$V_{CC} = 12$ voltios.

Beta = 350.

Con estas especificaciones y las ecuaciones de la (29) a la (35), calcule los valores de los componentes, corrientes y voltajes del circuito #3.

8. Cálculo de la resistencia de entrada. Una vez obtenidos los valores de los elementos y componentes de la etapa amplificador, se procederá a calcular R_{in} o resistencia de entrada de la etapa con la siguiente ecuación:

$$R_{in} = (R_{B1} \parallel R_{B2}) \parallel (R_{be} + R_E)$$

donde

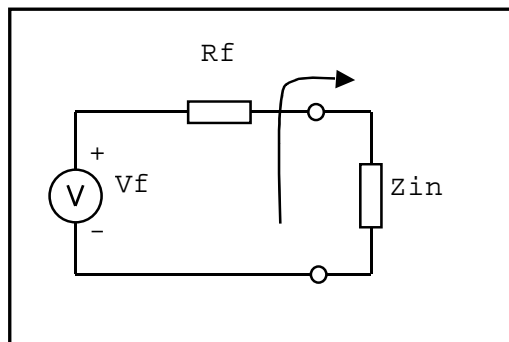
$$R_{be} = \beta \cdot 26 \text{ mV} / I_E = 350 \cdot 26 \text{ mV} / 200 \mu\text{A} = 45.5 \text{ K}\Omega$$

Debido a que el objetivo de la etapa de amplificación desarrollada en este trabajo es tener la mayor transferencia de voltaje, se deben cumplir ciertas condiciones:

$$V_{max} : Z_{in} \rightarrow \infty$$

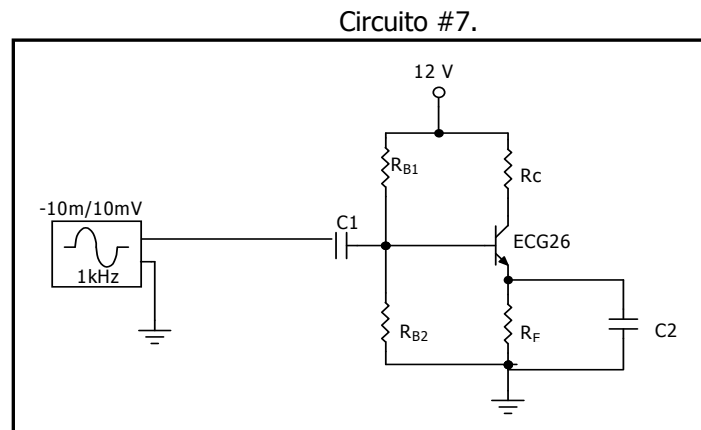
$$\hat{0}$$

$$R_f \rightarrow 0.$$



En esta figura se muestran la fuente de voltaje y su resistencia interna, así mismo la impedancia interna del circuito al que se conecta.

9. Simulación: Para simular la etapa de amplificación se debe introducir el circuito #7 en Circuit Maker con los valores de los componentes obtenidos en diseño del circuito amplificador realizado en inciso B.



El generador de función senoidal tendrá una amplitud de 10 mV, con lo cual se simulara una señal de entrada, la cual se desea amplificar; C1 y C2 tendrán un valor de 220 μ f.

a) Análisis. Con el análisis transiente obtenga las gráficas de:

- Voltaje de colector V_c ,
- Voltaje de emisor V_E ,
- Voltaje de base V_B ,
- Voltaje de la señal de entrada,
- Corriente de colector I_c ,
- Corriente de emisor I_E ,
- Corriente de base I_B ,

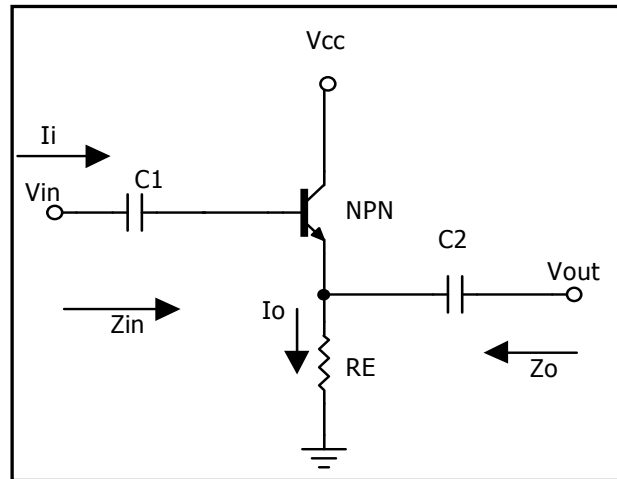
Con el análisis de punto de operación y los resultados calculados al momento de diseñar el circuito complete la siguiente tabla:

Tabla #1 Comparación de valores teóricos y simulados.

Parámetro	Valor teórico	Valor simulado
R_{in}		
V_c		
V_b		
V_e		
I_c		
I_e		
I_b		

10. Configuración de emisor-seguidor. La configuración de emisor-seguidor, circuito #8, se utiliza a menudo con el propósito de acoplamiento de impedancia. Presenta una elevada impedancia en la entrada y una impedancia de salida baja, lo cual es totalmente lo opuesto a la configuración estándar de polarización fija. El resultado de este circuito es similar al que se obtiene con un transformador, donde la carga se acopla a la impedancia de la fuente para la transferencia máxima de potencia a través del sistema.

Circuito #8.



donde

$$Z_{in} = \beta (r_e + R_E) \quad (36)$$

$$I_I = I_b = V_I / \beta (r_e + R_E) \quad (37)$$

$$I_o = I_e = \frac{V_i}{[R_{be} / (1 + \beta)] + R_E} \quad (38)$$

$$Z_o = R_E \parallel \frac{R_{be}}{1 + \beta} \quad (39)$$

$$V_o = I_e R_E = \frac{R_E V_i}{[R_{be} / (1 + \beta)] + R_E} \quad (38)$$

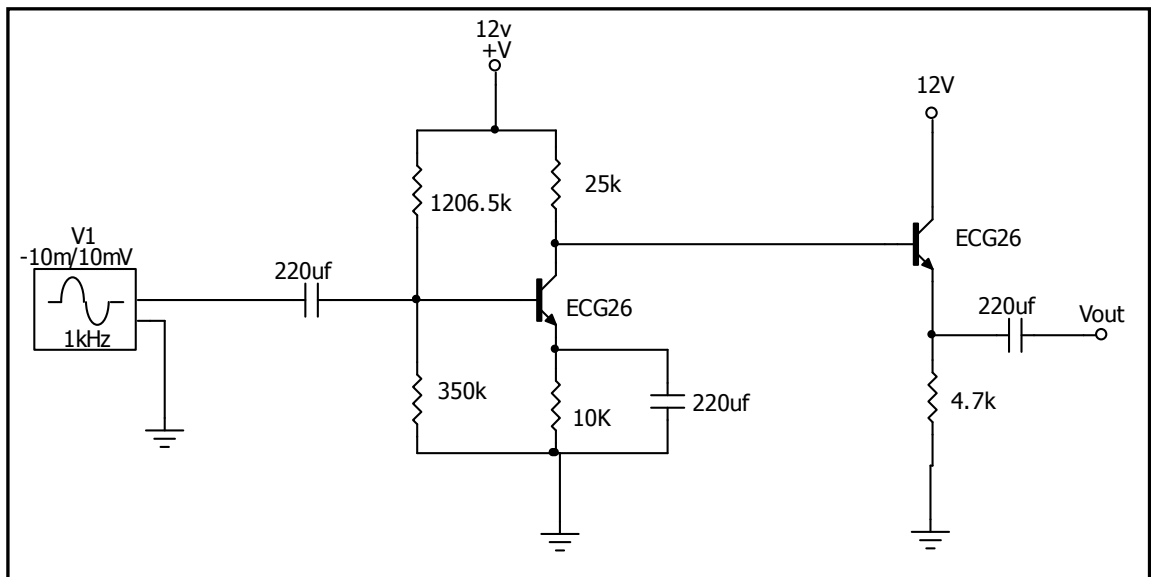
Se debe calcular los valores de las corrientes y voltajes del seguidor emisor con las siguientes especificaciones: $R_E = 4.7 \text{ K}\Omega$, el transistor es ECG26 que tiene una $\beta = 350$ y $R_{be} = 45.5 \text{ k}\Omega$; $V_{in} = 7 \text{ V}$ (teórico). Con los resultados complete la tabla #2

Tabla #2.

Parámetro	Valor teórico
Vc2	
Vb2	
Ve2	
Ic2	
Ie2	
Ib2	

11. Etapa amplificadora completa. Con los datos calculados y los circuitos analizados anteriormente se construye la etapa amplificadora completa la cual se muestra en el circuito #9.

Circuito #9. Etapa amplificadora completa.



12. Simulación de la etapa amplificadora completa. Para simular el circuito #9 se coloca una resistencia de carga de $100\text{K}\Omega$ en la terminal de V_{out} . Esta resistencia simulará una carga posible a la cual se conectará el amplificador.

Con el uso del análisis transiente se deben de obtener las gráficas de voltaje en los lugares de paso importantes de la señal; tales como la entrada, el V_b del primer transistor y del segundo, el V_c del primer transistor y el voltaje de salida V_{out} de la etapa.

Con la ayuda del análisis de punto de operación complete las tablas #3 y #4.

Tabla #3. Comparación de valores teóricos y simulados en el primer transistor.

Parámetro	Valor teórico	Valor simulado
R_{in}		
V_{c1}		
V_{b1}		
V_{e1}		
I_{c1}		
I_{e1}		
I_{b1}		

Tabla #4. Comparación de valores teóricos y simulados en el segundo transistor.

Parámetro	Valor teórico	Valor simulado
V_{c2}		
V_{b2}		
V_{e2}		
I_{c2}		
I_{e2}		
I_{b2}		

13. Trax Maker. Una vez simulada la etapa amplificadora completa, se procede a trasladar el circuito a Trax Maker para obtener la tarjeta del circuito impreso y poder ser trasladada a la fresadora.

B. Guía para el profesor sobre la etapa de amplificación

1. Pre-laboratorio	1
2. Introducción	2
3. Objetivos específicos	3
4. Punto de operación "Q"	3
5. Regiones de un transistor	5
6. Diseño de un circuito de auto polarización	12
7. Especificaciones y diseño del circuito amplificador	13
8. Cálculo de la resistencia de entrada	15
9. Simulación	16
10. Configuración de emisor-seguidor	19
11. Etapa amplificadora completa	21
12. Simulación de la etapa amplificadora	21
13. Trax Maker	23
14. Bus de datos	24

B. Guía del profesor para la etapa de amplificación.

1. Preguntas de Pre-Laboratorio.

Instrucciones: antes de llegar a la práctica sobre la etapa de amplificación investigue los siguientes temas los cuales le servirán para entender con mayor facilidad el laboratorio que realizará.

1. ¿Qué es el punto "Q"?
2. ¿Cuáles son las regiones de funcionamiento de un transistor?
3. ¿Qué es auto polarización?
4. ¿Posibles configuraciones de un transistor?

2. Introducción. Al introducir una señal de amplitud relativamente pequeña en un circuito de cuya salida se obtiene una señal con la misma forma que la de entrada y con una mayor amplitud se dice que dicha señal fue amplificada. Esto se logra por medio de una etapa de amplificación. En esta guía se llevará a cabo dicho circuito conformado por transistores, analizándose sus distintas configuraciones y características tanto del circuito amplificador como del mismo transistor.

Como ya se sabe, el transistor es un dispositivo no lineal lo cual hace necesario conocer sus propiedades, esto se hará por medio de la representación gráfica de las mismas. Es necesario tener dos grupos de gráficas o curvas características; uno que represente las características de entrada o **características estáticas de base** en donde se muestran V_{BE} Voltaje de base-emisor Vrs. La corriente de base I_B y el otro representa las características de salida del transistor o **características estáticas de colector**, donde se muestran el voltaje entre colector y emisor V_{CE} Vrs la corriente del colector I_C . Las gráficas son proporcionadas por el fabricante o pueden ser obtenidas mediante el análisis por osciloscopio del circuito. En este trabajo se obtendrán por medio del análisis DC en el simulador.

Se debe tener en cuenta que un transistor puede trabajar en distintas configuraciones tales como base común, emisor común o colector común, las cuales tiene cada una sus curvas características, tanto de entrada como de salida. En esta guía se empleará la configuración de emisor común.

Un transistor tiene tres regiones de operación, la región de corte, la región de saturación y la región activa; siendo esta última del interés de este trabajo, puesto que en dicha región el transistor se comporta de una forma lineal en cierto intervalo de voltajes y corrientes; así mismo en esta región se encuentra el punto de operación denominado **punto Q**. Establecer dicho punto tiene como objeto que la señal de entrada se transfiera con fidelidad además de obtener el máximo intervalo de amplificación sin encontrar distorsiones que afecten la señal de salida, las cuales producen variaciones con respecto a la señal original.

Para incrementar la magnitud de una señal eléctrica se usan elementos pasivos, tales como transformadores o circuitos L-C que cerca de resonancia logran amplificar los niveles de potencia o de corriente, pero para lograr que el nivel de potencia de una señal se eleve, es necesario emplear dispositivos activos, tal es el caso de los transistores, en donde una señal pequeña de entrada controla las variaciones de potencial o la corriente de salida de mayor magnitud.

3. Objetivos específicos.

- a. Que el alumno logre una colocación óptima del punto de operación de la etapa de amplificación, utilizando las especificaciones que se le proporcionen.
- b. Que obtenga con éxito las curvas características del transistor que empleará en el experimento.
- c. Conocimiento de los efectos que produce la colocación tanto correcta como incorrecta del punto de operación.
- d. Que el alumno logre trasladar con éxito el diagrama del circuito simulado en Circuit Maker 2000 a una tarjeta impresa haciendo uso del programa Trax Maker.

4. Punto de operación "Q". Al momento de utilizar etapas con transistores se le da una gran importancia al hecho de establecer un punto de operación apropiado y mantenerlo fijo, independiente a las variaciones que pudieran presentarse por la manufactura y el envejecimiento de los componentes, así como el cambio de temperatura ambiente y otros factores que puedan afectar el funcionamiento deseado en la implementación electrónica.

Un punto Q óptimo se encuentra en la región activa (figura #4), del transistor lo que se logra suministrando voltajes directos en las terminales tanto de entrada como de salida; de tal manera que la unión base-emisor esté polarizada directamente y la unión de base-colector se encuentre en polarización inversa. Después de ubicar el punto de operación, las variaciones en el tiempo de la señal de entrada, tales como la corriente de base, deberán producir una señal de salida con la misma forma de onda y con mayor amplitud. La importancia del punto Q reside en

mantener la señal amplificada sin distorsiones con respecto a la original, es decir, que no se pierda información y no se introduzca ruido alguno; si estas variaciones de salida están recortadas o no reproducen satisfactoriamente la señal de entrada es probable que el punto de operación no haya sido bien seleccionado.

Se debe tener en cuenta que el punto de operación se puede definir por medio de I_B y V_{CE} , de I_B e I_C o bien I_C y V_{CE} , ya sea de una manera gráfica (figura #3), utilizando las curvas características del transistor (figuras #1 y #2), o de una forma matemática, por medio de los análisis DC y AC del circuito a utilizar.

Figura # 1. Curvas características de salida (colector) del transistor.

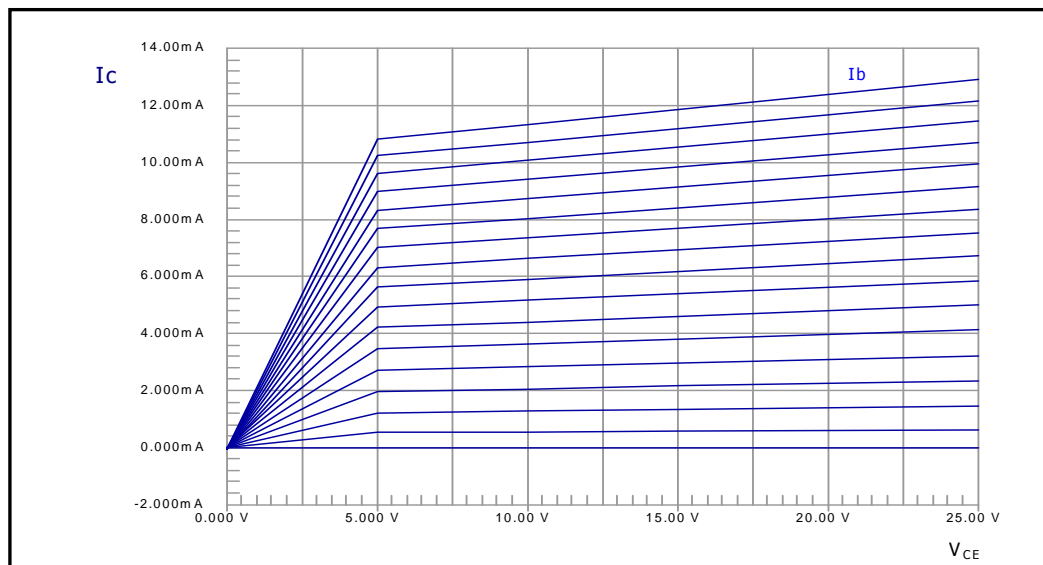


Figura # 2. Características de entrada del transistor.

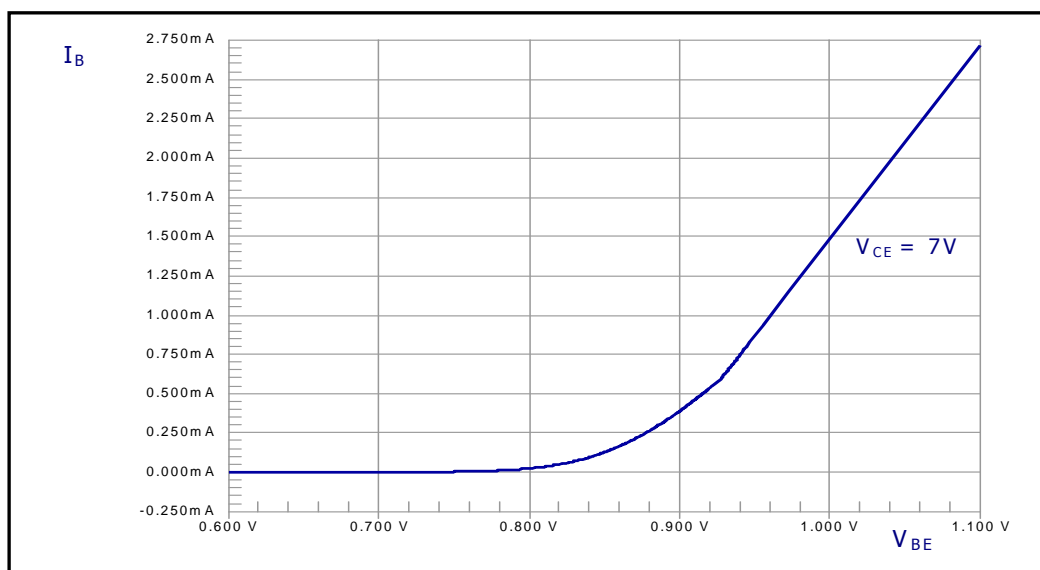
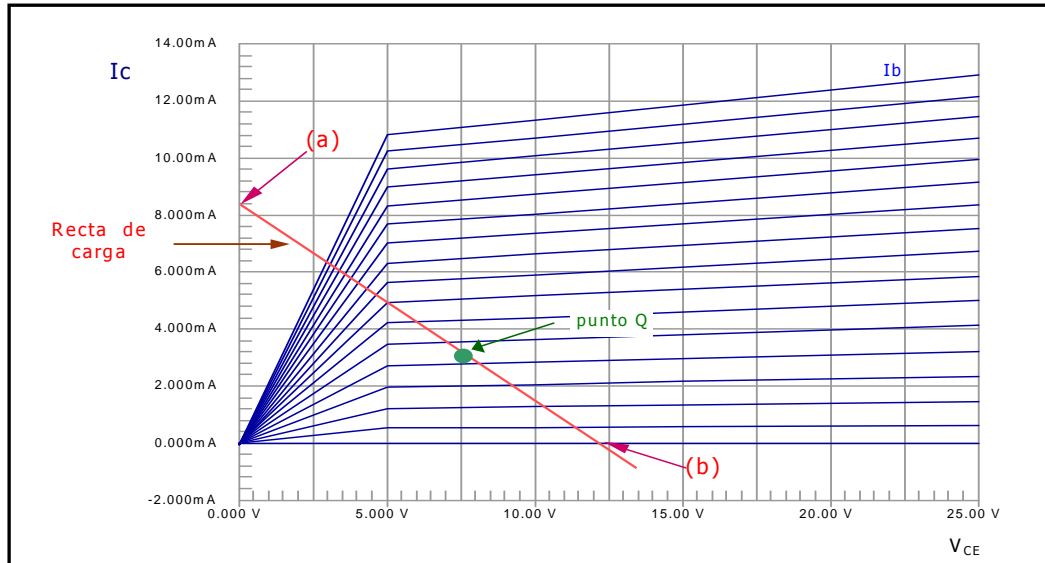
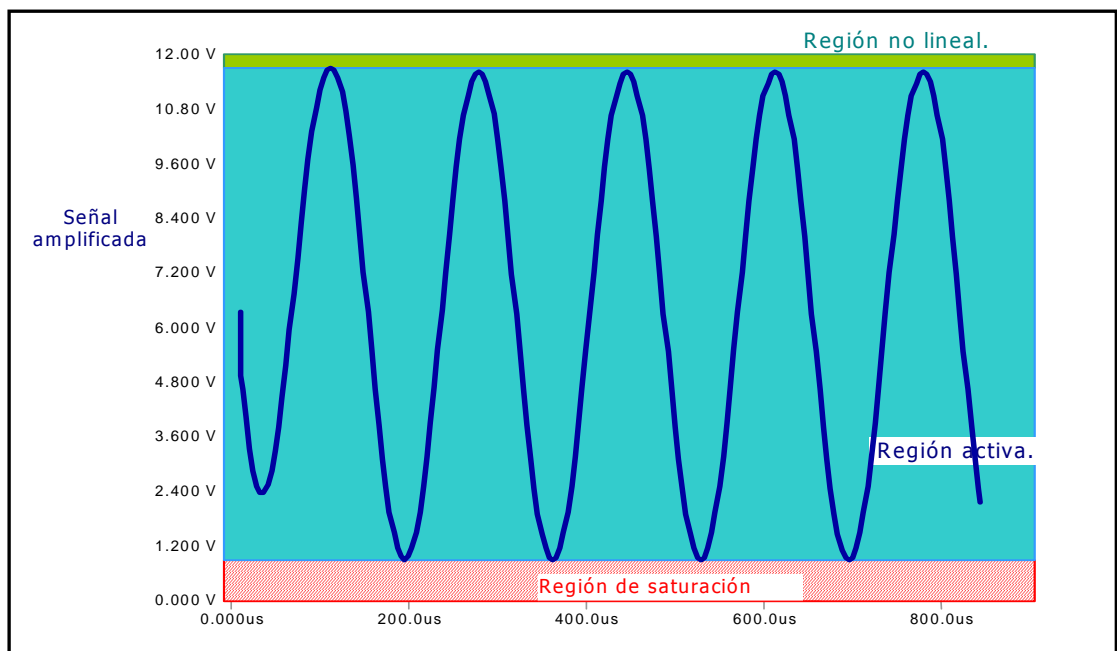


Figura # 3. Curvas características de entrada con la recta de carga y un punto Q bien seleccionado en $V_{ce} = 7V$, $I_c = 3m A$. La corriente I_c máxima se encuentra cuando V_{ce} es cero (a) y el V_{ce} máximo se encuentra con I_c igual a cero. (b)



5. Regiones de un transistor.



La región que se observa abajo de la señal se conoce como la región de saturación, teniendo un ancho de 1.2 volts. En esta región se puede perder información debido a cortes en la señal de salida, como los que se observan en las figuras #8 y #9.

La región de no linealidad se encuentra hasta arriba y tiene un ancho de 0.2 volts. En esta región, aunque no se pierda información, no se logra el efecto de ampliación deseado. La figura #5 muestra este efecto, obsérvese que la ampliación es mínima.

La región activa (figura #4), es la de mayor interés al manejar transistores como amplificadores. En esta región no se pierde información y tampoco se deforma la señal de salida, aunque se debe tener cuidado en la colocación del punto Q pues se corre el riesgo de estar muy cerca a cualquiera de las otras dos regiones y si la señal de entrada pasa los límites de voltaje se pueden producir efectos no deseados en la ampliación. Las figuras #5 y #6 muestran estas posibilidades.

Figura # 4. Señal amplificada con $\beta = 100$, con un punto de operación en 7 Voltios.
Amplificación óptima, sin deformaciones.

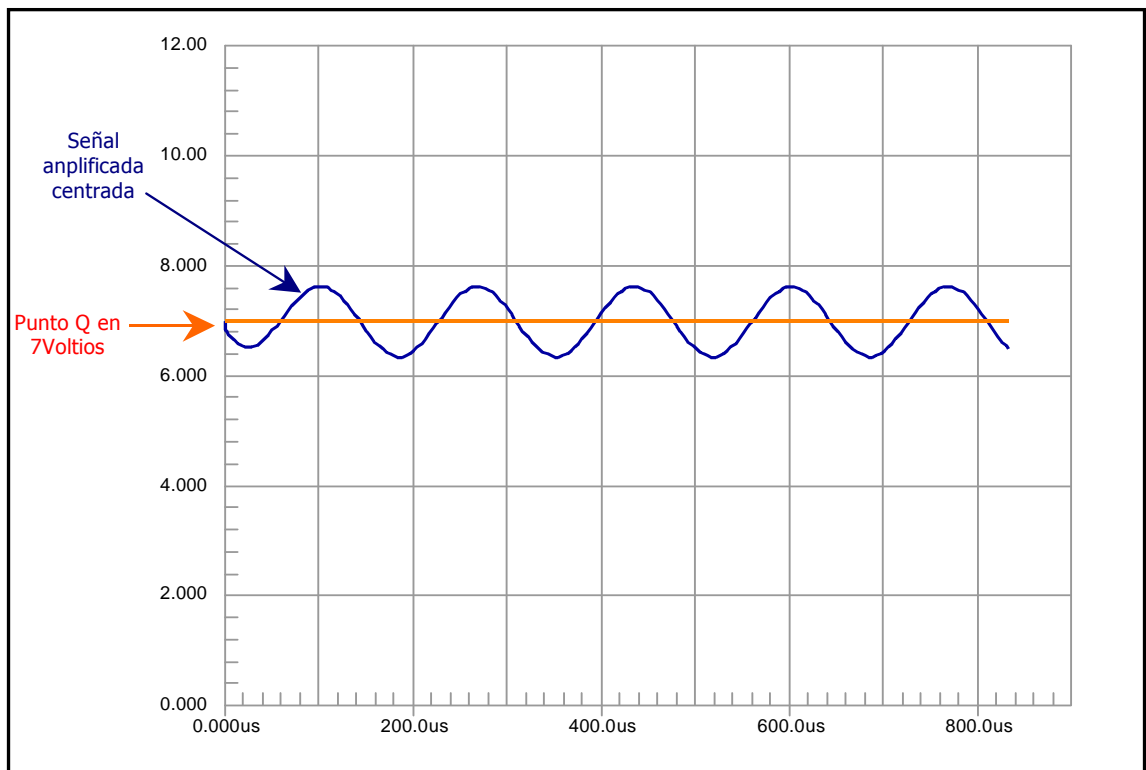


Figura # 5. Señal con un punto Q en 11.98 V; se encuentra en la región no lineal del transistor.

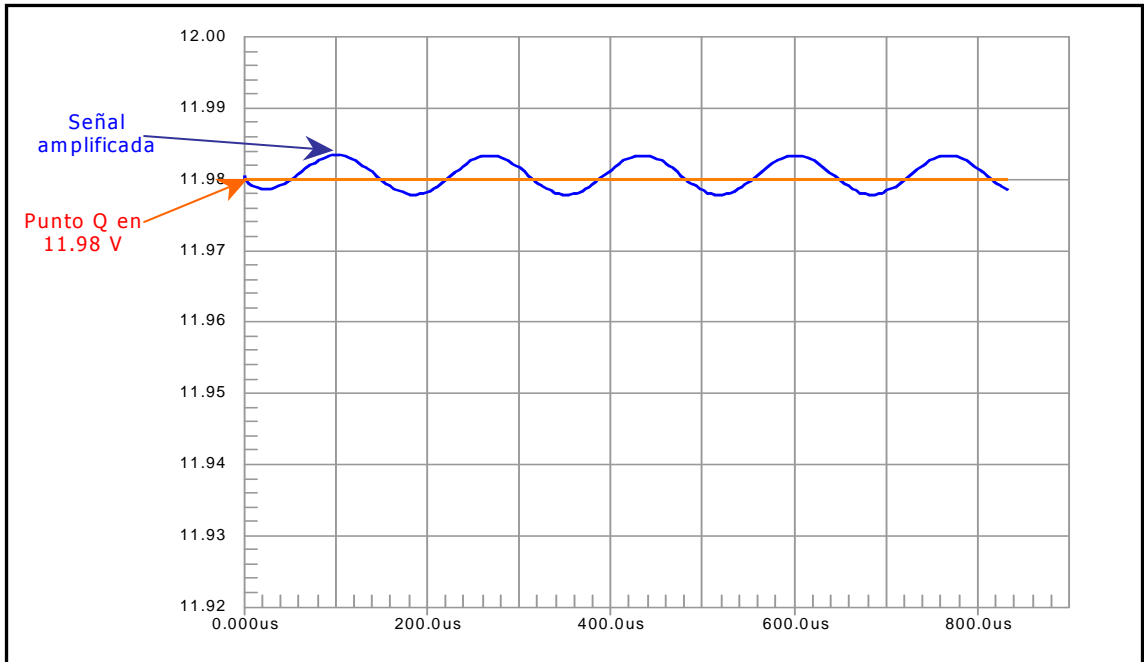


Figura # 6. Punto de operación en 9.5 V. No se pierde información de la señal original, pero está cerca de la región no lineal del transistor.

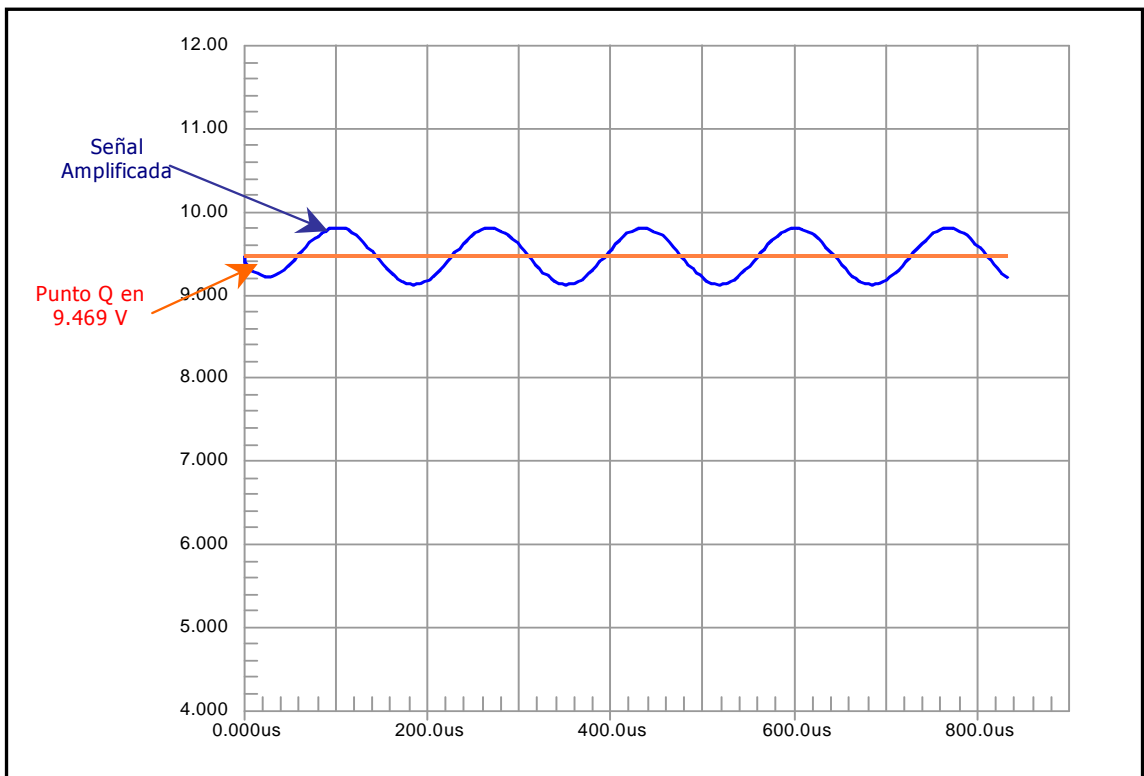


Figura # 7. Punto Q en 4.5 V. No se pierde información pero se corre el riesgo de entrar el la regio de saturación del tr nsistor.

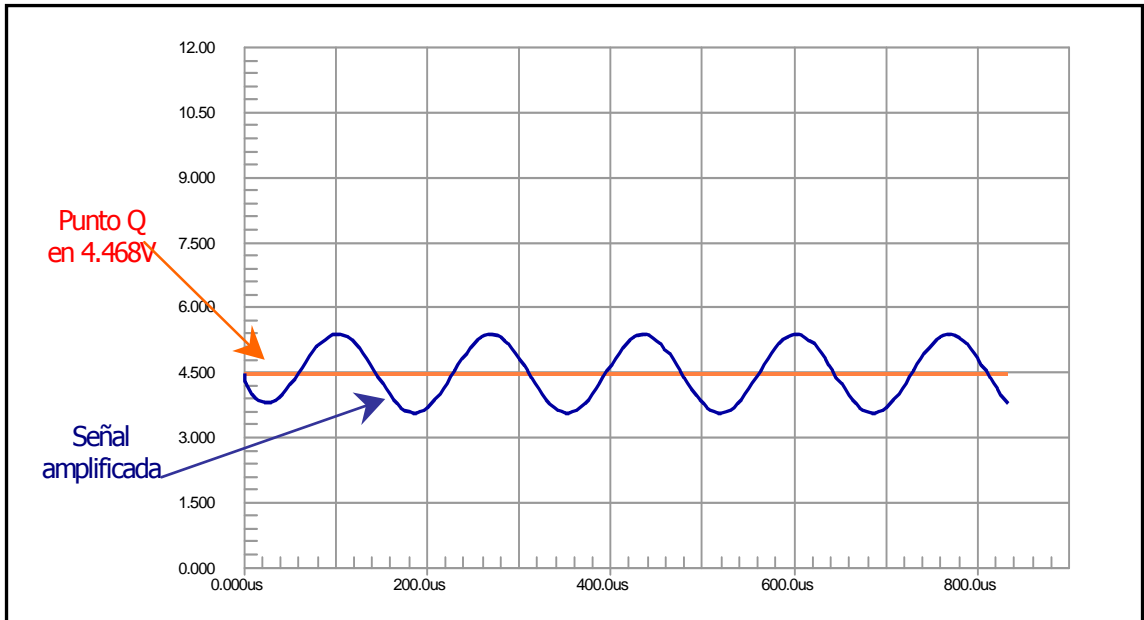


Figura # 8. Punto Q en 1.98 V. La parte baja de la señal entra en la región de saturación, perdiéndose información y deformándose la señal de salida

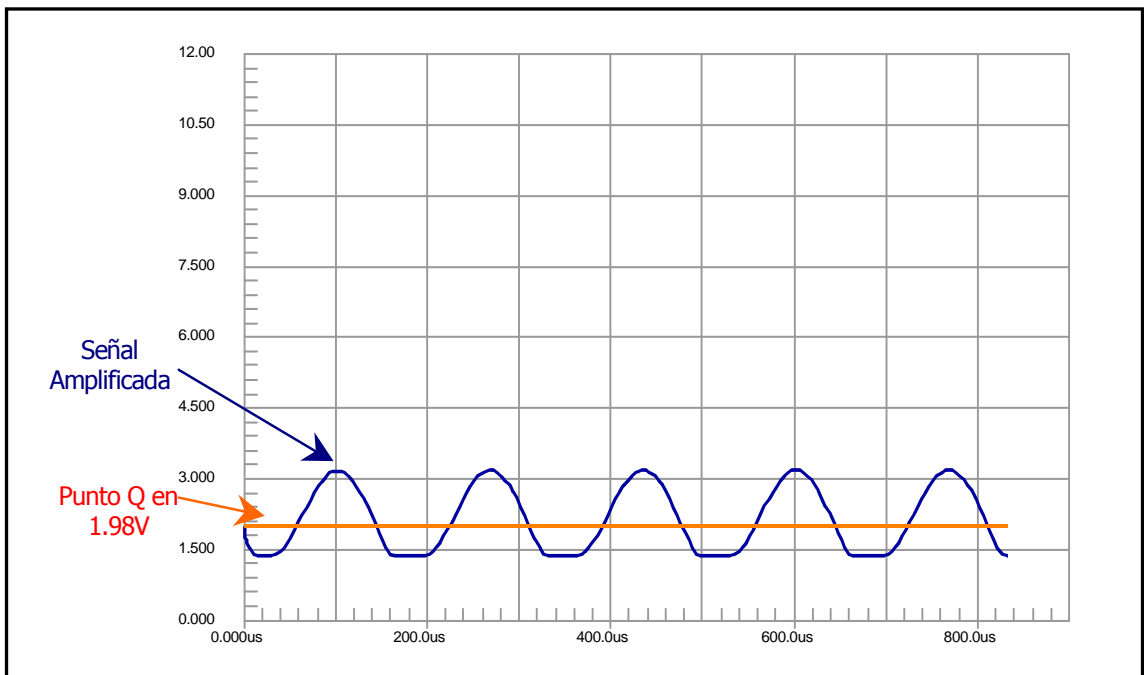
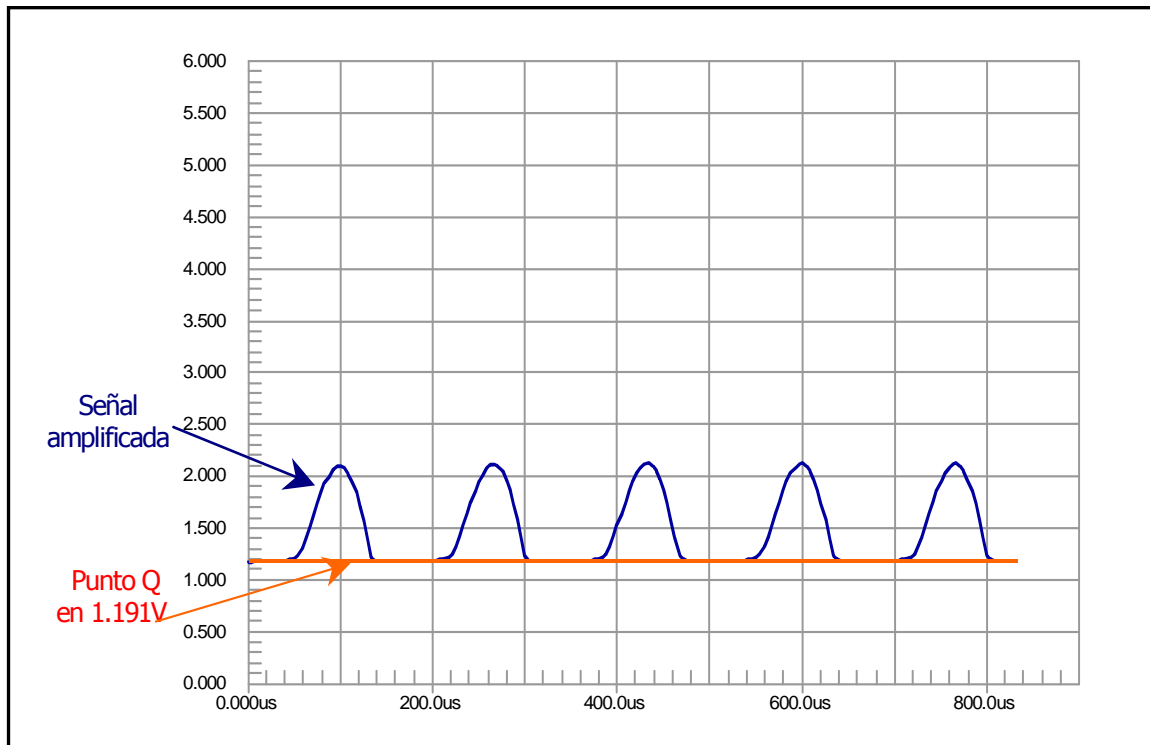


Figura # 9. Punto Q en 1.2 V. Se pierde la mitad de la onda original. Mala colocación del punto Q.



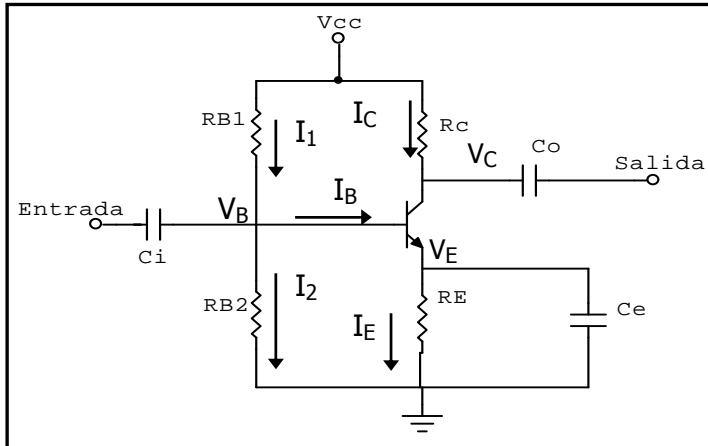
Para mantener al punto Q lo más invariable posible se han ideado circuitos de polarización con tales configuraciones que se ven poco afectados por los factores externos al sistema; este es el caso del **circuito de autopolarización o polarización por divisor de voltaje** (circuito #3), el cual se emplea para disminuir el efecto sobre el punto de operación de los cambios en β , ya sea por la variación de la temperatura ambiente o las variaciones en los voltajes y corrientes del circuito.

La operación de este circuito se basa en el hecho que la variable crítica que debe ser controlada es la corriente del colector en vez de la corriente de la base. Se debe cumplir que la resistencia del transistor vista desde la base hacia adentro (circuito #4), debe ser mucho mayor que R_{B2} para así poder ajustar el voltaje de Base V_B mediante el divisor de voltaje formado por R_{B1} y R_{B2} y así polarizar directamente la unión del emisor. Si I_C tiende a aumentar debido a un alza en la temperatura, la corriente I_E en R_E aumenta, elevando el potencial del emisor con respecto a tierra. Esto, a su vez, reduce la polarización directa en la unión del emisor,

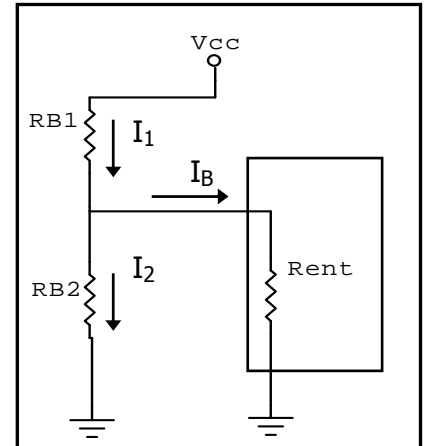
reduciendo la corriente del emisor y, por lo tanto, limita el incremento en I_C . Todo esto quiere decir que cualquier aumento en I_C modifica la polarización de tal manera que se opone a un aumento de I_C . (Smith, Ralph. Circuitos, dispositivos y Sistemas). Si esto sucede, la corriente I_2 es casi igual a I_1 en un lenguaje matemático se puede escribir de la siguiente manera:

$$\text{Si } R_{ent} \gg R_{B2} \\ \Rightarrow I_1 \cong I_2$$

Circuito #3.

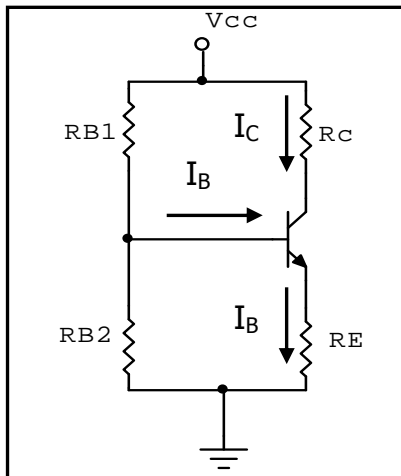


Circuito #4.

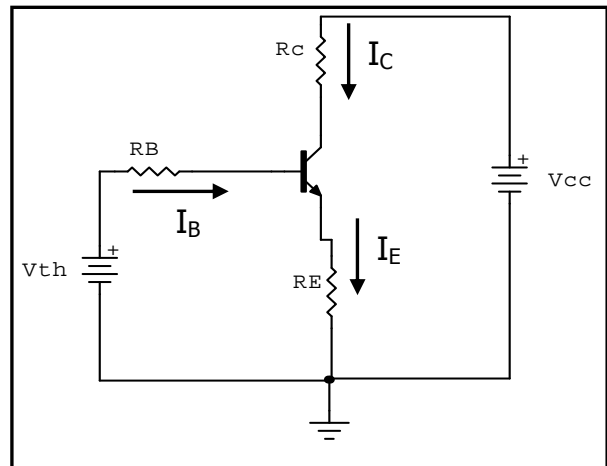


Al realizar el análisis c.d. en el circuito #3 los capacitores se comportan como abiertos quedando así un circuito como el circuito #5, el cual tienen un equivalente de Thevenin en el divisor de voltaje entre R_{B1} y R_{B2} de donde se obtendrá una resistencia y un voltaje equivalente de Thevenin ; teniendo así un nuevo diagrama que se muestra en la circuito #6.

Circuito #5.



Circuito #6. Equivalente de Thevenin



Donde:

$$V_{Th} = R_{B2} V_{CC} / R_{B2} + R_{B1} \quad (21)$$

$$R_B = R_{B1} \parallel R_{B2} = R_{B2} R_{B1} / R_{B2} + R_{B1} \quad (22)$$

Nota: Se debe mencionar que R_B es una resistencia vista desde la base del transistor hacia atrás. Al momento de utilizar la ecuación (22) se debe prestar atención que el voltaje que la alimenta es V_{Th} y no V_{CC} .

Aplicando la Ley de Kirchoff en el circuito de la base tenemos que:

$$V_{Th} = I_B R_B + V_{BE} + (I_B + I_C) R_E \quad (23)$$

$$V_{Th} = I_B (R_B + (\beta + 1) R_E) + V_{BE}$$

De donde se puede obtener I_B

$$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) R_E} \quad (24)$$

Recuerde que

$$\begin{aligned} I_E &= I_C + I_B \\ I_C &= \beta I_B \\ I_B &= I_E / (1 + \beta) \end{aligned} \quad (25)$$

También se puede encontrar a I_E como

$$I_E = (V_{Th} - V_{BE}) / (R_E + R_B / (1 + \beta)) \quad (26)$$

Por ultimo queda encontrar V_{CE} , el cual se obtiene a partir del análisis del circuito de colector:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - R_E (I_B + I_C) \quad (27)$$

Para asegurar de que el transistor trabaja en modo activo, debe cumplir lo siguiente:

$$\begin{aligned} V_{CB} &= V_C - V_B > 0 \\ V_B &= 0.7 + I_E R_E \\ V_C &= V_{CC} - I_C R_C \end{aligned} \quad (28)$$

6. Diseño de un circuito de auto polarización. Por medio de la resistencia entre el emisor y tierra se obtiene mayor "control" sobre la polarización c. d. de manera que las variaciones en la corriente de flujo o de beta no ocasionan gran corrimiento en el punto de operación

R_E no puede ser extremadamente grande puesto que el voltaje (V_E) que se genera en esta resistencia, limita el voltaje de colector a emisor (V_{CE}). Una vez seleccionado el voltaje del emisor V_E , entre 1/5 y 1/10 de V_{CC} , se calcula R_E y R_C de la siguiente forma:

$$V_{CC} / 5 \geq V_{EQ} \geq V_{CC} / 10 \quad (29)$$

$$R_E = V_{EQ} / I_{EQ} \cong V_{EQ} / I_{CQ} \quad (30)$$

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{EQ} - V_{CEQ}}{I_{CQ}} \quad (31)$$

$$I_{BQ} = I_{CQ} / \beta$$

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE} - V_{EQ}}{I_{BQ}} \quad (32)$$

Donde V_{EQ} es el voltaje del emisor en el punto Q, I_{BQ} es la corriente de base en Q; I_{CQ} la corriente del colector la se proporciona en las especificaciones de construcción del circuito o se toma como 2mA ; V_{CEQ} es el voltaje de colector-emisor que se desea obtener como punto Q.

A lo que se desea llegar es diseñar un circuito de ganancia en corriente estabilizada; para ello se deben de encontrar los valores de las cuatro resistencias cumpliendo con los pasos que describen las ecuaciones en orden de la # 29 a la # 32.

A las ecuaciones antes mencionadas debemos incluir la siguiente:

$$V_{Th} = V_{EQ} + V_{BE} \quad (33)$$

Con esto se podrá calcular R_{B1} Y R_{B2} al utilizar la ecuación de V_{Th} con las resistencias R_B

$$V_{Th} = \frac{R_{B2} V_{CC}}{R_{B2} + R_{B1}}$$

y con la deducción del análisis del equivalente de Thevenin en donde se dijo que I_1 e I_2 son casi iguales y que I_B es muy pequeña, de un orden de $1/10$ de I_1 , de donde se tienen que

$$R_{B2} \leq \beta R_E / 10 \quad (34)$$

si se sustituye (34) en V_{Th} se logra llegar a

$$R_{B1} = \beta R_E (V_{CC} - V_{Th}) / 10V_{Th} \quad (35)$$

7. Especificaciones y diseño del circuito amplificador. Voltaje de colector de 7 voltios.

Corriente de colector de 0.2 mA.

Voltaje de emisor de 2 voltios.

$V_{CC} = 12$ voltios.

Beta = 350.

Esto quiere decir que:

$$V_{EQ} = 2 \text{ Voltios} = V_{CC}/6 .$$

$$I_{CQ} = 0.2 \text{ mA.}$$

$$V_C = 7 \text{ voltios.}$$

$$V_E = 2 \text{ Voltios.}$$

$$V_{CEQ} = 5 \text{ Voltios.}$$

$$I_{BQ} = I_{CQ} / \beta = 0.2 \text{ mA} / 350 = 0.57 \mu \text{ A.}$$

A partir de aquí se calculan los valores de las resistencias que conforman el circuito de auto polarización con las ecuaciones que se han expuesto anteriormente.

$$R_E \cong V_{EQ} / I_{CQ} = 2 \text{ V} / 0.2 \text{ mA} = \mathbf{10 \text{ K } \Omega}$$

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE} - V_{EQ}}{I_{BQ}} = \frac{12 \text{ V} - 0.7 \text{ V} - 2 \text{ V}}{0.57 \mu \text{ A}} = \mathbf{16316 \text{ k} \Omega}$$

Nota: Esta R_B se utiliza con V_{cc} .

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CEQ} - V_{EQ}}{I_{CQ}} = \frac{12 \text{ V} - 5 \text{ V} - 2 \text{ V}}{0.2 \text{ mA}} = \mathbf{25 \text{ K } \Omega}$$

$$V_{Th} = V_{EQ} + V_{BE} = 2 \text{ V} + 0.7 \text{ V} = \mathbf{2.7 \text{ V}}$$

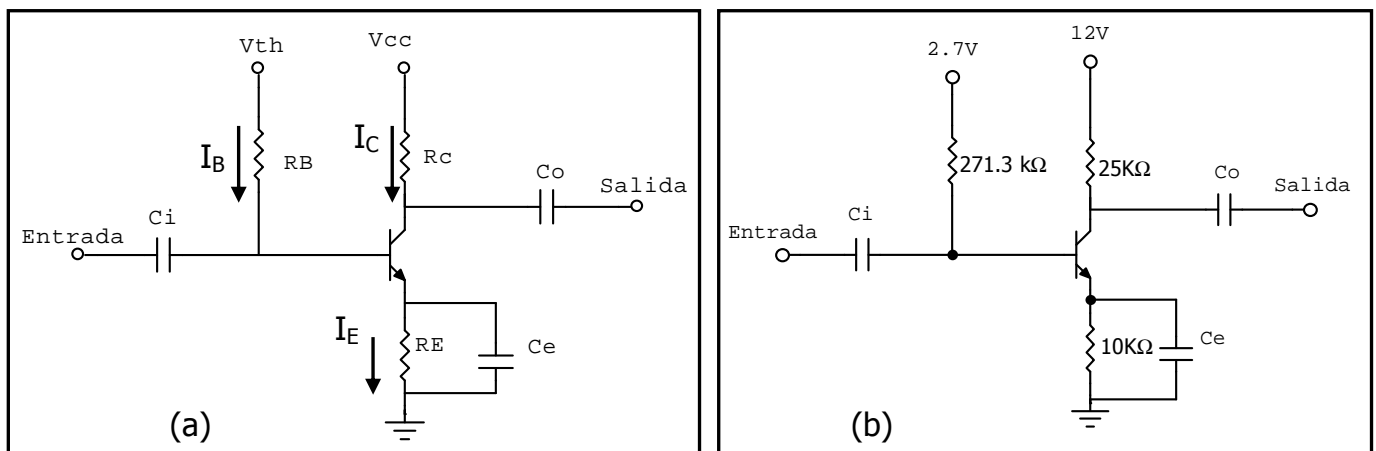
$$R_{B2} = \beta R_E / 10 = 350 * 10 \text{ K} \Omega / 10 = \mathbf{350 \text{ K } \Omega}$$

$$R_{B1} = \frac{\beta R_E (V_{CC} - V_{Th})}{10 V_{Th}} = \frac{350 * 10 \text{ K} \Omega * (12 \text{ V} - 2.7 \text{ V})}{10 * 2.7 \text{ V}} = \mathbf{1205.6 \text{ K} \Omega}$$

Nota: Esta R_B se utiliza con V_{th} .

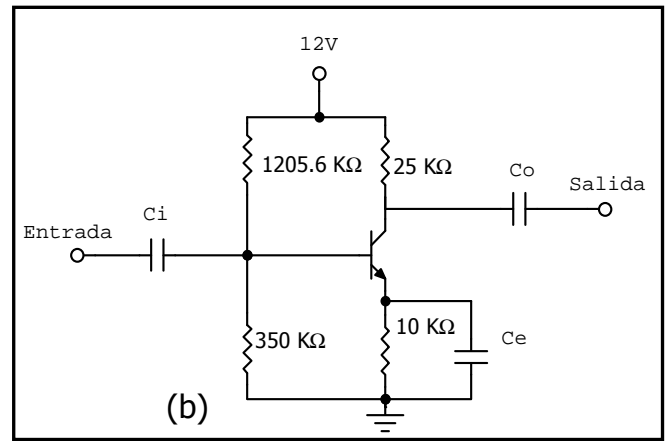
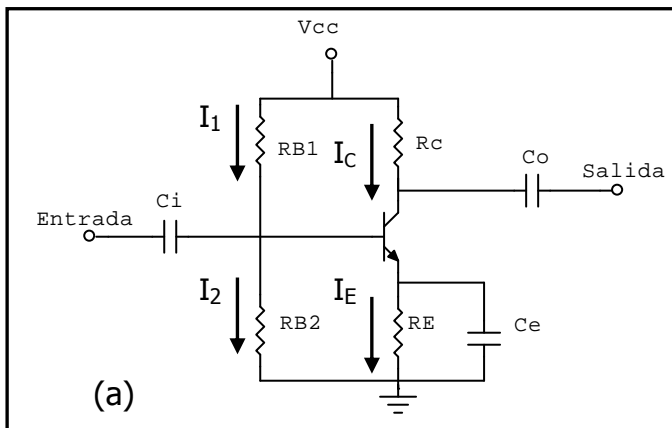
$$R_B = R_{B1} \parallel R_{B2} = \frac{R_{B2} R_{B1}}{R_{B2} + R_{B1}} = \frac{350 \text{ K} \Omega * 1205.6 \text{ K} \Omega}{350 \text{ K} \Omega + 1205.6 \text{ K} \Omega} = \mathbf{271.3 \text{ K} \Omega}$$

Circuito #7 .Circuito de polarización con estabilización de emisor a) diagrama b) valores calculados. Recuerde el uso del voltaje de Thevenin.



Circuito #8. Circuito de auto polarización o polarización por divisor de voltaje.

a) Diagrama b) valores calculados.



8. Cálculo de la resistencia de entrada R_{in} .

La resistencia de entrada se mide desde el inicio del circuito amplificador hacia adentro y está conformada por las resistencias de base, la resistencia de base a emisor R_{be} y la resistencia de emisor R_E . después de analizar el circuito amplificador y debido a la conexión de los elementos la formula para calcular la resistencia de entrada se muestra a continuación:

$$R_{in} = (R_{B1} \parallel R_{B2}) \parallel (R_{be} + R_E)$$

Donde

$$R_{be} = \beta \cdot 26 \text{ mV} / I_E = 350 \cdot 26 \text{ mV} / 200 \mu\text{A} = 45.5 \text{ K}\Omega$$

⇒

$$R_{in} = (1205.6 \text{ K}\Omega \parallel 350 \text{ K}\Omega) \parallel (10 \text{ K}\Omega + 45.5 \text{ k}\Omega)$$

$$= (271.25 \text{ K}\Omega) \parallel (55.5 \text{ K}\Omega)$$

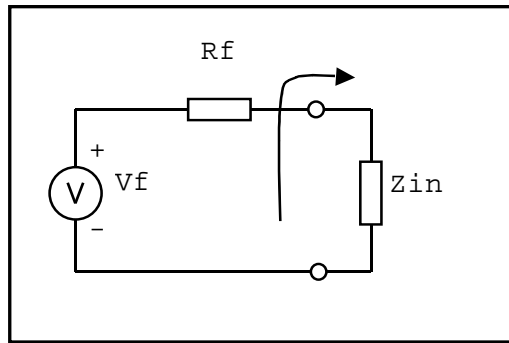
$$R_{in} = 46.1 \text{ K}\Omega$$

Debido a que el objetivo de la etapa de amplificación desarrollada en este trabajo es tener la mayor transferencia de voltaje, se deben cumplir ciertas condiciones:

$$V_{\max} : Z_{in} \rightarrow \infty$$

$$\text{ó}$$

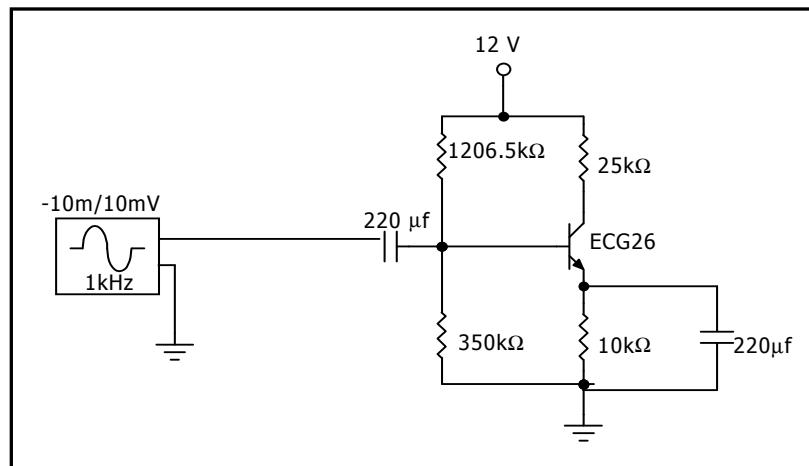
$$R_f \rightarrow 0.$$



En esta figura se muestran la fuente de voltaje y su resistencia interna, así mismo la impedancia interna del circuito al que se conecta.

9. Simulación. Para simular el circuito #8, se utiliza un generador de señal senoidal con una amplitud de 10 mV, una frecuencia de 1 KHz. En el circuito #9 se observa el amplificador y la señal de entrada.

Circuito #9.



Se emplean los análisis transiente y de punto de operación para medir y observar las corrientes y voltajes de las tres terminales del transistor así mismo se mide la señal de entrada.

Los voltajes y corrientes obtenidas por el análisis transiente se muestran en las gráficas 1, 2, 3, 4 y 5. La tabla #1 muestra los datos obtenidos por el análisis del punto de operación los cuales son comparados con los resultados teóricos en la tabla #2. Se puede observar que la colocación del punto de operación es correcta pues no se observan distorsiones ni pérdidas en la señal de salida; también se obtiene un alto grado de amplificación.

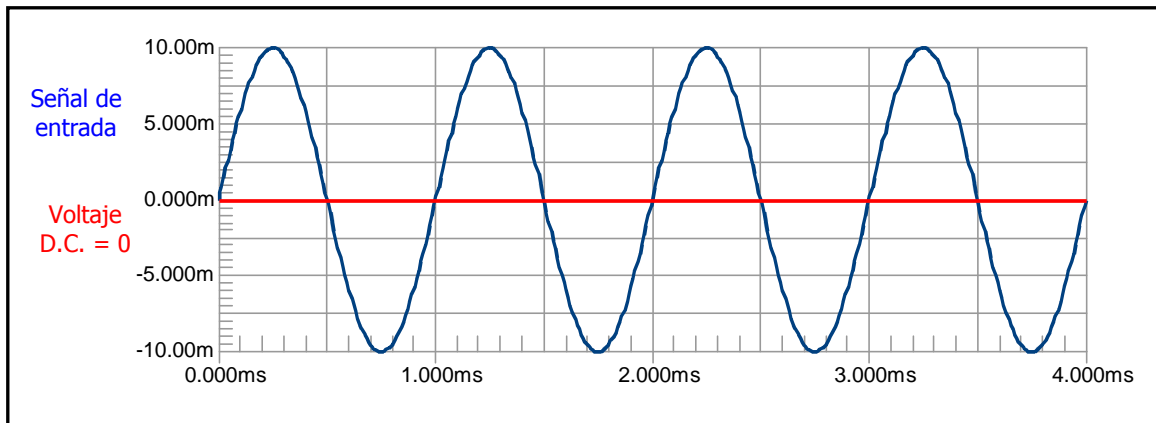
Tabla #1. Datos tomados con el análisis del punto de operación.

Parameter	DC Bias	DC Average	AC RMS
Ve	1.881 V	1.881 V	75.39uV
Vb	2.511 V	2.511 V	7.071mV
Vc	7.314 V	7.188 V	1.249 V
Ic	187.4uA	192.5uA	49.96 uA
Ib	696.0nA	710.1nA	153.9 nA
Ie	-188.1uA	-193.2uA	50.11uA
Z _{in}	0.000 Ω	45.28 KΩ	45.08 KΩ

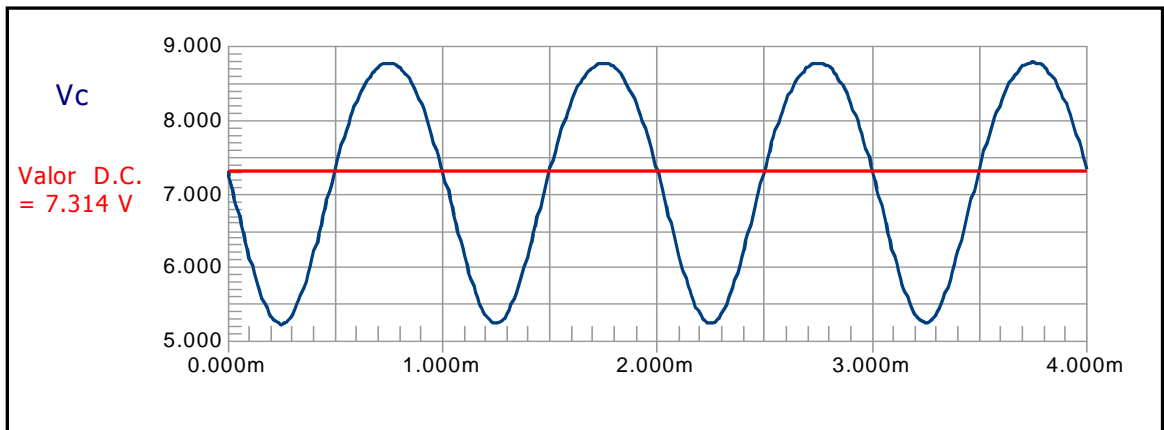
Tabla #2 Comparación de valores teóricos y simulados.

Parámetro	Valor teórico	Valor simulado
R _{in}	46.1 KΩ	45.28 KΩ
Vc	7.00 V	7.314 V
Vb	2.70 V	2.511 V
Ve	2.00 V	1.881 V
Ic	200 uA	187.4 uA
Ie	200.6 uA	188.1 uA
Ib	0.57 uA	0.69 uA

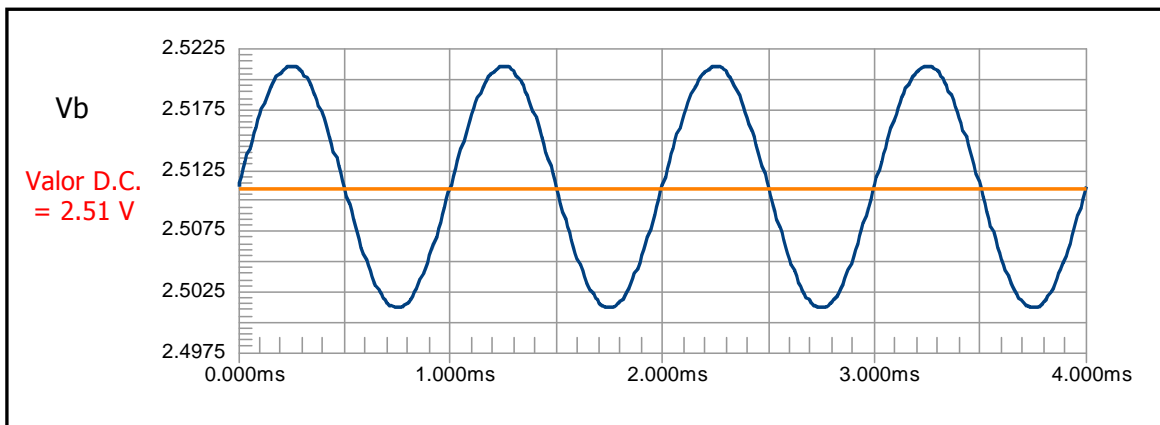
Gráfica #1. Análisis transiente. Voltaje de la señal de entrada.



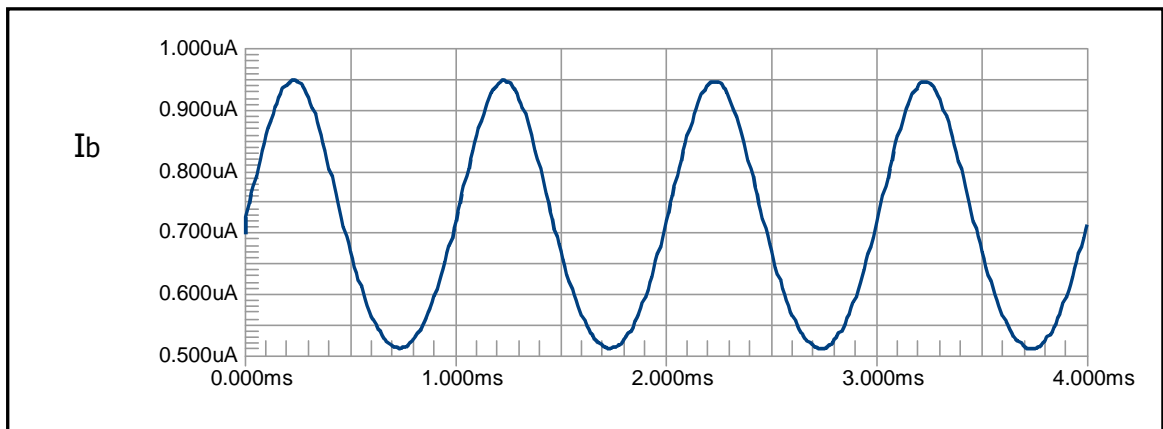
Gráfica #2. Análisis transiente. Voltaje del colector.



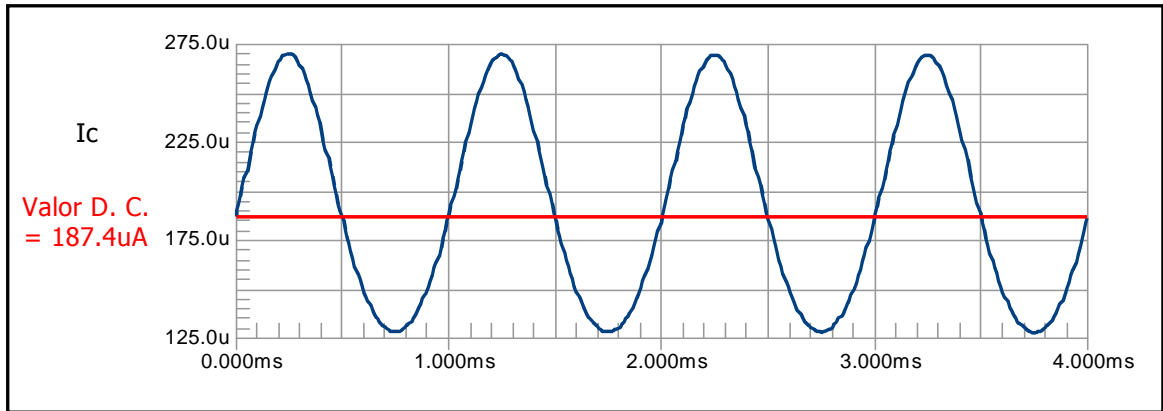
Gráfica #3. Análisis transiente. Señal y voltaje en la base.



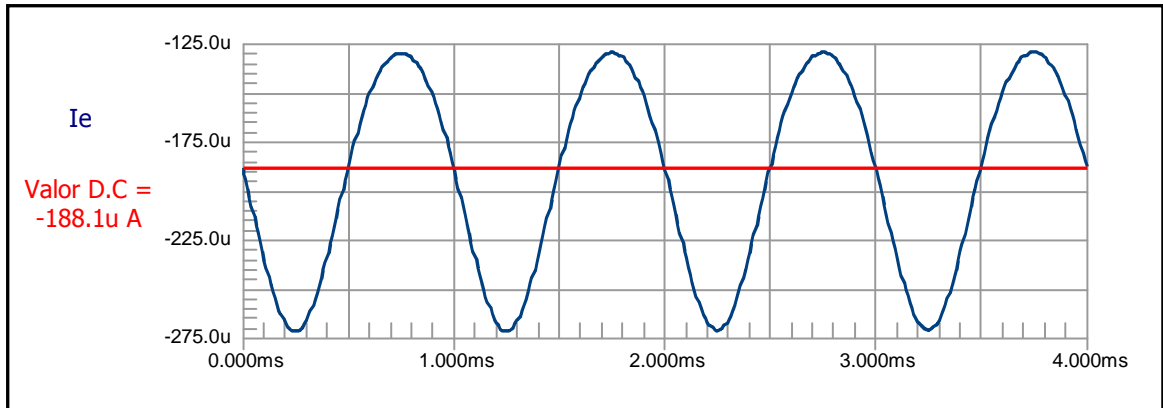
Gráfica #4. Análisis transiente. Corriente en la base.



Gráfica #5. Análisis transiente. Corriente en el colector

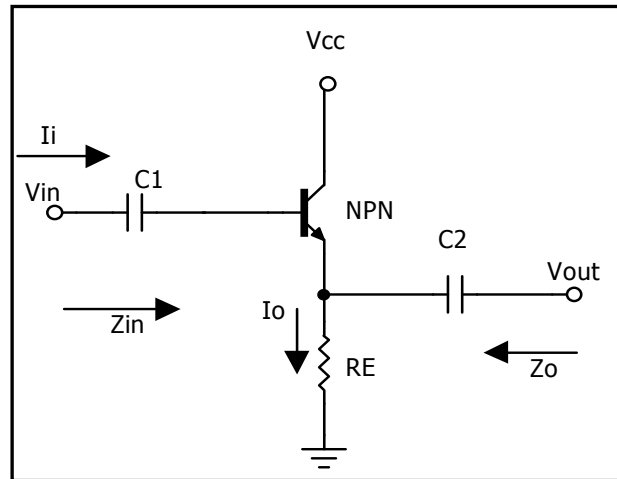


Gráfica #6. Análisis transiente. Corriente de emisor.



10. Configuración de emisor-seguidor. La configuración de emisor-seguidor, circuito #10, se utiliza a menudo con el propósito de acoplamiento de impedancia. Presenta una elevada impedancia en la entrada y una impedancia de salida baja, lo cual es totalmente lo opuesto a la configuración estándar de polarización fija. El resultado de este circuito es similar al que se obtiene con un transformador, donde la carga se acopla a la impedancia de la fuente para la transferencia máxima de potencia a través del sistema.

Circuito #10.



donde

$$Z_{in} = \beta (r_e + R_E) \quad (36)$$

$$I_I = I_b = V_I / \beta (r_e + R_E) \quad (37)$$

$$I_o = I_e = \frac{V_i}{[R_{be} / (1 + \beta)] + R_E} \quad (38)$$

$$Z_o = R_E \parallel \frac{R_{be}}{1 + \beta} \quad (39)$$

$$V_o = I_e R_E = \frac{R_E V_i}{[R_{be} / (1 + \beta)] + R_E} \quad (40)$$

Si se toman las siguientes especificaciones: $R_E = 4.7 \text{ K}\Omega$, el transistor es ECG26 que tiene una $\beta = 350$ y $R_{be} = 45.5 \text{ k}\Omega$; $V_{in} = 7 \text{ V}$ (teórico) se tendrán los siguientes resultados:

$$Z_{in} = R_{be} + \beta R_E = 45.5 \text{ k}\Omega + (350 * 4.7 \text{ K}\Omega) = \mathbf{1.69 \text{ M}\Omega}$$

$$Z_o = 4.7 \text{ K}\Omega \parallel (45.5 \text{ k}\Omega / (1 + 350)) = \mathbf{126.15 \Omega}$$

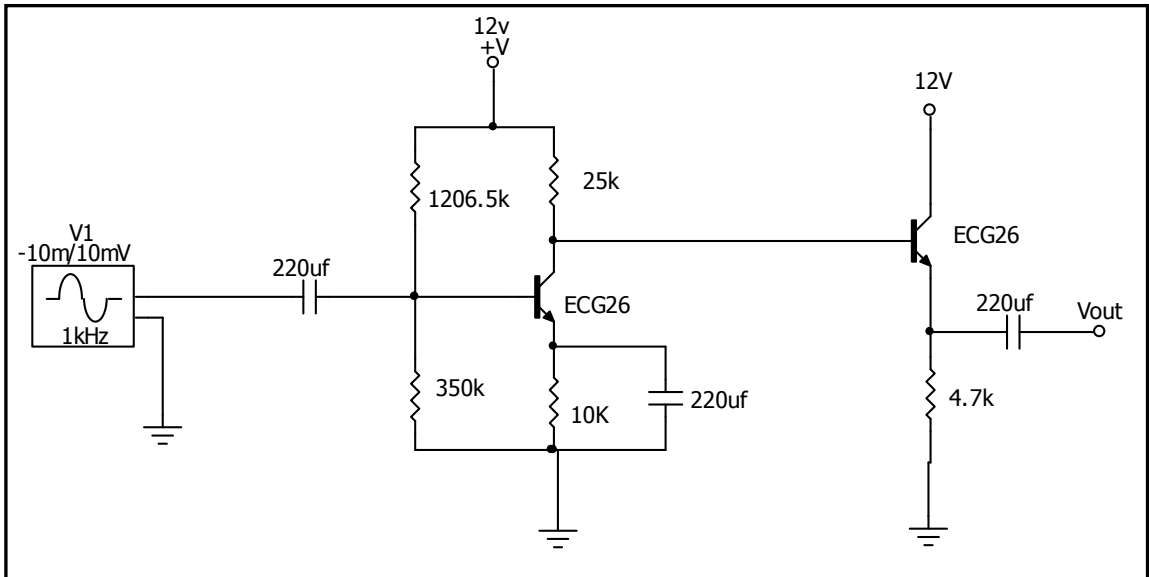
$$V_o = (4.7 \text{ k}\Omega * 7 \text{ V}) / [4.7 \text{ k}\Omega + (45.5 \text{ k}\Omega / 351)] = \mathbf{6.8121 \text{ V}}$$

$$I_I = 7 \text{ V} / [45.5 \text{ k}\Omega + (350 * 4.7 \text{ K}\Omega)] = 4.14 \text{ }\mu\text{A} = I_{b2}$$

$$I_o = I_{e2} = 7 \text{ V} / [4.7 \text{ k}\Omega + (45.5 \text{ k}\Omega / 351)] = 1.45 \text{ mA}$$

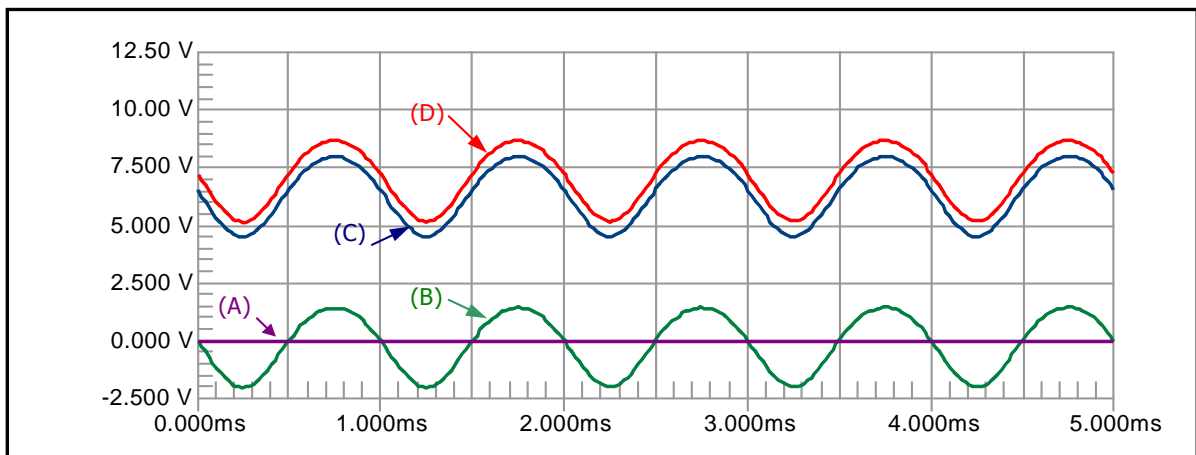
11. Etapa amplificadora completa. Con estos resultados se puede armar por completo la etapa amplificadora la cual se presenta en el circuito #11.

Circuito #11. Etapa amplificadora completa.



12. Simulación de la etapa amplificadora completa. Para simular el circuito #11 se coloca una resistencia de carga de 100K Ω en la terminal de V_{out} y así se obtendrán las curvas presentadas en la gráfica #7.

Gráfica #7. Voltajes de la etapa de amplificación.



En la gráfica #7 se muestran la señal a través de la etapa de amplificación. A) Señal que se desea amplificar, en este caso es de 10 mV; B) Señal de salida o Vout; esta señal se centra en cero debido al capacitor de acople y tiene una amplitud de 3.5V p-p. C) Señal después del seguidor de emisor. D) Señal amplificada después del primer transistor, centrada en 7.28V y con una amplitud de 3.5 V p-p.

Tabla #3. Voltajes de la señal en el transcurso de la etapa amplificadora.

Parameter	DC Bias	DC Average	AC RMS
V_{C1}	7.215 V	7.078 V	1.233 V
Vout	0.000 V	-135.7mV	1.227 V
V_{E2}	6.531 V	6.395 V	1.227 V
Vin	0.000 V	83.78pV	7.071mV
V_{B1}	2.511 V	2.511 V	7.071mV

Tabla #3. Corrientes de la señal en el transcurso de la etapa amplificadora.

Parameter	DC Bias	DC Average	AC RMS
Iout	0.000 A	-1.357uA	12.27uA
ib2	3.992uA	3.914uA	763.9nA
ie2	-1.390mA	-1.359mA	273.4uA
Iin	0.000 A	15.71nA	180.1nA
ic1	187.4uA	193.0uA	50.10uA
ib1	696.2nA	711.9nA	154.3nA

Tabla #4. Comparación de valores teóricos y simulados en el primer transistor.

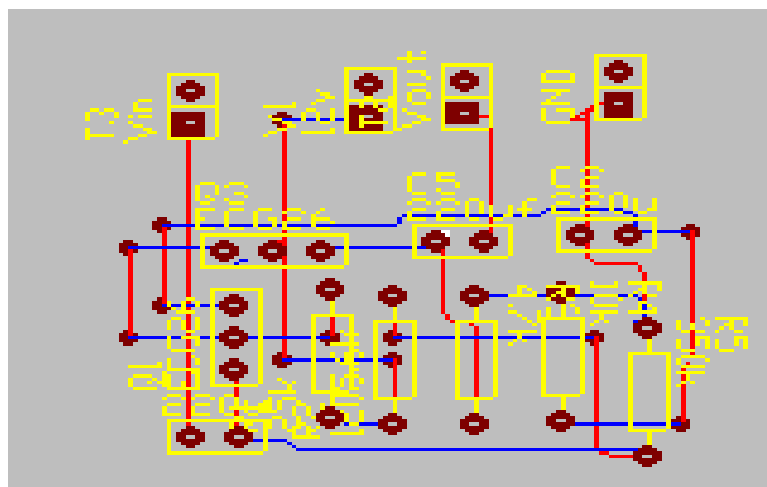
Parámetro	Valor teórico	Valor simulado
R_{in}	46.1 K Ω	44.92 K Ω
Vc1	7.00 V	7.215 V
Vb1	2.70 V	2.511 V
Ve1	2.00 V	1.881 V
Ic1	200 μ A	187.4 μ A
Ie1	200.6 μ A	188.1 μ A
Ib1	0.57 μ A	0.696 μ A

Tabla #5. Comparación de valores teóricos y simulados en el segundo transistor.

Parámetro	Valor teórico	Valor simulado
Vc2	12.00 V	12.00 V
Vb2	7.00 V	7.215 V
Ve2	6.812 V	6.531 V
Ic2	1.445 mA	1.386 mA
Ie2	1.45 mA	1.390 mA
Ib2	4.14 μ A	3.992 μ A

13. Trax Maker. Terminado el análisis y simulación de la etapa amplificadora en ultimo paso consiste en trasladar el circuito a Trax Maker, de tal manera que quede un circuito ordenado y fácil de entender tal como se muestra en la figura #11.

Figura #11. Etapa amplificador en Trax Maker.



14. Bus de señales. El bus de señales es un circuito que permite seleccionar la señal de salida de uno de los módulos simulados en el transcurso del laboratorio de circuitos impresos.

Consta de tres entradas correspondientes a cada uno de los módulos trabajados (FSK, 555 y etapa amplificadora) las cuales pueden ser activadas por medio de sus respectivos interruptores; así mismo un interruptor general que apagará o encenderá el bus.

La característica principal de este circuito consiste en que sólo se puede seleccionar una señal a la vez, si se encienden dos o más la señal de salida será cero o lo equivalente a que el bus esté desconectado, efecto similar que se presenta al activar el interruptor general.

a. Descripción. Las entradas para las señales están ordenadas de la siguiente manera:

Señal 1 = Señal de salida de la etapa de amplificación.

Señal 2 = Señal de salida del FSK.

Señal 3 = Señal de salida del 555.

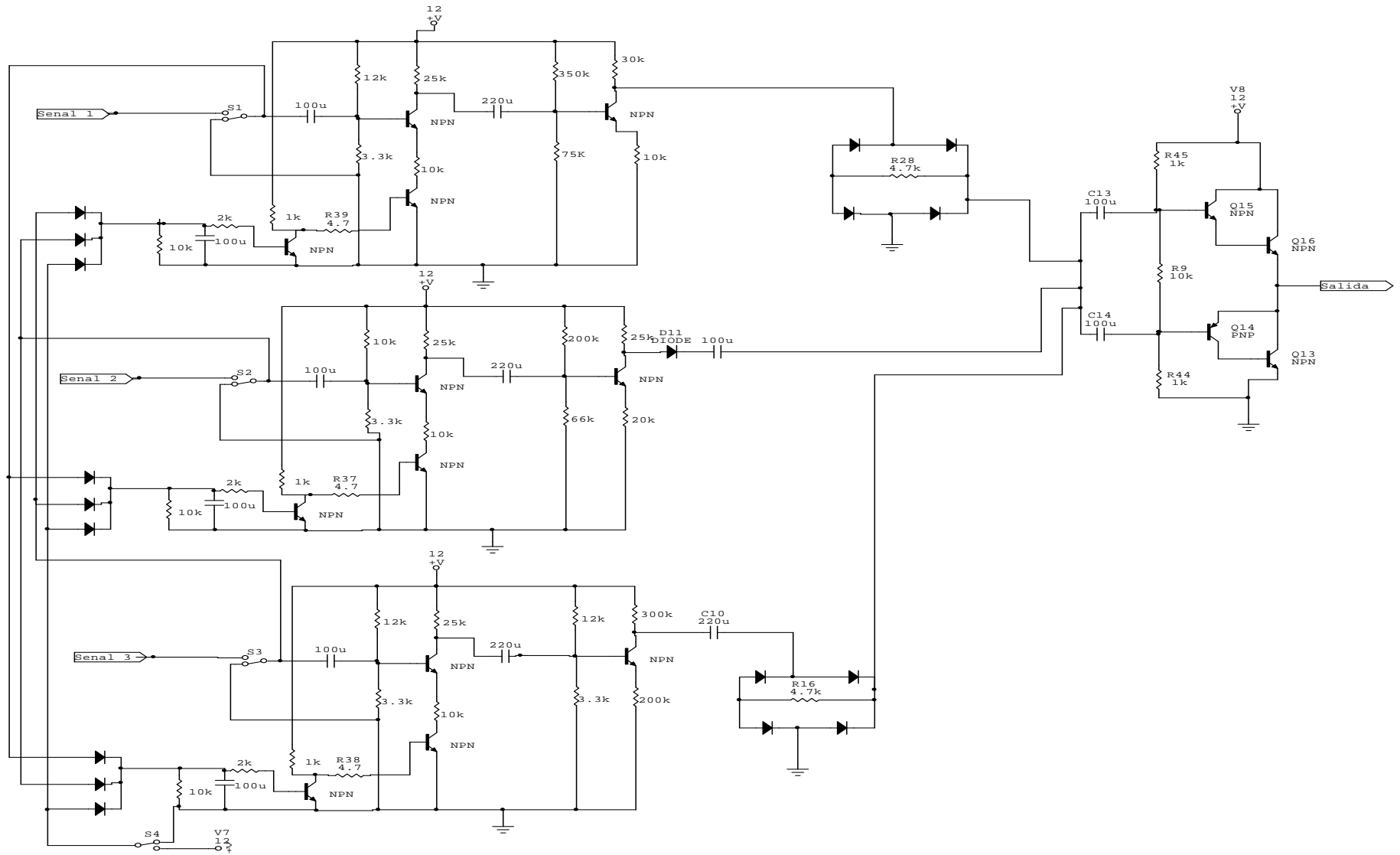
Cada entrada consta de su propio módulo de amplificación y rectificación los cuales están realizados basándose en las especificaciones de salidas de los módulos simulados tales como la amplitud, la frecuencia o la resistencia interna y externa de cada etapa.

El módulo amplificador está formado por una compuerta "and" implementada con dos transistores npn y un circuito amplificador negador, formado por un transistor y un divisor de voltaje en la base, el cual proporciona un nivel D. C. con el cual se polariza correctamente el transistor. Finalmente está el rectificador de onda completa para las señales senosoidales y un diodo para las señales cuadradas del Generador de señal.

La segunda etapa está formada por un push-pull con el cual tenemos una transferencia de potencia máxima del circuito hacia la carga que se conectara a la salida de este circuito.

Todas las etapas del circuito están acopladas unas con otras por medio de capacitores que le eliminara el montaje en D.C.; así se obtendrá la señal original en la salida del push-pull.

Bus de señales.



VI Conclusiones

1. El programa Circuit Maker 2000 es una gran herramienta para el estudiante al momento de diseñar y estudiar circuitos, dando la ventaja de conocer el comportamiento de diseños sin tener que implementarlo físicamente y obtener resultados cercanos a los reales para poder realizarlo de forma eficiente.
2. La obtención de las gráficas de los parámetros del transistor ayudan al estudiante a un mejor entendimiento del funcionamiento del mismo, así mismo, proporcionan la información necesaria para que con ciertas especificaciones de diseño se logre la implementaron mas eficiente de una manera más rápida.
3. Por medio de la simulación de circuitos se logran detectar fallas en el diseño de una manera mas rápida.
4. La mejor amplificación de una señal pequeña se logra con la colocación adecuada el punto de operación de la etapa de amplificación.
5. Las gráficas de los parámetros de un transistor no ideal revelan que este posee una región donde su funcionamiento es optimo, en el cual se debe basar el diseño e implantación para obtener los resultados más eficientes.
6. Con el uso continuo de la simulación, el alumno será capaz de analizar y deducir el comportamiento de un circuito con mayor rapidez y facilidad y así mismo encontrar posibles fallas y errores en los diseños que se le presenten.

VII. Bibliografía.

1. Boylestad, R; Nashelsky, L. 1989. *Electrónica teoría de circuitos*. 4ª ed. México. Prentice-Hall hispanoamericana, S. A.
2. Halkias, Ch. 1986. *Electrónica integral*. 7ª ed. España. Editorial Hispano-Europea S. A.
3. Kaufman, M; Seldman, A. 1987. *Manual para ingenieros y técnicos en electrónica*. México. Editorial McGraw-Hill.
4. Millman, J. 1965. *Pulse, digital and switching waveforms*. U.S.A. McGraw-Hill.
5. Smith, R. 1968. *Circuitos, dispositivos y sistemas*. México. Editorial Limusa-Wiley S. A.

