



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
*Escuela Politécnica Superior de Jaén*

# **ANALISIS Y SIMULACION DE PROBLEMAS DE ELECTRONICA ANALOGICA**

**Alumno: Carlos García Martín**

Tutor: Prof. D. Francisco Baena Villodres

Dpto: Ingeniería Electrónica y Automática

**INDICE**

1. INTRODUCCION Y OBJETIVO DEL TRABAJO .....	5
2. FUNDAMENTO TEORICO .....	8
2.1. SEMICONDUCTORES Y UNIONES.....	9
2.2. DIODOS .....	16
3.3. TRANSISTORES .....	19
3. PROBLEMAS .....	24
3.1. TEMA 1. SEMICONDUCTORES Y UNIONES.....	25
PROBLEMA 1. SEMICONDUCTOR INTRINSECO .....	25
PROBLEMA 2. SEMICONDUCTOR EXTRINSECO.....	26
PROBLEMA 3. CORRIENTES DE DIFUSION .....	28
PROBLEMA 4. POTENCIAL DE CONTACTO.....	28
NOMENCLATURA.....	30
3.2. TEMA 2. DIODOS .....	31
PROBLEMA 5. CONDICION DE ESTABILIDAD Y SEGURIDAD.....	31
PROBLEMA 6. DIODO ZENER .....	35
PROBLEMA 7. LIMITADOR ZENER .....	37
PROBLEMA 8. CONVERTIDOR AC/DC .....	40
PROBLEMA 9. DIODO LED .....	43
PROBLEMA 10. DISEÑO CIRCUITO LED .....	45
NOMENCLATURA.....	51
3.3. TEMA 3. TRANSISTORES. PUNTO DE POLARIZACION .....	52
PROBLEMA 11. POLARIZACION TRANSISTOR BJT TIPO NPN .....	52
PROBLEMA 12. POLARIZACION TRANSISTOR BJT TIPO PNP .....	55
PROBLEMA 13. CIRCUITO DE POLARIZACION FIJA.....	57
PROBLEMA 14. POLARIZACION TRANSISTOR FET TIPO N.....	60
PROBLEMA 15. POLARIZACION TRANSISTOR FET POR DIVISOR DE TENSION.....	62
PROBLEMA 16. POLARIZACION TRANSISTOR FET POR RESISTENCIA DE DRENADOR .....	65
PROBLEMA 17. TRANSISTOR PNP CON DIODOS .....	68
PROBLEMA 18. REGION DE TRABAJO TRANSISTOR BJT .....	72

PROBLEMA 19. RESISTENCIA VARIABLE.....	77
NOMENCLATURA.....	81
3.4. TEMA 4. AMPLIFICADORES Y RESPUESTA EN FRECUENCIA .....	82
PROBLEMA 20. AMPLIFICADOR BASE COMUN .....	82
PROBLEMA 21. AMPLIFICADOR COLECTOR COMUN.....	83
PROBLEMA 22. RESPUESTA EN FRECUENCIA AMPLIFICADOR COLECTOR COMUN .....	88
PROBLEMA 23. AMPLIFICADOR EMISOR COMUN .....	90
PROBLEMA 24. RESPUESTA EN FRECUENCIA AMPLIFICADOR EMISOR COMUN .....	94
PROBLEMA 25. AMPLIFICADOR SURTIDOR COMUN.....	98
PROBLEMA 26. RESPUESTA EN FRECUENCIA SURTIDOR COMUN .....	101
PROBLEMA 27. AMPLIFICADOR SURTIDOR COMUN POR DIVISOR DE TENSION.....	102
PROBLEMA 28. RESPUESTA EN FRECUENCIA SURTIDOR COMUN POR DIVISOR DE TENSION .....	106
PROBLEMA 29. AMPLIFICADOR SURTIDOR COMUN POR RESISTENCIA DE DRENADOR .....	108
PROBLEMA 30. RESPUESTA EN FRECUENCIA SURTIDOR COMUN POR RESISTENCIA DRENADOR.....	111
PROBLEMA 31. AMPLIFICADOR POR ETAPAS .....	113
NOMENCLATURA.....	121
3.5. TEMA 5. AMPLIFICADORES RETROALIMENTADOS .....	123
PROBLEMA 32. DISEÑO DIAGRAMA DE BLOQUES.....	123
PROBLEMA 33. DISEÑO AMPLIFICADOR RETROALIMENTADO S - P.....	124
PROBLEMA 34. DISEÑO AMPLIFICADOR RETROALIMENTADO.....	125
PROBLEMA 35. AMPLIFICADOR RETROALIMENTADO PARALELO - SERIE... .....	127
PROBLEMA 36. AMPLIFICADOR RETROALIMENTADO PARALELO - PARALELO.....	130
NOMENCLATURA.....	131
3.6. TEMA 6. AMPLIFICADORES DE POTENCIA .....	132
PROBLEMA 37. MAXIMA TRANSFERENCIA DE POTENCIA .....	132
PROBLEMA 38. AMPLIFICADOR DE POTENCIA CLASE A EMISOR COMUN .....	133

PROBLEMA 39. AMPLIFICADOR DE POTENCIA CLASE A SEGUIDOR EMISOR.....	134
PROBLEMA 40. AMPLIFICADOR DE POTENCIA CLASE B.....	136
PROBLEMA 41. AMPLIFICADOR DE POTENCIA CLASE AB .....	137
NOMENCLATURA.....	139
4. ANEXOS .....	140
4.1. LEYES Y TEOREMAS .....	141
4.2. SIMULACIONES .....	143
5. BIBLIOGRAFIA .....	153

# **1. INTRODUCCION Y OBJETIVO DEL TRABAJO**

## INTRODUCCION

El trabajo fin de grado consiste en una relación de ejercicios basados en la asignatura de Electrónica Analógica del tercer curso de la especialidad de Electrónica. Dicha relación consta de cuarenta ejercicios de los diversos temas de la asignatura recopilados de los apuntes de clase, libros relacionados con la asignatura y exámenes de años anteriores.

Los temas a tratar en el trabajo fin de grado han sido los siguientes:

- TEMA 1: Semiconductores y uniones.
- TEMA 2: Diodos.
- TEMA 3: Transistores. Punto de polarización.
- TEMA 4: Amplificadores y respuesta en frecuencia.
- TEMA 5: Amplificadores retroalimentados.
- TEMA 6: Amplificadores de potencia.

Los problemas han sido resueltos según los conocimientos adquiridos durante el periodo lectivo de la asignatura y adquiriendo nuevos conocimientos consultando libros y páginas de internet.

Los problemas constan de una solución analítica, simulaciones de los circuitos planteados y comparación de resultados calculados y simulados.

En la solución analítica del problema se resuelve y analiza todo lo que nos plantea el enunciado, explicando teóricamente todos pasos que se van realizando.

Para las simulaciones de los circuitos se ha usado el programa Orcad Pspice versión 16.6 CIS Lite. Más adelante se muestra un anexo en el que se explica cómo se han obtenido las simulaciones según los distintos temas de la asignatura.

Para comparar los resultados obtenidos analíticamente y los simulados se ha hecho a través de tablas comparativas realizadas con el programa Excel del paquete Office Versión 2010.

La memoria del trabajo así como todos los problemas y ecuaciones planteadas han sido realizadas mediante el programa Microsoft Word del paquete Office versión 2010.

El trabajo también dispone de un fundamento teórico de cada uno de los temas para comprender mejor el funcionamiento de los circuitos y la resolución de los mismos.

## **OBJETIVO DEL PROYECTO**

El objetivo de este trabajo es hacer recopilación de los ejercicios más característicos de la asignatura y resolverlos paso a paso explicándolos lo mejor posible para que pueda servir de ayuda a futuros alumnos de esta asignatura para su aprendizaje y comprensión. También puede servir como una pequeña guía para realizar las simulaciones de los ejercicios planteados en clase y en las prácticas.

# 2. FUNDAMENTO TEORICO



## 2.1. SEMICONDUCTORES Y UNIONES

### SEMICONDUCTOR

Cuerpo sólido de conductividad eléctrica intermedia entre la de los conductores y la de los aislantes.

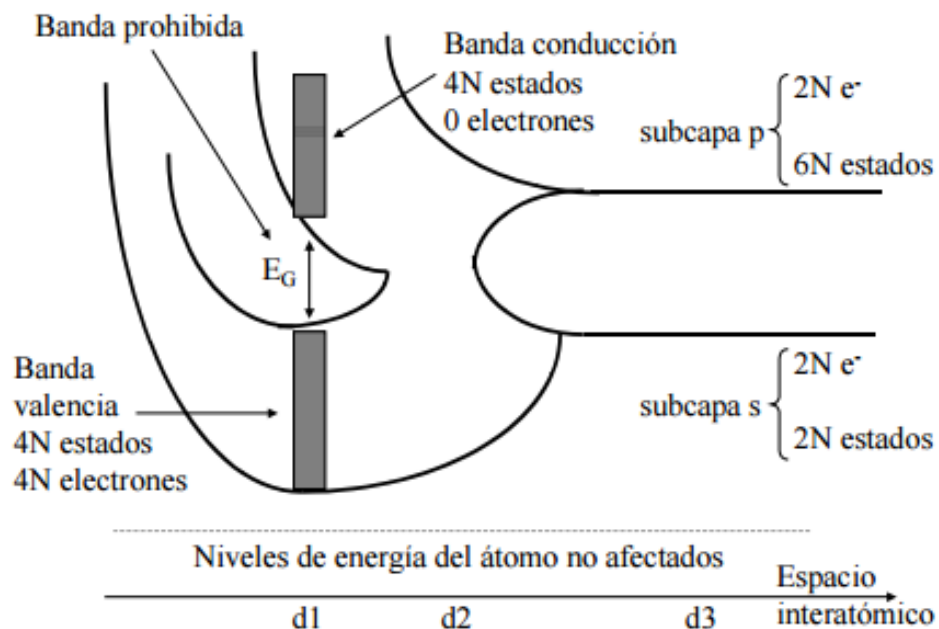
[10]

### TEORÍA DE LAS BANDAS DE ENERGÍA

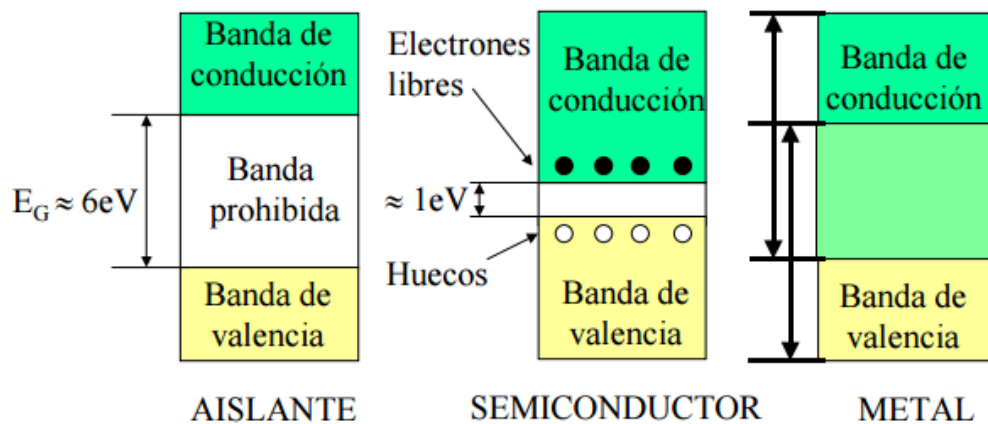
Sólido: Cuerpo que tiene forma y volumen constantes.

Cristal: Sólido cuyas partículas están dispuestas regular y periódicamente.

El potencial característico de la estructura cristalina es una función periódica en el espacio. Debido al acoplamiento entre las capas más exteriores de electrones de los átomos, la mecánica cuántica determina que sus niveles de energía están próximos entre sí y forman una banda de energía.



## AISLANTES, SEMICONDUCTORES Y METALES



Semiconductores prácticos: Silicio ( $E_G = 1,21 \text{ eV}$  a  $0 \text{ }^\circ\text{K}$ ), Germanio ( $E_G = 0,785 \text{ eV}$  a  $0 \text{ }^\circ\text{K}$ ).

$$E_G(\text{Si}) = 1,21 - 3,60 \cdot 10^{-4} T$$

$$E_G(\text{Ge}) = 0,785 - 2,23 \cdot 10^{-4} T$$

A temperatura ambiente  $T = 300 \text{ }^\circ\text{K}$ :  $E_G(\text{Si}) = 1,1 \text{ eV}$  y  $E_G(\text{Ge}) = 0,72 \text{ eV}$

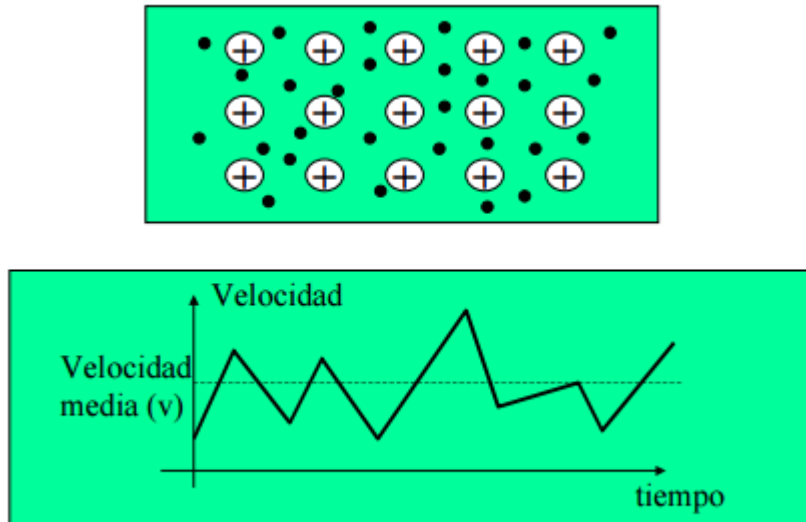
## MOVILIDAD

### Modelo de cargas de un metal:

Región que contiene una red periódica tridimensional de iones pesados fuertemente enlazados rodeados de una nube de "gas electrónico".

Al aplicar un campo eléctrico se cumple la 1ª ley de Newton:  $a = F/m = q \cdot E/m$  Hasta que se llega a un equilibrio con la energía perdida en las colisiones y se llega a una velocidad media constante (similar a lo que ocurre con el rozamiento):  $v_{\text{media}} = \mu \cdot E$

$\mu \Rightarrow$  movilidad de los electrones [ $\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ]



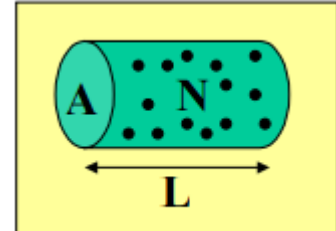
El desplazamiento debido a  $E$  se superpone al debido a la agitación térmica.

### DENSIDAD DE CORRIENTE

Nº e- que atraviesan sección por unidad de tiempo:

$N/T$

$T$ : tiempo que tarda e- en recorrer  $L \Rightarrow T = L/v$



$$I = (N/T) \cdot q = (N \cdot q \cdot v)/L \text{ [Amperios]}$$

$$J = I/A = (N \cdot q \cdot v)/(A \cdot L) \text{ [Amp/m}^2\text{]}$$

$$n = N/(A \cdot L) \Rightarrow \text{concentración de electrones por unidad de volumen [e}^-/\text{m}^3\text{]}$$

$$\rho = n \cdot q \Rightarrow \text{densidad de carga [culomb/ m}^3\text{]}$$

$$J = n \cdot q \cdot v = \rho \cdot v$$

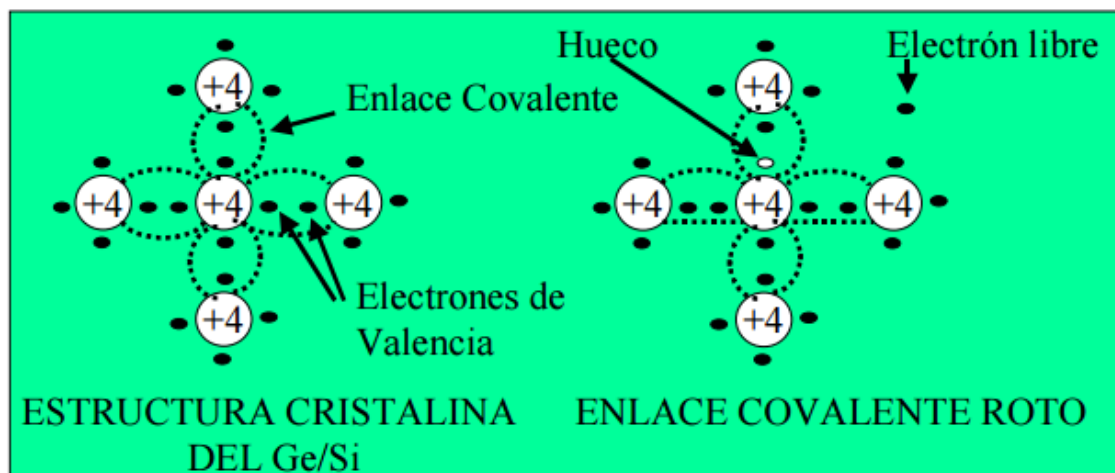
$$J = n \cdot q \cdot v = n \cdot q \cdot \mu \cdot E = \sigma \cdot E$$

$$\sigma = n \cdot q \cdot \mu \Rightarrow \text{conductividad [1}/(\Omega \cdot \text{m})\text{]}$$

Densidad térmica de potencia (efecto Joule) es la potencia disipada por unidad de volumen. La energía se cede a los iones en los choques:

$$(V \cdot I)/volumen = (E \cdot L \cdot J \cdot A)/volumen = E \cdot J = \sigma \cdot E^2 [\text{watt}/\text{m}^3]$$

## SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS



Hueco: Enlace covalente roto

A 0 °K los semiconductores intrínsecos son aislantes. A temperatura ambiente existen electrones libres y huecos resultantes del aporte de energía térmica.

El mecanismo de desplazamiento de un hueco no implica electrones libres y supone un movimiento de cargas positivas.

En un semiconductor intrínseco la concentración de electrones libres ( $n$ ) es igual a la de huecos ( $p$ ) e igual a su vez a la concentración intrínseca:

$$n = p = n_i$$

Recombinación: Desaparición de pares de electrón-hueco

## ANOTACIONES IMPUREZAS DONADORAS Y ACEPTADORAS

Semiconductor extrínseco: Semiconductor contaminado con átomos de otro material.

Semiconductor extrínseco tipo n: Semiconductor contaminado con impurezas donadoras (elementos químicos pentavalentes como por ejemplo el Sb, P, As del grupo VA de la tabla periódica).

Semiconductor extrínseco tipo p: Semiconductor contaminado con impurezas aceptadoras (elementos químicos trivalentes como por ejemplo el B, Ga, In del grupo IIIA de la tabla periódica).

### Ley de acción de masas

A una temperatura T de equilibrio térmico se cumple que:

$$n \cdot p = ni^2$$

$ni$  => concentración intrínseca. Aumenta con la temperatura.

Semiconductor tipo n:  $e^-$  ( $n$ ) => portadores mayoritarios =>  $n_n$

Huecos ( $p$ ) => portadores minoritarios =>  $p_n$

Semiconductor tipo p:  $e^-$  ( $n$ ) => portadores minoritarios =>  $n_p$

Huecos ( $p$ ) => portadores mayoritarios =>  $p_p$

Las impurezas aumentan la conductividad.

## DENSIDAD DE CARGA EN UN SEMICONDUCTOR

Ley de la neutralidad eléctrica ( $n^{\circ}$  cargas positivas =  $n^{\circ}$  cargas negativas):  $p +$

$$N_D = n + N_A$$

Semiconductor tipo n:

$$N_A = 0 \Rightarrow n = N_D + p \approx N_D$$

$$n_n \approx N_D ; \text{ como } n_n \cdot p_n = ni^2 \Rightarrow p_n = ni^2/N$$

Semiconductor tipo p:

$$N_D = 0 \Rightarrow p = N_A + n \approx N_A$$

$$p_p \approx N_A; \text{ como } n_p \cdot p_p = n_i^2 \Rightarrow n_p = n_i^2 / N_A$$

Concentración intrínseca:

$$n_i^2 = A_0 \cdot T^3 \cdot e^{-E_G/K.T}$$

$E_G$ : ancho de la banda prohibida a 0 °K

K: constante de Boltzman =  $1,381 \cdot 10^{-23}$  julios/°K

$A_0$ : constante independiente de T

Conductividad de un semiconductor:  $\sigma = n \cdot \mu_n \cdot q + p \cdot \mu_p \cdot q$

**DIFUSIÓN**

Además de producirse una  $I$  (corriente de conducción) en un semiconductor al aplicar un campo eléctrico  $E$ , se puede tener otra corriente  $I$  de difusión de portadores entre dos zonas de diferente concentración.

$J_p = -q \cdot D_p \cdot dp/dx$  : Densidad de corriente de difusión de huecos

$J_n = q \cdot D_n \cdot dn/dx$  : Densidad de corriente de difusión de electrones

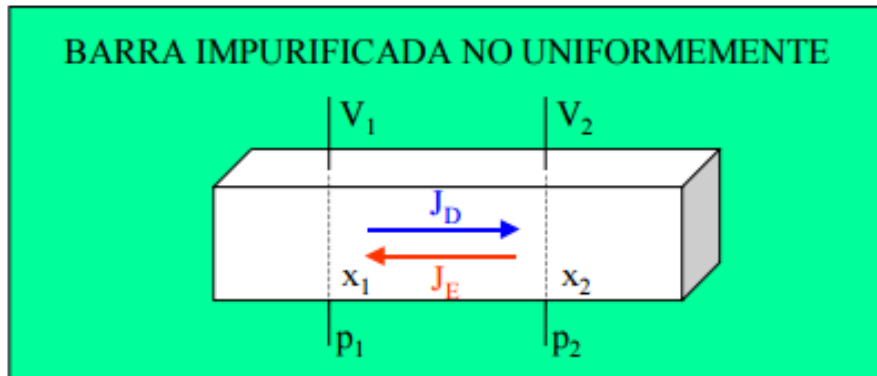
Corriente total:

$$J_p = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot E - q \cdot D_p \cdot dp/dx$$

$$J_n = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot E + q \cdot D_n \cdot dn/dx$$

## VARIACIÓN DE POTENCIAL EN UN SEMICONDUCTOR

Supongamos una barra impurificada no uniformemente:



Si está en circuito abierto:  $I = 0 \Rightarrow J_p = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot E - q \cdot D_p \cdot dp/dx = 0$

$$E = (D_p/\mu_p \cdot p) \cdot dp/dx = (VT/p) \cdot dp/dx$$

Además tenemos que  $E = -dV/dx \Rightarrow dV = -E \cdot dx$

Por lo tanto:  $dV = -VT \cdot dp/p$

$$V_{21} = -V_T \cdot dp/p = V_T \cdot \ln(p_1/p_2) \Rightarrow p_1 = p_2 \cdot e^{V_{21}/V_T}$$

Análogamente se tiene:

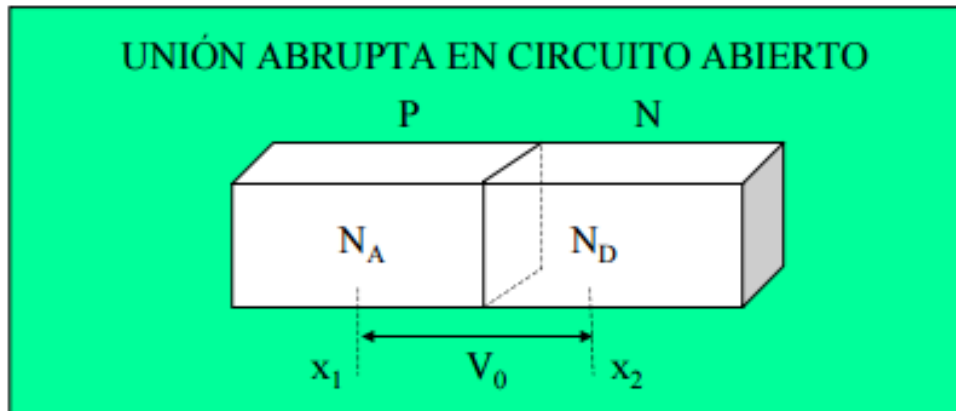
$$J_n = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot E + q \cdot D_n \cdot dn/dx = 0 \Rightarrow n_1 = n_2 \cdot e^{V_{21}/V_T}$$

Lo anterior implica que:

$$p_1 \cdot n_1 = p_2 \cdot n_2 \Rightarrow p \cdot n \text{ es independiente de } x$$

$$n \cdot p = ni^2 \text{ Demostración de la ley de acción de masas.}$$

Supongamos una unión abrupta en circuito abierto:



$$V_0 = V_{12} = V_T \cdot \ln(p_p / p_n)$$

$$p_p \approx N_A \text{ y } p_n \approx n_i^2 / N_D$$

$$V_0 = V_T \cdot \ln(N_A \cdot N_D / n_i^2): \text{ Diferencia de potencial de contacto}$$

## 2.2. DIODOS

### DIODO SEMICONDUCTOR

[11] El diodo semiconductor es el dispositivo semiconductor más sencillo y se puede encontrar, prácticamente en cualquier circuito electrónico. Los diodos se fabrican en versiones de silicio (la más utilizada) y de germanio.

Los diodos constan de dos partes, una llamada N y la otra llamada P, separados por una juntura llamada barrera o unión. Esta barrera o unión es de 0.3 voltios en el diodo de germanio y de 0.6 voltios aproximadamente en el diodo de silicio.

El diodo se puede hacer trabajar de 2 maneras diferentes:



### Polarización directa

Es cuando la corriente que circula por el diodo sigue la ruta de la flecha (la del diodo), o sea del ánodo al cátodo.



En este caso la corriente atraviesa el diodo con mucha facilidad comportándose prácticamente como un corto circuito.

### Polarización inversa

Es cuando la corriente en el diodo desea circular en sentido opuesto a la flecha (la flecha del diodo), o sea del cátodo al ánodo.



En este caso la corriente no atraviesa el diodo, y se comporta prácticamente como un circuito abierto.

## DIODO ZENER

[12] El diodo zener es un tipo especial de diodo, que siempre se utiliza polarizado inversamente. Recordar que los diodos comunes, como el diodo rectificador (en donde se aprovechan sus características de polarización directa y polarización inversa), conducen siempre en el sentido de la flecha.

En este caso la corriente circula en contra de la flecha que representa el diodo. Si el diodo zener se polariza en sentido directo se comporta como un diodo rectificador común. Cuando el diodo zener funciona polarizado inversamente mantiene entre sus terminales un voltaje constante.

Se analizará el diodo zener, no como un elemento ideal, si no como un elemento real y se debe tomar en cuenta que cuando éste se polariza en modo inverso si existe una corriente que circula en sentido contrario a la flecha del diodo, pero de muy poco valor.

## Curva característica del diodo Zener

Analizando la curva del diodo zener se ve que conforme se va aumentando negativamente el voltaje aplicado al diodo, la corriente que pasa por el aumenta muy poco.



Pero una vez que se llega a un determinado voltaje, llamada voltaje o tensión de Zener ( $V_Z$ ), el aumento del voltaje (siempre negativamente) es muy pequeño, pudiendo considerarse constante.

Para este voltaje, la corriente que atraviesa el diodo zener, puede variar en un gran rango de valores. A esta región se le llama la zona operativa. Esta es la característica del diodo zener que se aprovecha para que funcione como regulador de voltaje, pues el voltaje se mantiene prácticamente constante para una gran variación de corriente.

## DIODO LED

[13] El LED es un tipo especial de diodo, que trabaja como un diodo común, pero que al ser atravesado por la corriente eléctrica, emite luz. Existen diodos LED de varios colores que dependen del material con el cual fueron construidos. Hay de color rojo, verde, amarillo, ámbar, infrarrojo, entre otros. Eléctricamente el diodo LED se comporta igual que un diodo de silicio o germanio.

Si se pasa una corriente a través del diodo semiconductor, se inyectan electrones y huecos en las regiones P y N, respectivamente.

Dependiendo de la magnitud de la corriente, hay recombinación de los portadores de carga (electrones y huecos). Hay un tipo de recombinaciones que se llaman recombinaciones radiantes (aquí la emisión de luz).

Debe de escogerse bien la corriente que atraviesa el LED para obtener una buena intensidad luminosa y evitar que este se pueda dañar.

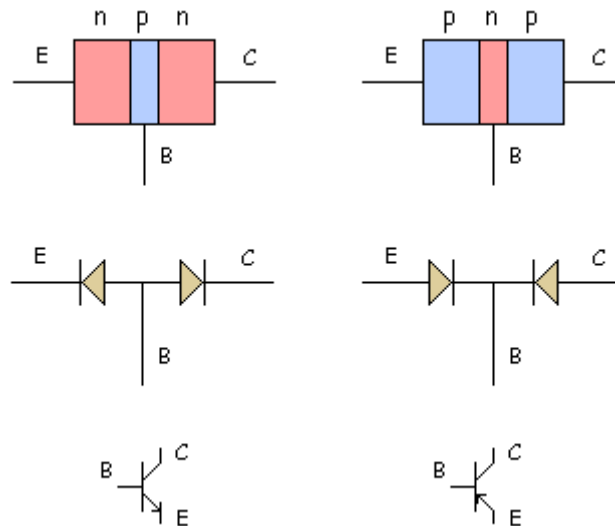
El LED tiene un voltaje de operación que va de 1.5 V a 2.2 voltios aproximadamente y la gama de corrientes que debe circular por él está entre los 10 y 20 miliamperios (mA) en los diodos de color rojo y de entre los 20 y 40 miliamperios (mA) para los otros LEDs.

El diodo LED debe ser protegido. Una pequeña cantidad de corriente en sentido inverso no lo dañará, pero si hay picos inesperados puede dañarse. Una forma de protegerlo es colocar en paralelo con el diodo LED pero apuntando en sentido opuesto un diodo de silicio común.

## **2.3. TRANSISTORES**

### **TRANSISTOR BIPOLAR**

[14] Un transistor bipolar está formado por dos uniones pn en contraposición. Físicamente, el transistor está constituido por tres regiones semiconductoras denominadas emisor, base y colector. Existen 2 tipos de transistores bipolares, los denominados NPN y PNP:



### ***Transistores Bipolares npn y pnp.***

A partir de este punto nos centramos en el estudio de los transistores bipolares NPN, siendo el comportamiento de los transistores PNP totalmente análogo.

El emisor en un transistor NPN es la zona semiconductor más fuertemente dopada con donadores de electrones, siendo su ancho intermedio entre el de la base y el colector. Su función es la de emitir electrones a la base. La base es la zona más estrecha y se encuentra débilmente dopada con aceptores de electrones. El colector es la zona más ancha, y se encuentra dopado con donadores de electrones en cantidad intermedia entre el emisor y la base.

### **Condiciones de funcionamiento**

Las condiciones normales de funcionamiento de un transistor NPN se dan cuando el diodo B-E se encuentra polarizado en directa y el diodo B-C se encuentra polarizado en inversa. En esta situación gran parte de los electrones que fluyen del emisor a la base consiguen atravesar ésta, debido a su poco grosor y débil dopado, y llegar al colector.

El transistor posee tres zonas de funcionamiento:

1. **Zona de saturación:** El diodo colector está polarizado directamente y es transistor se comporta como una pequeña resistencia. En esta zona un aumento adicional de la corriente de base no provoca un aumento de la corriente de colector, ésta depende exclusivamente de la tensión entre emisor y colector. El transistor se asemeja en su circuito emisor-colector a un interruptor cerrado.
2. **Zona activa:** En este intervalo el transistor se comporta como una fuente de corriente , determinada por la corriente de base. A pequeños aumentos de la corriente de base corresponden grandes aumentos de la corriente de colector, de forma casi independiente de la tensión entre emisor y colector. Para trabajar en esta zona el diodo B-E ha de estar polarizado en directa, mientras que el diodo B-C, ha de estar polarizado en inversa.
3. **Zona de corte:** El hecho de hacer nula la corriente de base, es equivalente a mantener el circuito base emisor abierto, en estas circunstancias la corriente de colector es prácticamente nula y por ello se puede considerar el transistor en su circuito C-E como un interruptor abierto.

Los transistores se usan en su zona activa cuando se emplean como amplificadores de señales. Las zonas de corte y saturación son útiles en circuitos digitales.

## TRANSISTOR MOSFET

[15] Consiste en un transistor de efecto de campo basado en la estructura MOS. Es el transistor más utilizado en la industria microelectrónica. La práctica totalidad de los circuitos integrados de uso comercial están basados en transistores MOSFET.

Un transistor MOSFET consiste en un sustrato de material semiconductor dopado en el que, mediante técnicas de difusión de dopantes,

se crean dos islas de tipo opuesto separadas por un área sobre la cual se hace crecer una capa de dieléctrico culminada por una capa de conductor.

### **Tipos de Mosfet**

Los transistores MOSFET se dividen en dos tipos fundamentales dependiendo de cómo se haya realizado el dopaje: Tipo nMOS: Sustrato de tipo p y difusiones de tipo n. Tipo pMOS: Sustrato de tipo n y difusiones de tipo p. Las áreas de difusión se denominan fuente y drenador, y el conductor entre ellos es la puerta.

### **Estados de los Mosfet**

El transistor MOSFET tiene tres estados de funcionamiento:

1. Estado de corte:

Estado de corte Cuando la tensión de la puerta es idéntica a la del sustrato.

2. Estado de NO conducción:

El MOSFET está en estado de no conducción: ninguna corriente fluye entre fuente y drenador aunque se aplique una diferencia de potencial entre ambos.

3. Conducción lineal:

Al polarizarse la puerta con una tensión negativa (pMOS) o positiva (nMOS), se crea una región de depleción en la región que separa la fuente y el drenador. Si esta tensión crece lo suficiente, aparecerán portadores minoritarios (electrones en nMOS, huecos en pMOS) en la región de depleción que darán lugar a un canal de conducción.

El transistor pasa entonces a estado de conducción, de modo que una diferencia de potencial entre fuente y drenador dará lugar a una corriente. El transistor se comporta como una resistencia controlada por la tensión de puerta.

Saturación: Cuando la tensión entre drenador y fuente supera cierto límite, el canal de conducción bajo la puerta sufre un estrangulamiento en las

cercanías del drenador y desaparece. La corriente entre fuente y drenador no se interrumpe, ya que es debida al campo eléctrico entre ambos, pero se hace independiente de la diferencia de potencial entre ambos terminales.

### **Características eléctricas del JFET**

El JFET de canal n está constituido por una barra de silicio de material semiconductor de tipo n con dos regiones (islas) de material tipo p situadas a ambos lados. Es un elemento tri-terminal cuyos terminales se denominan drenador (drain), fuente (source) y puerta (gate).

La polarización de un JFET exige que las uniones p-n estén inversamente polarizadas. En un JFET de canal n, o NJFET, la tensión de drenador debe ser mayor que la de la fuente para que exista un flujo de corriente a través de canal. Además, la puerta debe tener una tensión más negativa que la fuente para que la unión p-n se encuentre polarizado inversamente.

Las curvas de características eléctricas de un JFET son muy similares a las curvas de los transistores bipolares. Sin embargo, los JFET son dispositivos controlados por tensión a diferencia de los bipolares que son dispositivos controlados por corriente.

Por ello, en el JFET intervienen como parámetros:  $I_D$  (intensidad drain o drenador a source o fuente),  $V_{GS}$  (tensión gate o puerta a source o fuente) y  $V_{DS}$  (tensión drain o drenador a source o fuente). Se definen cuatro regiones básicas de operación: corte, lineal, saturación y ruptura. A continuación se realiza una descripción breve de cada una de estas regiones para el caso de un NJFET.

# 3. PROBLEMAS



### 3.1. TEMA 1. SEMICONDUCTORES Y UNIONES

#### PROBLEMA 1. Semiconductor Intrínseco

##### **Enunciado:**

Calcular la resistencia de un semiconductor de silicio intrínseco, de 0.5 cm de longitud y 5 mm<sup>2</sup> de sección, conociendo:

- $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ .
- $\mu_p = 500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ .
- $n_i \cong 10^{10} \text{ portadores}/\text{cm}^3$ .
- $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ .

##### **Solución analítica:**

Para hallar la resistencia del semiconductor de silicio intrínseco, hemos de hallar primero su resistividad.

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q n_i (\mu_n + \mu_p)} = \frac{1 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{V} \cdot \text{s}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot 10^{10} \cdot (1350 + 500) \times 10^{-4} \text{ m}^2} \\ &= 3378 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{C}} \text{ m} \end{aligned}$$

Cómo  $A = C/s$ , y  $\Omega = V/A$ , entonces el resultado de la resistividad es el siguiente:

$$\rho = 3378 \Omega \text{ m}$$

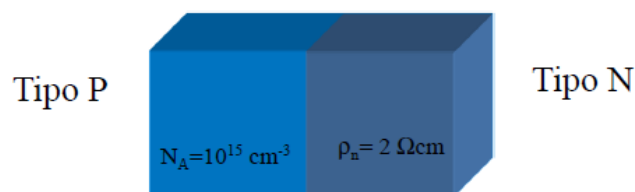
Una vez sabida la resistividad de dicho semiconductor, vamos a proceder ahora a calcular su resistencia:

$$R = \frac{\rho L}{S} = \frac{3378 \Omega \text{ m} \cdot 0,5 \times 10^{-2} \text{ m}}{5 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = 3378 \text{ k}\Omega$$

**PROBLEMA 2. Semiconductor Extrínseco****Enunciado:**

Se ha fabricado un semiconductor de silicio tipo P con  $N_A=10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , en un extremo del mismo se le añaden impurezas donadoras para convertir esta zona en tipo N con resistividad  $\rho_n = 2 \text{ } \Omega\text{cm}$ . Se conocen los siguientes datos:  $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_p = 500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $n_i \cong 10^{10} \text{ portadores}/\text{cm}^3$ ,  $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ .

1. Determinar el valor de impurezas  $N_D$  añadidas.
2. Determinar las concentraciones de portadores mayoritarios y minoritarios en cada zona.
3. Si cada lado mide 1mm de longitud y tiene  $0,2 \text{ mm}^2$  de sección ¿qué resistencia presentará cada zona?

**Solución analítica:**

En un semiconductor extrínseco, según el tipo que sea, sabemos que:

- Tipo P:  $p_p \cong N_A$  y  $p_p \gg n_p$ .
- Tipo N:  $n_n \cong N_D$  y  $n_n \gg p_n$ .

1. Para determinar el valor de impurezas  $N_D$  añadidas, vamos a calcular los portadores mayoritarios  $n_n$ .

$$\rho_n = \frac{1}{q (n_n \mu_n + p_n \mu_p)} \cong \frac{1}{q n_n \mu_n} ;$$

$$n_n = \frac{1}{q \rho_n \mu_n} = \frac{1 \text{ V} \cdot \text{s}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot 2 \text{ } \Omega\text{cm} \cdot 1350 \text{ cm}^2} = 2,31 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_D \cong 2,31 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

2. concentraciones de portadores mayoritarios y minoritarios en cada zona.

➤ Zona Tipo P:

$$p_p \cong N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} = \frac{10^{20}}{10^{15}} = 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

➤ Zona Tipo N:

$$n_n = 2,31 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = \frac{10^{20}}{2,31 \times 10^{15}} = 4,34 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

3. Resistencia en cada zona.

➤ Zona Tipo P:

$$\rho_p \cong \frac{1}{q p_p \mu_p} = \frac{1 \text{ V} \cdot \text{s}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3} \cdot 500 \text{ cm}^2} = 12,5 \text{ } \Omega \text{ cm}$$

$$R = \frac{\rho L}{S} = \frac{12,5 \text{ } \Omega \text{ cm} \cdot 0,1 \text{ cm}}{0,2 \times 10^{-2} \text{ cm}^2} = 625 \text{ } \Omega$$

➤ Zona Tipo N:

$$R = \frac{\rho L}{S} = \frac{2 \text{ } \Omega \text{ cm} \cdot 0,1 \text{ cm}}{0,2 \times 10^{-2} \text{ cm}^2} = 100 \text{ } \Omega$$

**PROBLEMA 3. Corrientes de difusión****Enunciado:**

Determinar la corriente de difusión  $J_n$  conociendo los siguientes datos:

- $\frac{\partial n}{\partial x} = 10^{10} \text{ cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ .
- Temperatura de 0 °C.
- $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ .
- $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ .
- $k = 1,3806 \times 10^{-23} \text{ W}\cdot\text{s}/\text{K}$

**Solución analítica:**

Lo primero que deberíamos hacer en este caso es calcular el valor de la constante de difusión de los electrones  $D_n$ :

$$D_n = K \frac{T}{q} \mu_n = 1,3806 \frac{\text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}}{\text{K}} \cdot \frac{273 \text{ K}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}} \cdot 1350 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}} = 31,72 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

Una vez calculado, ya podemos determinar la corriente de difusión  $J_n$  para dar solución al problema:

$$J_n^{dif} = q D_n \frac{\partial n}{\partial x} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s} \cdot 31,72 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-4} = 508,64 \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$$

**PROBLEMA 4. Potencial de contacto****Enunciado:**

Se ha diseñado un diodo con silicio cuya resistividad del lado P es de 5  $\Omega\text{cm}$  y la del lado N es de 4  $\Omega\text{cm}$ . Calcular el valor de la barrera de potencial  $V_{bi}$  conociendo los siguientes datos:

- $n_i \cong 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ .
- $kT/q \cong 25 \text{ mV}$ .
- $\mu_n = 1500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ .
- $\mu_p = 500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ .
- $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ .

**Solución analítica:**

La fórmula que debemos usar para determinar el valor de la barrera de potencial  $V_{bi}$  es la siguiente:

$$V_{bi} = \frac{k T}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

Los únicos datos que desconocemos son  $N_A$  y  $N_D$ , vamos a calcular entonces los valores de los portadores mayoritarios  $p_p$  y  $n_n$  ya que, como hemos dicho antes, sus valores son aproximados.

$$N_A \cong p_p = \frac{1}{q \rho_p \mu_p} = \frac{1 \text{ V} \cdot \text{s}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot 5 \Omega \text{cm} \cdot 500 \text{ cm}^2} = 2,5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_D \cong n_n = \frac{1}{q \rho_n \mu_n} = \frac{1 \text{ V} \cdot \text{s}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot 4 \Omega \text{cm} \cdot 1500 \text{ cm}^2} = 1,04 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

Por lo tanto, ya si podemos calcular la barrera de potencial  $V_{bi}$  que nos pide el problema:

$$V_{bi} = 25 \text{ mV} \ln \frac{2,5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \cdot 1,04 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}}{10^{20} \text{ cm}^{-6}} = 0,6 \text{ V}$$

## Nomenclatura

$\mu_n$ : Movilidad de electrones ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ).

$\mu_p$ : Movilidad de huecos ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ).

$n$ : Concentración de electrones ( $\text{cm}^{-3}$ ).

$p$ : Concentración de huecos ( $\text{cm}^{-3}$ ).

$n_i$ : Concentración intrínseca ( $\text{cm}^{-3}$ ).

$n_n$ : portadores mayoritarios Tipo N ( $\text{cm}^{-3}$ ).

$p_n$ : portadores minoritarios Tipo N ( $\text{cm}^{-3}$ ).

$n_p$ : portadores minoritarios Tipo P ( $\text{cm}^{-3}$ ).

$p_p$ : portadores mayoritarios Tipo P ( $\text{cm}^{-3}$ ).

$N_D$ : Impurezas añadidas en la zona Tipo N ( $\text{cm}^{-3}$ ).

$N_A$ : Impurezas añadidas en la zona Tipo P ( $\text{cm}^{-3}$ ).

$q$ : Carga (C).

$\sigma$ : Conductividad eléctrica ( $1/\Omega\text{cm}$ ).

$\rho$ : Resistividad ( $\Omega\text{cm}$ ).

$L$ : Longitud (m).

$S$ : Sección ( $\text{m}^2$ ).

$R$ : Resistencia ( $\Omega$ ).

$T$ : Temperatura (K).

$\frac{\partial n}{\partial x}$ : Gradiente de concentración ( $\text{cm}^{-3} \mu\text{m}^{-1}$ ).

$J_n$ : Corriente de difusión ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).

$V_{bi}$ : Barrera de potencial (V).

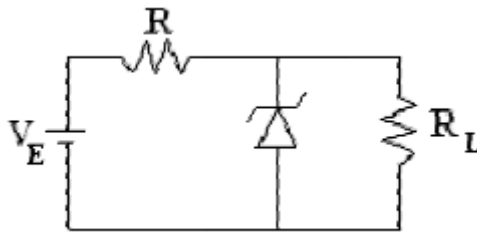
### 3.2. TEMA 2. DIODOS

#### PROBLEMA 5. Condición de estabilidad y seguridad

##### **Enunciado:**

En el circuito de la figura se usa un diodo Zener de 6,7 V con una potencia de 1,5 W a temperatura ambiente y una corriente mínima de  $I_{ZQ} = 20 \text{ mA}$  para asegurar un funcionamiento fuera de la tensión de codo.

- Determinar el valor de R, suponiendo  $V_E = 13,7 \text{ V}$  y la carga variable entre 30 y 200 mA.
- Si  $V_E$  varía entre 13,7 V y 20 V, con las mismas variaciones de carga, determinar R y  $P_{Zmax}$  que debe disipar el diodo, y por lo tanto, decir si el diodo de partida es el apropiado para este diseño.



##### **Solución analítica:**

Para determinar el valor de R se tiene que tener en cuenta la condición de estabilidad y para ello se tiene que cumplir la siguiente ecuación:

$$V_{e \min} = R(I_{Z \min} + I_{L \max}) + V_Z$$

$$R = \frac{V_{e \min} - V_Z}{(I_{Z \min} + I_{L \max})} = \frac{13,7 \text{ V} - 6,7 \text{ V}}{20 \text{ mA} + 200 \text{ mA}} = 31,81 \Omega$$

La resistencia es la misma que en el apartado anterior ya que los datos de este apartado no alteran el resultado y para determinar la  $P_{Zmax}$  que debe disipar el diodo, primero vamos a hallar primero la  $I_{Zmax}$  que soporta el diodo usando la condición de seguridad:

$$V_{e\ max} = R(I_{Z\ max} + I_{L\ min}) + V_Z$$

$$I_{Z\ max} = \frac{V_{e\ max} - V_Z}{R} - I_{L\ min} = \frac{20\ V - 6,7\ V}{31,81\ \Omega} - 30\ mA = 388,1\ mA$$

Ahora solo tenemos que multiplicarla por la tensión del zéner para obtener la  $P_{Z\ max}$  y así poder comprobar si este diodo es apropiado para el diseño:

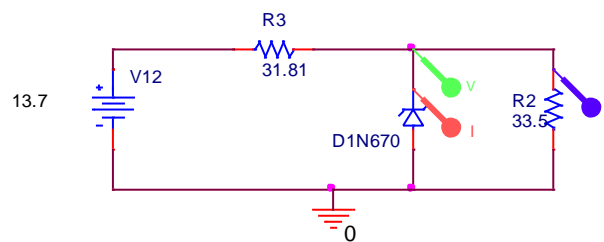
$$P_{Z\ max} = I_{Z\ max} V_Z = 388,1\ mA \cdot 6,7\ V = 2,6\ W$$

Como el resultado obtenido es mayor que la potencia nominal del diodo utilizado, podemos decir que éste no sería un diodo apropiado para dicho diseño.

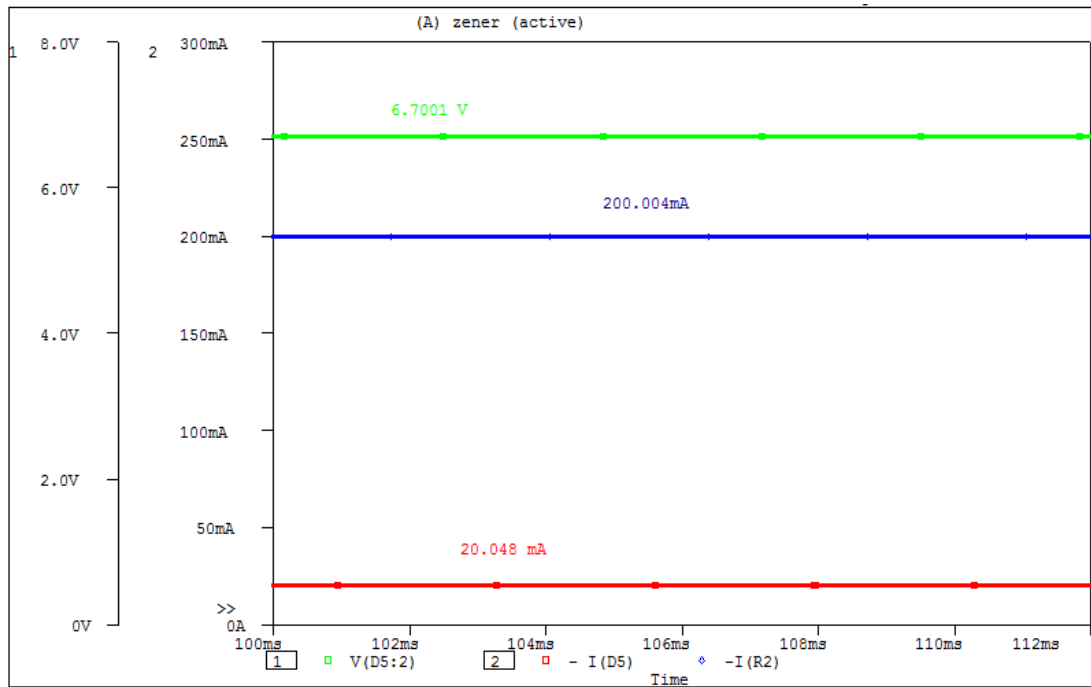
### **Simulación con Pspice:**

Vamos a calcular que tenemos que darle a  $R_L$  para que se cumplan las condiciones y comprobar que los resultados coinciden:

$$R_L = \frac{V_Z}{I_{L\ max}} = \frac{6,7\ V}{200\ mA} = 33,5\ \Omega$$



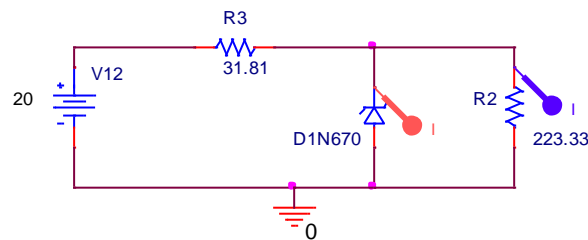


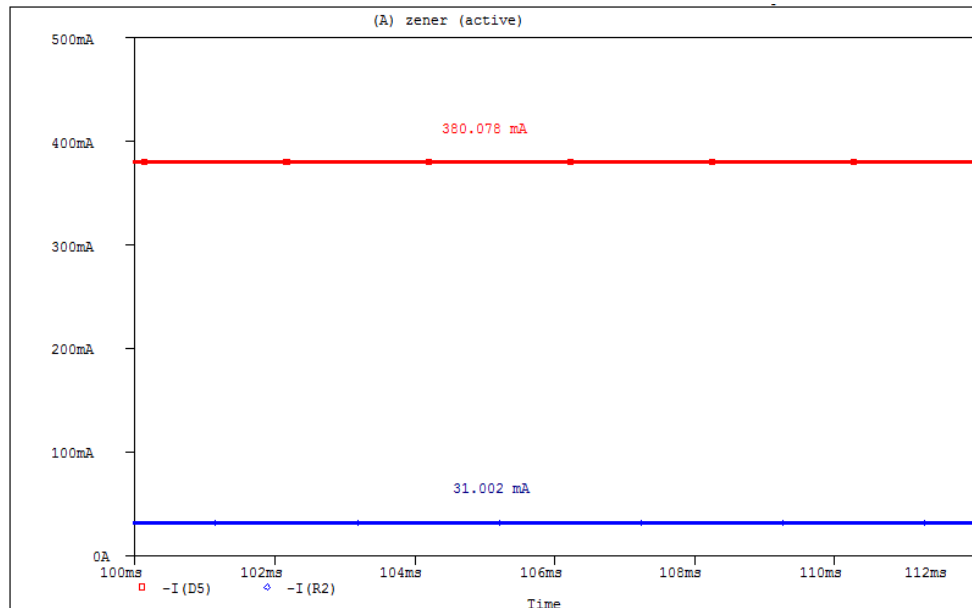


$$V_Z = 6,7001 V ; I_Z = 20,048 mA ; I_L = 200,004 mA$$

Para el siguiente apartado, vamos a volver a calcular  $R_L$  con las condiciones especificadas:

$$R_L = \frac{V_Z}{I_{L \min}} = \frac{6,7 V}{30 mA} = 223,33 \Omega$$





$$I_Z = 380,078 \text{ mA} ; I_L = 31,002 \text{ mA}$$

$$P_{Zmax} = I_{Zmax} V_Z = 380,078 \text{ mA} \cdot 6,7001 \text{ V} = 2,546 \text{ W}$$

### Comparación de resultados:

- Primer apartado:

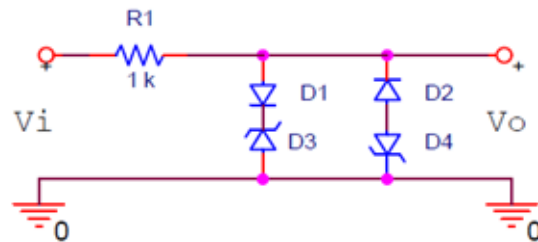
	Analítica	Simulada
$I_Z(\text{mA})$	20	20,048
$I_L(\text{mA})$	200	200,004
$V_Z(\text{V})$	6,7	6,7001

- Segundo apartado:

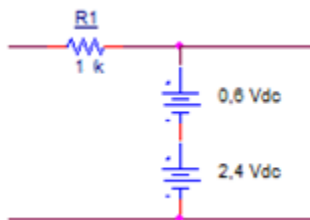
	Analítica	Simulada
$I_Z(\text{mA})$	388,1	380,078
$I_L(\text{mA})$	30	31,002
$P_Z(\text{W})$	2,6	2,546

**PROBLEMA 6. Diodo zener****Enunciado:**

Determina la señal que se obtiene a la salida, si se aplica a la entrada una señal triangular de 10 V de pico. Conociendo los valores de:  $V_V = 0,6 V$  para todos los diodos y  $V_z(D3) = 2,4 V$  y  $V_z(D4) = 2,9 V$ .

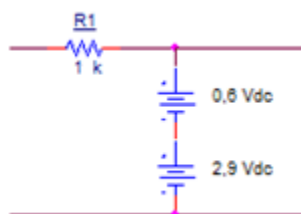
**Solución analítica:**

- En el semiciclo positivo tendríamos un circuito equivalente a este:



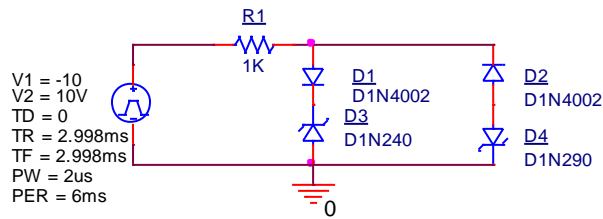
$$V_o = 2,4 V + 0,6 V = 3V$$

- Por tanto, en el semiciclo negativo tendríamos el siguiente circuito:

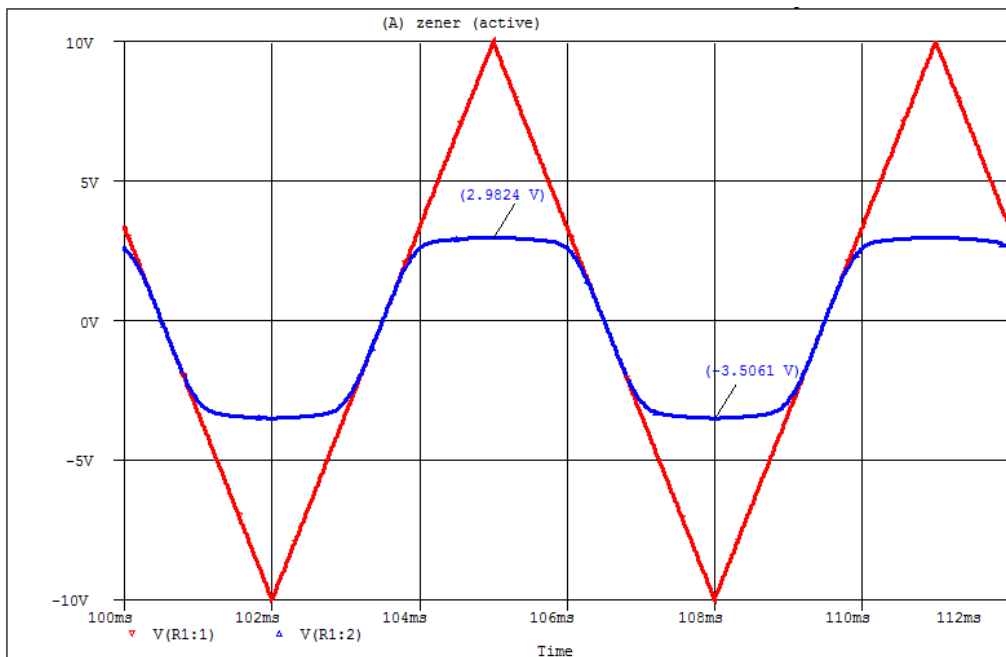


$$V_o = 2,9 V + 0,6 V = 3,5 V$$

**Simulación con Pspice:**



- Señal obtenida a la salida del circuito (azul) y señal de entrada (rojo):



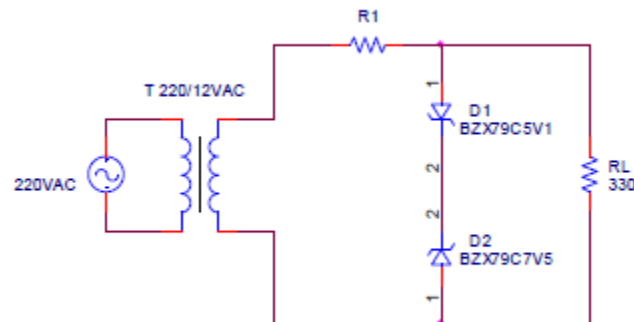
**Comparación de resultados:**

- Tensión de salida ( $V_o$ ):

Semiciclo	Analítica	Simulada
Positivo	3 V	2,98 V
Negativo	3,5 V	3,51 V

**PROBLEMA 7. Limitador Zener****Enunciado:**

Comprobar el funcionamiento de un limitador con diodos zener:



Obtener el valor de R1 sabiendo que  $R_L = 330\Omega$ ,  $V_V = 0,6V$  y la tensión del secundario del transformador es de 11 V de valor eficaz. Los diodos utilizados son los siguientes:

- BZX79C5V1:  $V_{Zmin} = 4,8V$  ;  $V_{Zmax} = 5,4V$  ;  $V_Z = 5,1V$ .
- BZX79C7V5:  $V_{Zmin} = 7V$  ;  $V_{Zmax} = 7,9V$  ;  $V_Z = 7,5V$ .

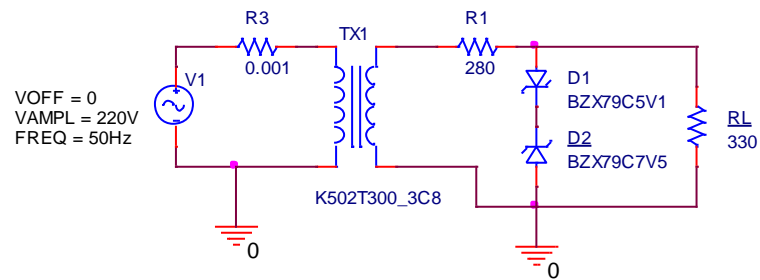
Obtener la señal de salida en la carga  $R_L$ , la señal en el secundario del transformador y señal de la tensión en cada uno de los diodos:

**Solución analítica:**

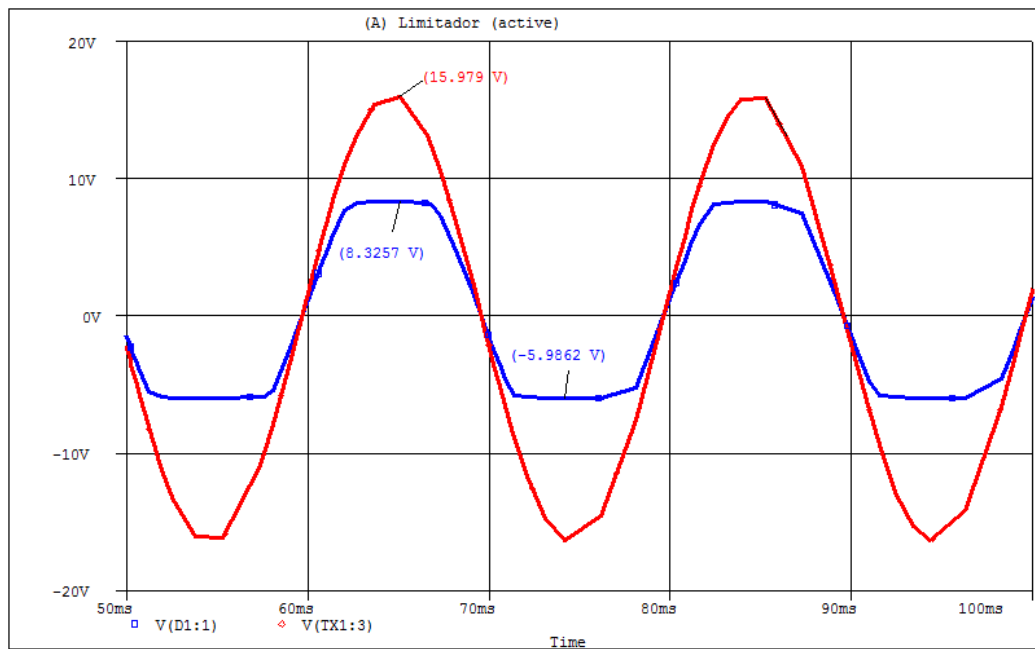
$$\text{Tensión máxima en la rama: } V_{Zmax_{total}} = 0,6V + 7,9V = 8,5V$$

$$I_{Lmax} = \frac{V_{Zmax_{total}}}{R_L} = \frac{8,5V}{330\Omega} = 25,7mA$$

$$R1 = \frac{V_{emin} - V_{Ztotal}}{I_{Zmin} + I_{Lmax}} = \frac{11\sqrt{2} - (7,5V + 0,6V)}{1mA + 25,7mA} = 279,26\Omega$$

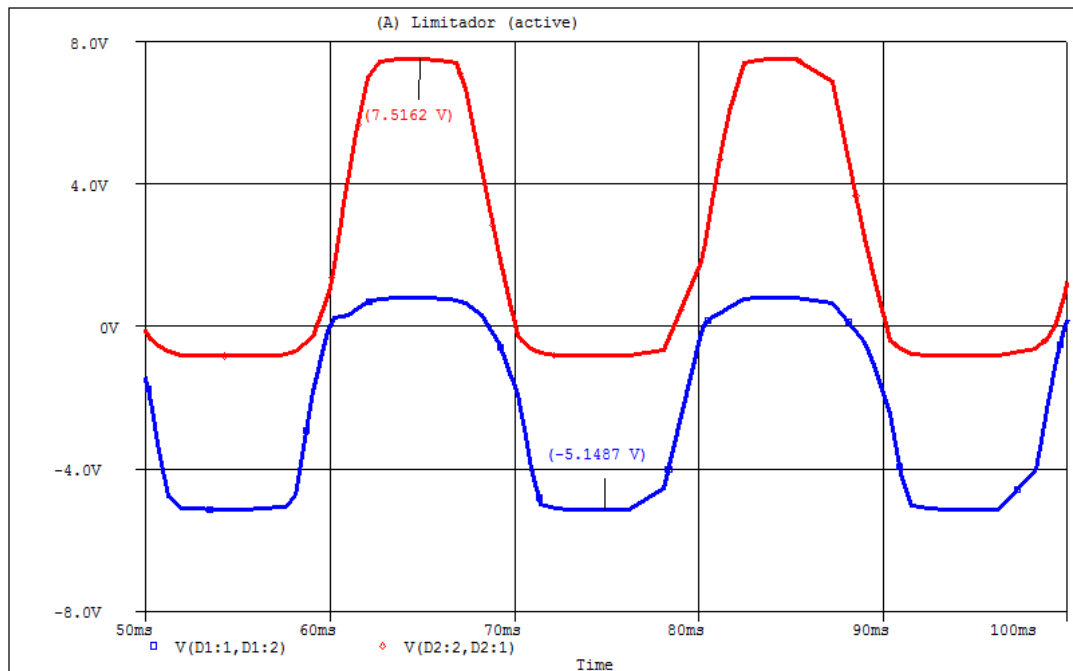
**Simulación con Pspice:**

- Señal de salida en la carga RL (azul) y señal en el secundario del transformador (rojo):



$$V_{ef} = \frac{V_P}{\sqrt{2}} = \frac{15,979 V}{\sqrt{2}} = 11,3 V$$

- Tensión en los diodos. BZX79C5V1(azul) y BZX79C7V5(rojo):



### Comparación de resultados:

- Tensión máxima en la carga:

Analítica	Simulada
8,5 V	8,33 V

- Tensión eficaz en el secundario del transformador:

Analítica	Simulada
11 V	11,3 V

- Tensión en los diodos:

Diodo	Analítica	Simulada
BZX79C7V5	7,5 V	7,52 V
BZX79C5V1	5,1 V	5,15 V

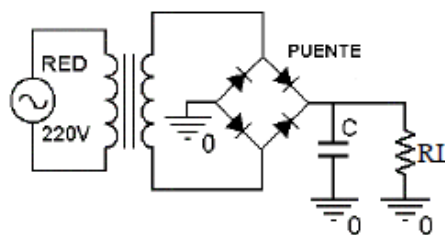
**PROBLEMA 8. Convertidor AC/DC****Enunciado:**

Diseñar el circuito de la figura para entregar a la carga una tensión continua de 12V, con un rizado  $V_r = 1V(pp)$  para una corriente de carga de 0,5 A. Suponer la descarga del condensador lineal y en un tiempo de 9,4 ms. Determinar:

- Capacidad del condensador.
- Tensión en el secundario del transformador.
- Potencia eficaz en el secundario del transformador.

**Solución analítica:**

El circuito adecuado para este problema debe constar de un transformador, un rectificador de onda completa y un condensador:



- Para calcular la capacidad del condensador aplicamos la siguiente relación, y como conocemos todas las demás incógnitas solo tenemos que despejar la capacidad:



$$C V_r = I_L t_d ;$$

$$C = \frac{I_L t_d}{V_r} = \frac{0,5A \cdot 9,4ms}{1V} = 4,7 \text{ mF}$$

- Tensión en el secundario del transformador:

Considerando que la tensión que cae en cada uno de los diodos es 0,7 V, nos queda que:

$$V_{\text{secundario}} = 2V_D + V_{RL} = 2 \cdot 0,7 V + 12 V = 13,4 V$$

- Potencia eficaz en el secundario del transformador:

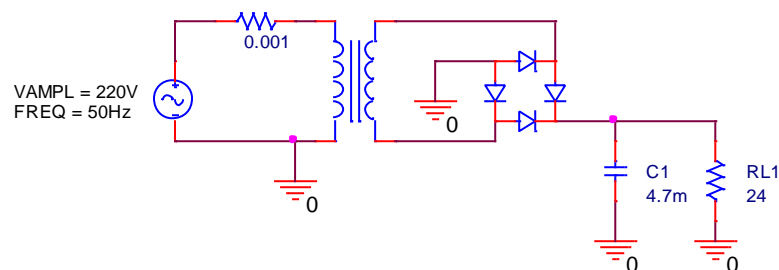
$$V_{ef} = \frac{13,4 V}{\sqrt{2}} = 9,47 V \cong 9,5 V ;$$

$$P_{ef} = V_{ef} I_L = 9,5 V \cdot 0,5 A = 4,75 W$$

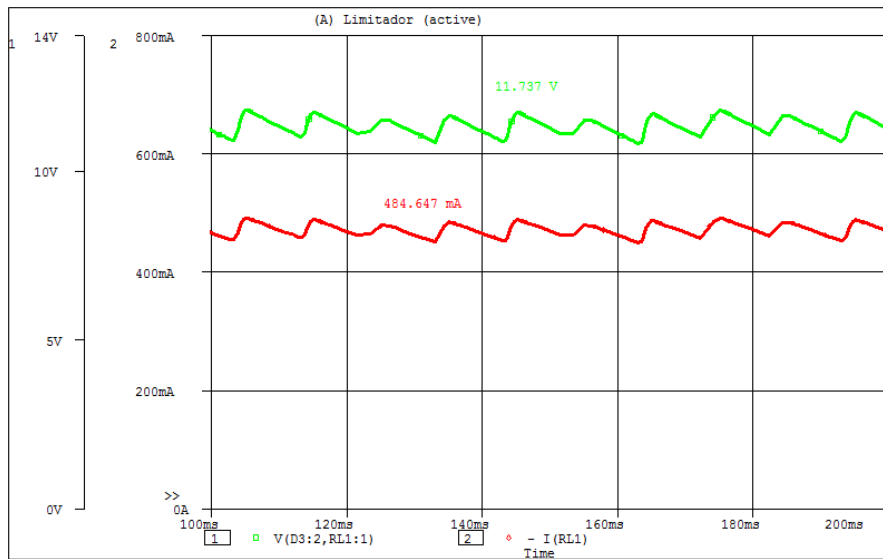
### Simulación con Pspice:

Vamos a calcular el valor de RL para poder hacer las simulaciones:

$$R_L = \frac{V_{RL}}{I_L} = \frac{12 V}{0,5 A} = 24 \Omega$$

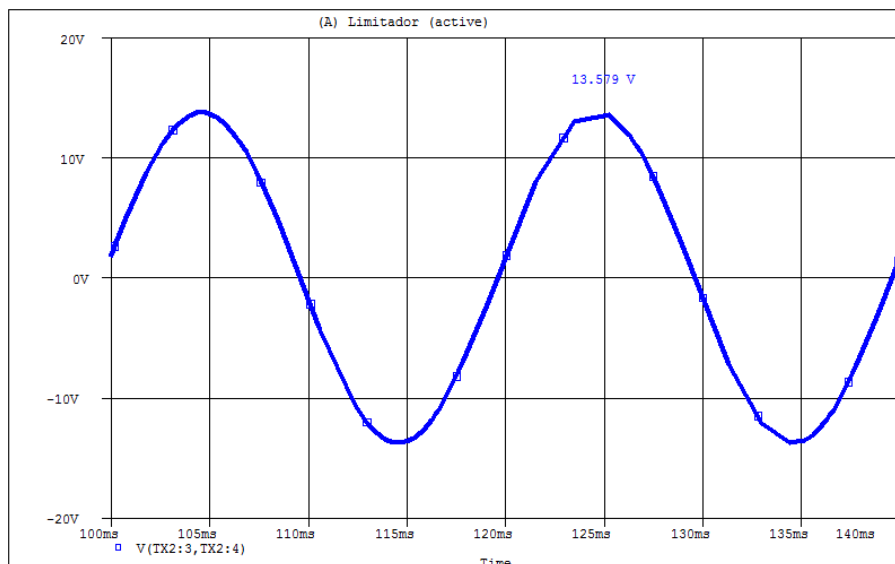


- Tensión en la carga (verde) e Intensidad en la carga (rojo):



$$V_{RL} = 11,737 V \quad I_L = 484,657 mA$$

- Tensión en el secundario del transformador:



$$V_{secundario} = 13,579 V$$

- Potencia eficaz en el secundario del transformador:

$$V_{ef} = \frac{13,579 V}{\sqrt{2}} = 9,6 V ;$$

$$P_{ef} = V_{ef} I_L = 9,6 V \cdot 484,657 mA = 4,65 W$$

### Comparación de resultados:

	Analítica	Simulada
$V_{RL} (V)$	12	11,737
$I_L (mA)$	500	484,647
$V_{Sec} (V)$	13,4	13,579
$P_{ef} (W)$	4,75	4,65

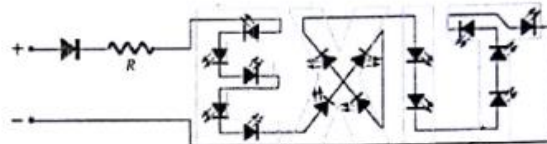
## PROBLEMA9. Diodo LED

### Enunciado:

En el circuito de la determinar el valor de R (Diodo rectificador de silicio).

Datos:

- Todos los LED son rojos.
- La tensión de alimentación es 120V.
- La intensidad que circula por el circuito es de 20 mA.



### Solución analítica:

Aplicando sumatoria de tensiones en la malla obtenemos la siguiente ecuación:

$$V_{Alimentación} = V_D + V_R + 15 V_{LED}$$

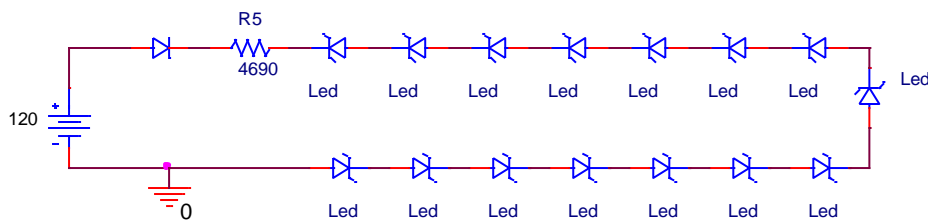
Sabiendo que la tensión de codo del LED rojo es 1,7 V:

$$V_R = 120 V - 15 \cdot 1,7 V - 0,7 = 93,8 V ;$$

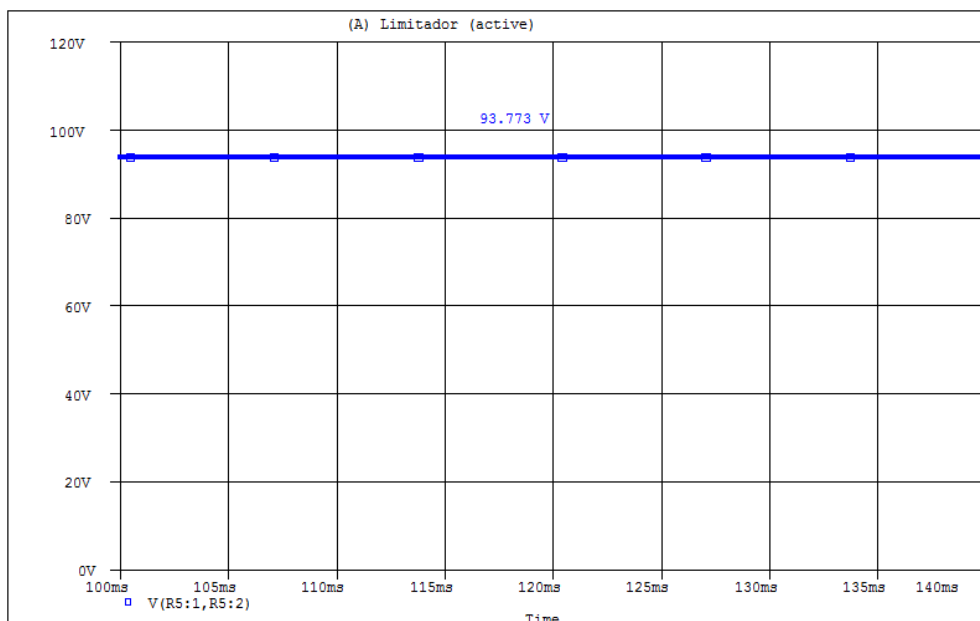
$$R = \frac{V_R}{I_R} = \frac{93,8 V}{20 mA} = 4690 \Omega$$

### Simulación con Pspice:

Para simular el diodo Led he cogido un diodo zéner y le he cambiado la tensión inversa que tenía por defecto por la tensión de codo del Led rojo (1,7 V).

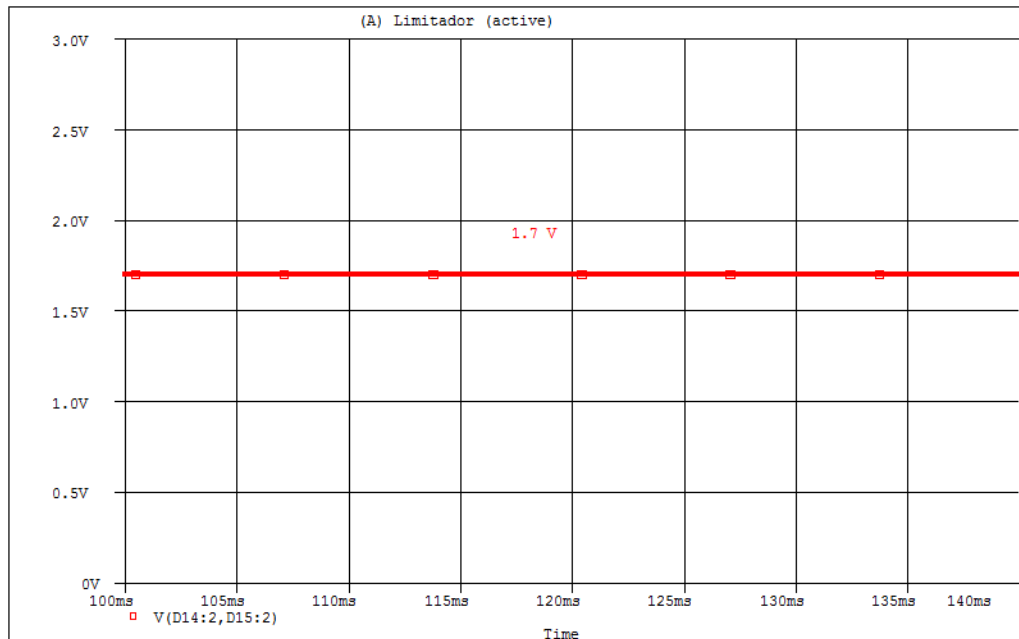


- Tensión en la resistencia:



$$V_R = 93,773 V$$

- Tensión en el diodo:



$$V_{LED} = 1,7 V$$

### Comparación de resultados:

	Analítica	Simulada
$V_R (V)$	93,8	93,773
$V_{LED} (V)$	1,7	1,7

## PROBLEMA 10. Diseño circuito LED

### Enunciado:

Se dispone de un conjunto de diodos LED en el salpicadero de un automóvil, todos alimentados a 12 V y consumiendo 20 mA, que realizan las siguientes funciones:

- Al arrancar el automóvil se encienden ocho LED verdes.
- Al conectar el aire acondicionado se encienden seis LED azules.
- Al llegar el depósito de gasolina a la reserva se enciende un LED amarillo.
- Al llegar a la mitad de la reserva un LED naranja.

- Al llegar al 10% de la reserva se enciende un LED rojo.

Diseñar un circuito que realice estas funciones. Cada función se activa con un interruptor en el circuito.

**Solución analítica:**

- Circuito 1. LED verde ( $V_d = 2,3 V$ )

Nº Ramas	1	2
LED serie	8	4
I Rama (mA)	20	20
$V_d$ rama (V)	18,4	9,2
V Resistencia (V)	-	2,8
Resistencia ( $\Omega$ )	-	140

- Con una rama:

$$V_d \text{ rama} = 8 \text{ LED} \cdot 2,3 V = 18,4 V$$

Como supera la tensión de alimentación tenemos que añadir otra rama.

- Con dos ramas:

$$V_d \text{ rama} = 4 \text{ LED} \cdot 2,3 V = 9,2 V$$

$$V_{\text{Resistencia}} = V_{\text{Alimentación}} - V_d \text{ rama} = 12V - 9,2V = 2,8 V$$

$$\text{Resistencia} = \frac{2,8 V}{20 \text{ mA}} = 140 \Omega$$

- Circuito 2. LED azul ( $V_d = 3,5 V$ )

Nº Ramas	1	2
LED serie	6	3
I Rama (mA)	20	20
$V_d$ rama (V)	21	10,5
V Resistencia (V)	-	1,5
Resistencia ( $\Omega$ )	-	75

- Con una rama:

$$V_d \text{ rama} = 6 \text{ LED} \cdot 3,5 \text{ V} = 21 \text{ V}$$

Como supera la tensión de alimentación tenemos que añadir otra rama.

- Con dos ramas:

$$V_d \text{ rama} = 3 \text{ LED} \cdot 3,5 \text{ V} = 10,5 \text{ V}$$

$$V_{Resistencia} = V_{Alimentación} - V_d \text{ rama} = 12 \text{ V} - 10,5 \text{ V} = 1,5 \text{ V}$$

$$Resistencia = \frac{1,5 \text{ V}}{20 \text{ mA}} = 75 \Omega$$

- Circuito 3. LED amarillo ( $V_d = 2\text{ V}$ )

Nº Ramas	1
LED serie	1
I Rama (mA)	20
Vd rama (V)	2
V Resistencia (V)	10
Resistencia ( $\Omega$ )	500

$$V_d \text{ rama} = 2\text{ V}$$

$$V_{Resistencia} = V_{Alimentación} - V_d \text{ rama} = 12\text{ V} - 2\text{ V} = 10\text{ V}$$

$$Resistencia = \frac{10\text{ V}}{20\text{ mA}} = 500\ \Omega$$

- Circuito 4. LED naranja ( $V_d = 1,8\text{ V}$ )

Nº Ramas	1
LED serie	1
I Rama (mA)	20
Vd rama (V)	1,8
V Resistencia (V)	10,2
Resistencia ( $\Omega$ )	510

$$V_d \text{ rama} = 1,8\text{ V}$$

$$V_{Resistencia} = V_{Alimentación} - V_d \text{ rama} = 12\text{ V} - 1,8\text{ V} = 10,2\text{ V}$$

$$Resistencia = \frac{10,2\text{ V}}{20\text{ mA}} = 510\ \Omega$$



- Circuito 5. LED rojo ( $V_d = 1,7 V$ )

Nº Ramas	1
LED serie	1
I Rama (mA)	20
$V_d$ rama (V)	1,7
V Resistencia (V)	10,3
Resistencia ( $\Omega$ )	515

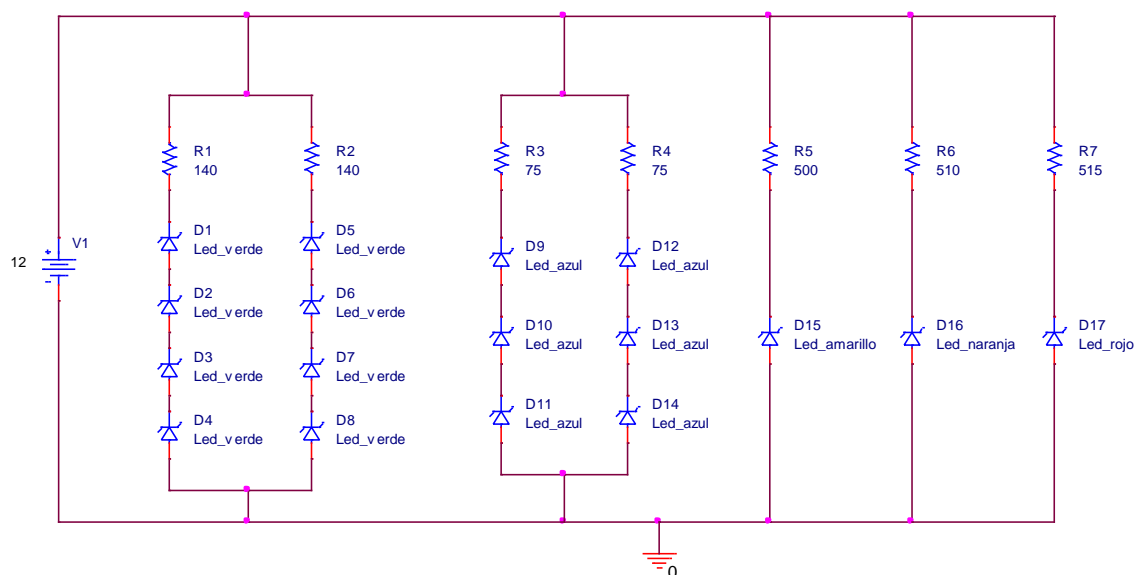
$$V_d \text{ rama} = 1,7 V$$

$$V_{Resistencia} = V_{Alimentación} - V_d \text{ rama} = 12 V - 1,7 V = 10,3 V$$

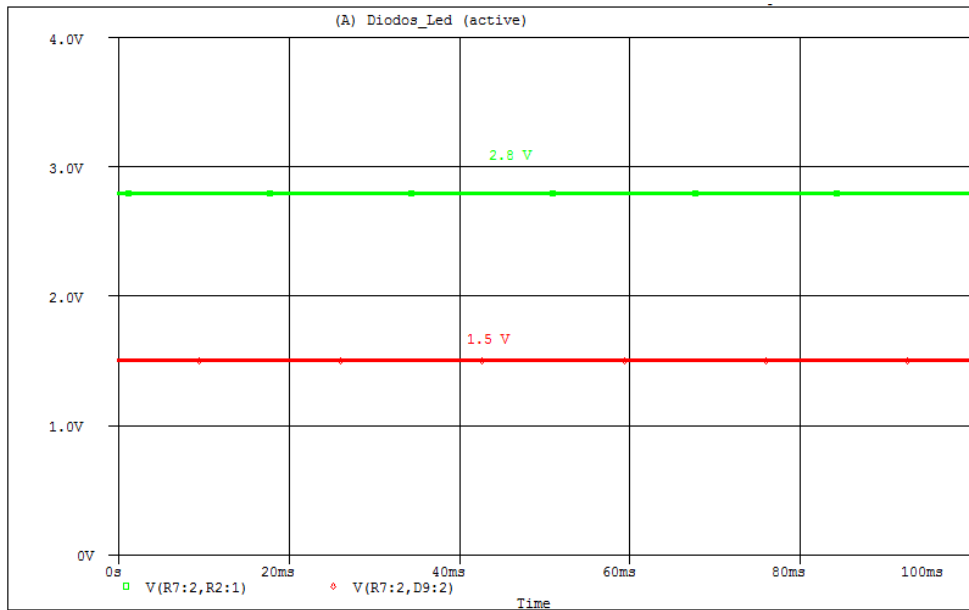
$$Resistencia = \frac{10,3 V}{20 mA} = 515 \Omega$$

### Simulación con Pspice:

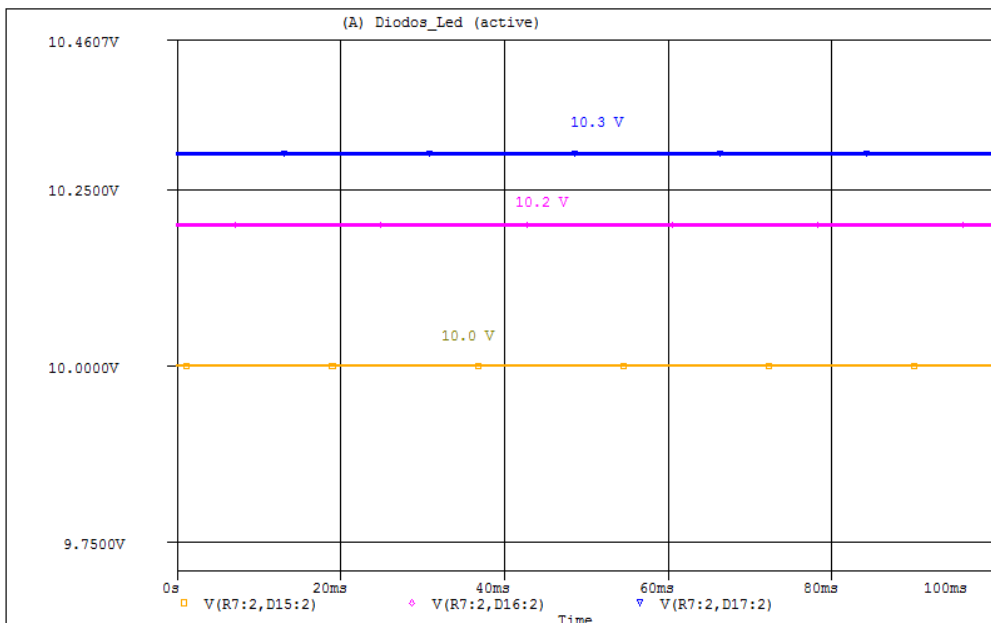
Para simular los diodos Led he hecho como en el ejercicio anterior. He cogido un diodo zéner y le he cambiado la tensión inversa que tenía por defecto por la tensión de codo del Led correspondiente. He hecho cinco modelos, uno por cada led de distinto color y tensión de codo.



- Tensión en la resistencia del circuito 1 (señal verde) y del circuito 2 (señal roja):



- Tensión en la resistencia del circuito 3 (señal amarilla), del circuito 4 (señal morada) y del circuito 5 (señal azul):



**Comparación de resultados:**

	<b>Analítica</b>	<b>Simulada</b>
$V_{R1}(V)$	2,8	2,8
$V_{R2}(V)$	1,5	1,5
$V_{R3}(V)$	10	10
$V_{R4}(V)$	10,2	10,2
$V_{R5}(V)$	10,3	10,3

**Nomenclatura**

$V_e$ : Tensión de alimentación (V).

$V_i$ : Tensión de entrada (V).

$V_o$ : Tensión de salida (V).

$V_z$ : Tensión inversa del zener (V).

$V_\gamma$ : Tensión de codo del diodo zener en directa (V).

$V_d$ : Tensión de codo del diodo rectificador (V).

$V_{LED}$ : Tensión de codo del diodo LED (V).

$V_r$ : Tensión de rizado (V).

$V_p$ : Tensión de pico (V).

$V_{ef}$ : Tensión eficaz (V).

$V_{RL}$ : Tensión en la carga (V).

$I_L$ : Intensidad en la carga (A).

$I_z$ : Intensidad del zener (A).

$R$ : Resistencia ( $\Omega$ ).

$R_L$ : Resistencia de carga ( $\Omega$ ).

$P_z$ : Potencia del zener (W).

$C$ : Capacidad del condensador (F).

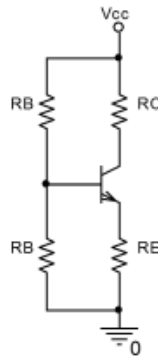
$t_d$ : Tiempo de descarga del condensador (s).

### 3.3. TEMA 3. TRANSISTORES. PUNTO DE POLARIZACION

#### PRBLEMA 11. Polarización transistor BJT tipo NPN

##### **Enunciado:**

En el circuito de la figura, calcular las resistencias para que el punto de trabajo del transistor (Punto Q) esté en el centro de la recta de carga sabiendo que:  $V_{CC} = 15\text{ V}$ ,  $V_{BE} = 0,7\text{ V}$  y  $\beta = 100$ .

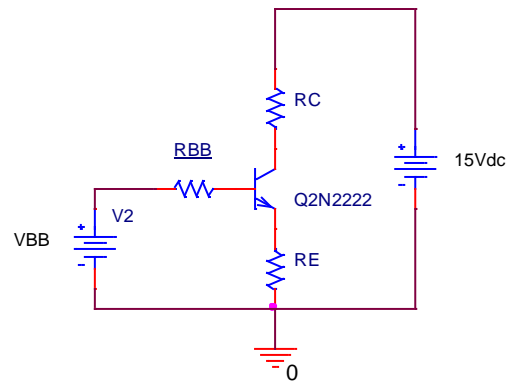


##### **Solución analítica:**

Como nos dice que el punto de trabajo del transistor esté en el centro de la recta de carga, entonces sabemos que el valor de  $V_{CE}$  va a ser la mitad de  $V_{CC}$ . De la intensidad no nos da ningún tipo de dato, entonces vamos a suponer un valor coherente para  $I_C$ :

$$V_{CEQ} = 7,5\text{ V} ; I_{CQ} = 10\text{ mA} ;$$

Como es polarización por divisor de tensión, podemos simplificar el circuito usando el método de Thevenin:



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

Fijamos el valor de  $R_{B1}$  y  $R_{B2}$ , y calculamos  $V_{BB}$  y  $R_{BB}$ :

$$R_{B1} = 4K; R_{B2} = 1K;$$

$$V_{BB} = \frac{1K}{4K + 1K} 15V = 3V; R_{BB} = \frac{1K \cdot 4K}{1K + 4K} = 800\Omega;$$

Obtenemos las siguientes ecuaciones del circuito ya simplificado:

Como  $I_B$  va a tener un valor muy pequeño, podemos considerar que

$$I_E \approx I_C:$$

$$I_C = \beta I_B;$$

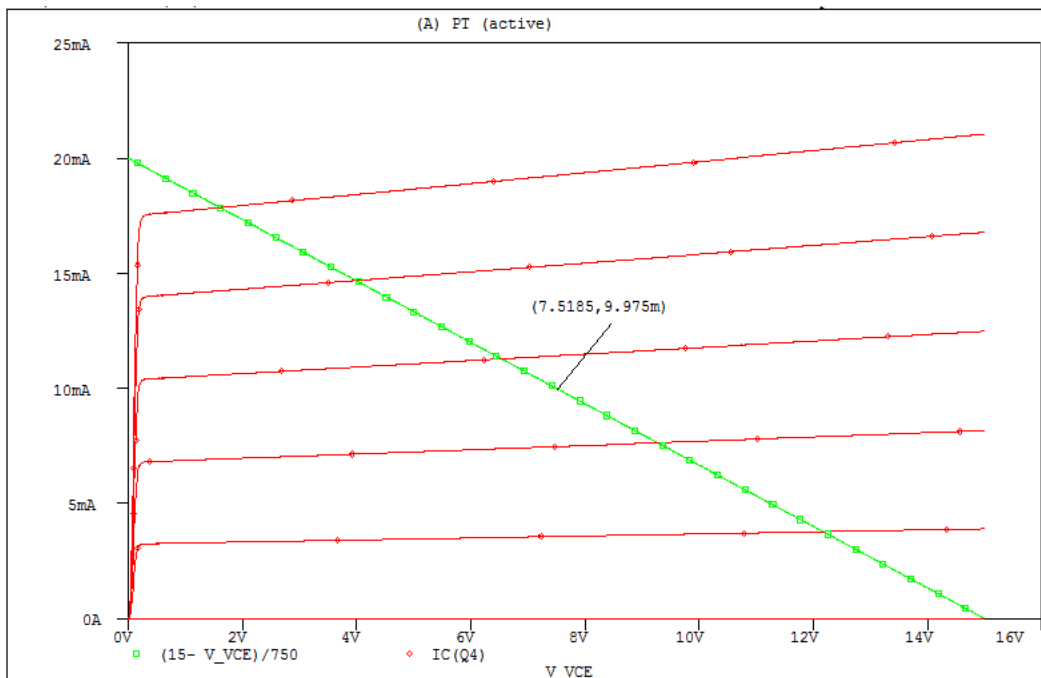
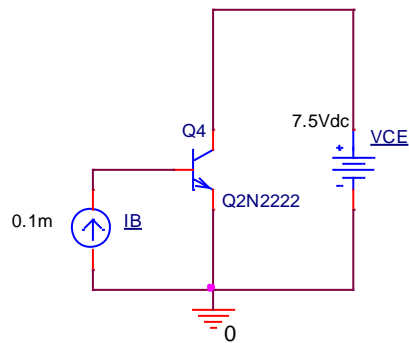
$$V_{BB} = R_{BB} I_B + V_{BE} + I_C R_E;$$

$$V_{CC} = I_C R_C + I_C R_E + V_{CE};$$

Despejando estas ecuaciones, obtenemos el valor de las otras resistencias:

$$R_E = 223\Omega; R_C = 527\Omega$$

**Simulación con Pspice:**

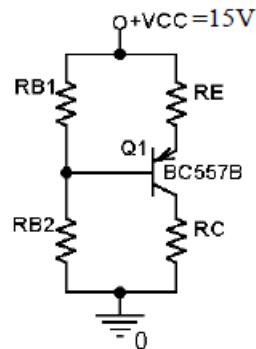


**Comparación de resultados:**

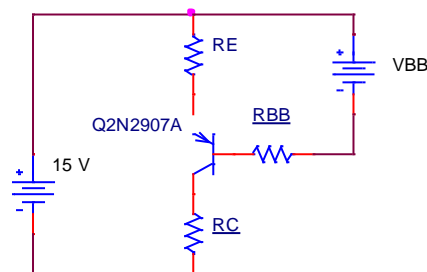
	Analítica	Simulada
$I_{CQ}$ (mA)	10	9,975
$V_{CEQ}$ (V)	7,5	7,5185

**PROBLEMA 12. Polarización transistor BJT tipo PNP****Enunciado:**

Calcular los valores de las resistencias del circuito de la figura para hacer trabajar un transistor bipolar en un punto de polarización (Q):  $V_{ce} = 7,5 \text{ V}$  y  $I_c = 10 \text{ mA}$ ,  $\beta = 200$ .

**Solución analítica:**

Simplificamos el circuito usando el método de Thevenin:



$$V_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC}; \quad R_{BB} = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

Obtenemos las siguientes ecuaciones del circuito ya simplificado:

$$I_c = \beta \cdot I_B \rightarrow I_B = \frac{10 \text{ mA}}{200} = 50 \mu\text{A};$$

$$I_E = I_B + I_C; \quad I_E \approx I_C$$

$$V_{CC} = I_C R_E + I_C R_C + V_{CE}$$

$$V_{BB} = I_B R_{BB} + V_{EB} + I_C R_E$$

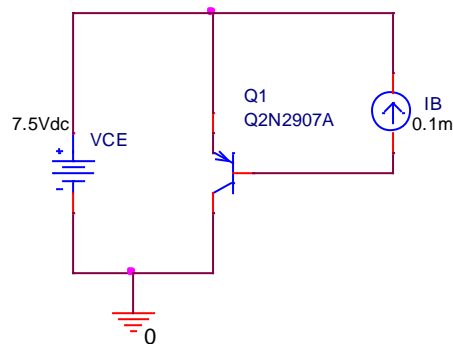
Como nos quedan 2 ecuaciones y cuatro incógnitas, vamos a establecer unas condiciones de diseño. Fijamos el valor de  $V_{BB}$  y de una de las resistencias, por ejemplo  $R_E$  y obtenemos el valor de  $R_C$  y  $R_{BB}$  de las ecuaciones anteriores:

$$R_E = 120\Omega \quad R_C = 630\Omega \quad R_{BB} = 22\text{K}\Omega$$

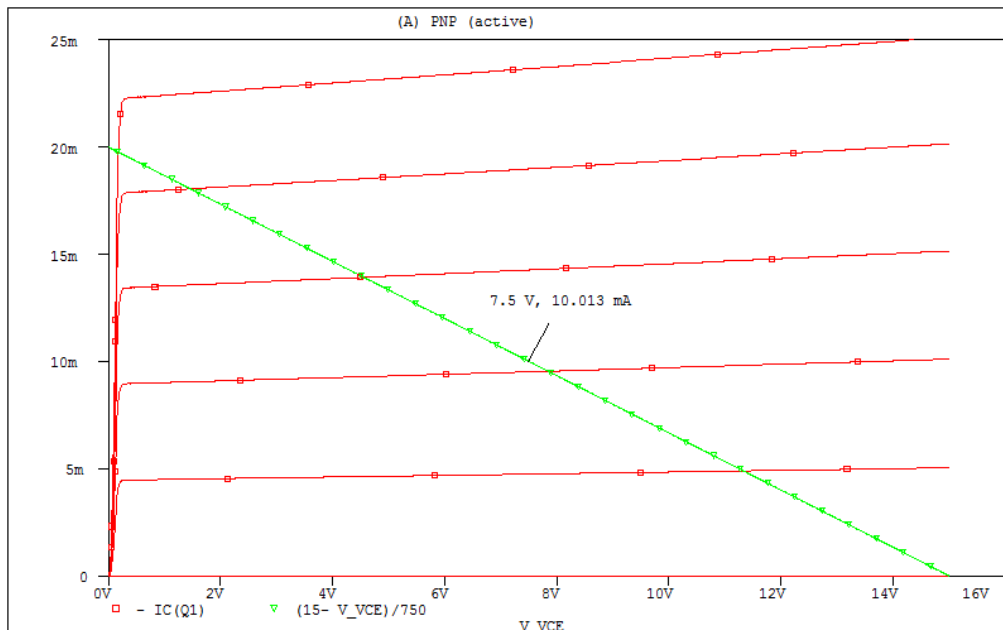
Conocido  $R_{BB}$  y  $V_{BB}$ , obtenemos el valor de  $R_{B1}$  y  $R_{B2}$ :

$$R_{B1} = 27,5\text{K}\Omega ; R_{B2} = 110\text{k}\Omega$$

### **Simulación con Pspice:**







$$V_{CE} = 7,5 V \quad I_C = 10,013 mA$$

### Comparación de resultados:

	Analítica	Simulada
$I_{CQ} (mA)$	10	10,013
$V_{CEQ} (V)$	7,5	7,5

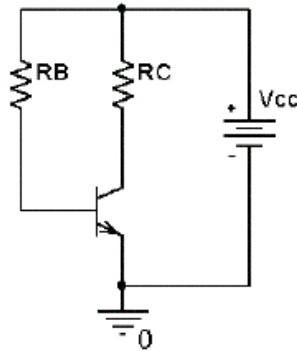
### PROBLEMA 13. Circuito de polarización fija

#### Enunciado:

Para el circuito de polarización fija, conocido el transistor a utilizar con  $\beta = 270$  y  $V_{BE} = 0,7 V$ , el punto de polarización  $I_C = 20 mA$  y  $V_{CE} = 6 V$ , determinar  $R_B$  y  $R_C$ , así como  $V_{CC}$  para que el punto Q esté en el centro de la recta de carga (máxima excursión simétrica).

**Solución analítica:**

El circuito de polarización fija es el siguiente:



Vamos a obtener las ecuaciones del circuito usando el método de las mallas:

$$V_{CC} = R_B I_B + V_{BE};$$

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE};$$

La tercera ecuación la vamos a obtener relacionando  $I_B$  e  $I_C$  mediante la  $\beta$  del transistor:

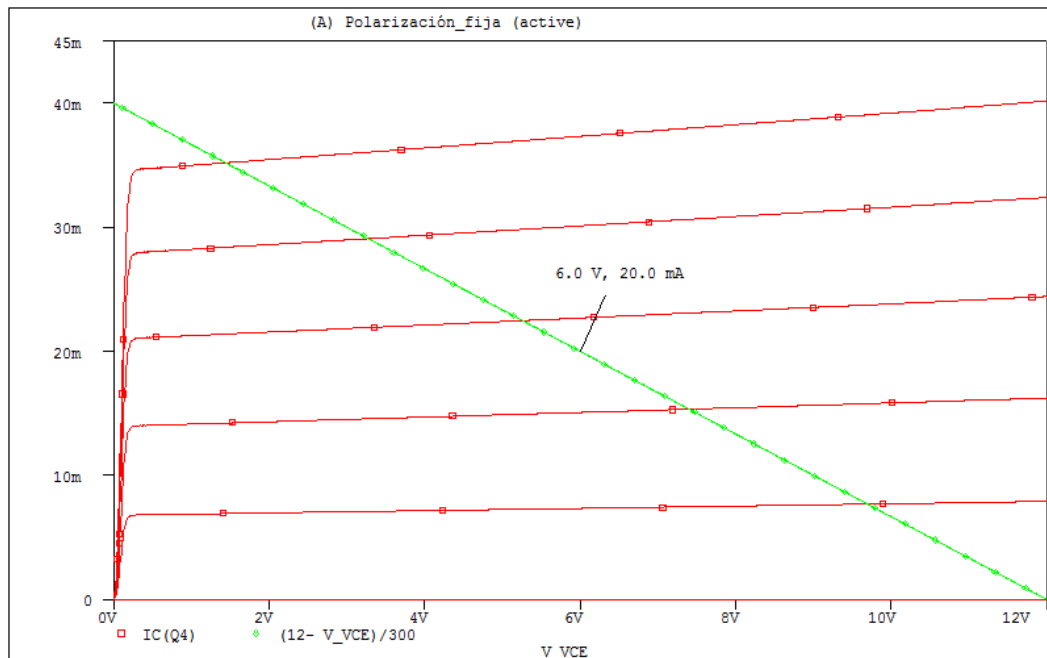
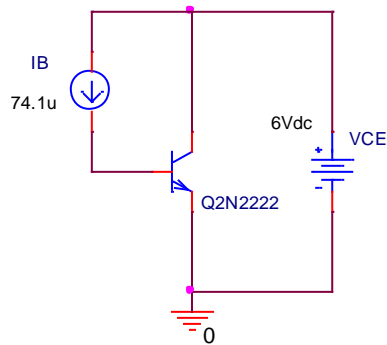
$$I_C = \beta \cdot I_B$$

Así nos queda un sistema de tres ecuaciones con cuatro incógnitas, pero nos dicen que el punto de polarización tiene que estar en el centro de la recta de carga y para que esto ocurra la tensión de alimentación tiene que ser el doble que  $V_{CE}$ , por tanto  $V_{CC} = 12 V$ . Sabiendo esto, ya si podemos calcular las resistencias:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{I_C} = \frac{12 V - 6 V}{20 mA} = 300 \Omega$$

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} = \frac{12 V - 0,7 V}{20 mA / 270} = 152,55 K \Omega$$

**Simulación con Pspice:**



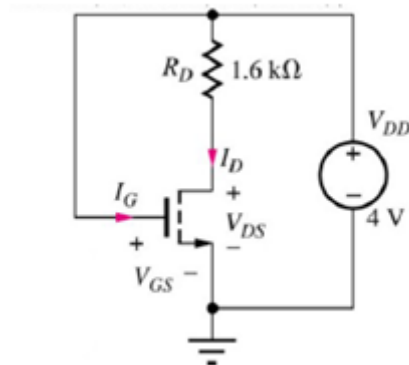
$$V_{CE} = 6 \text{ V} \quad I_C = 20 \text{ mA}$$

**Comparación de resultados:**

	Analítica	Simulada
$I_{CQ} \text{ (mA)}$	20	20
$V_{CEQ} \text{ (V)}$	6	6

**PROBLEMA 14. Polarización transistor FET tipo N****Enunciado:**

Encontrar el punto de polarización del siguiente circuito sabiendo que el valor de la alimentación  $V_{DD} = 4V$  y las características del transistor son  $K_N = 350 \mu A/V^2$  y  $V_{TN} = 1V$ .

**Solución analítica:**

Obtenemos las siguientes ecuaciones del circuito por el método de las mallas:

$$V_{DD} = I_D \cdot R_D + V_{DS}$$

$$V_{DD} = V_{GS}$$

En los transistores tipo FET, la intensidad de puerta es cero ( $I_G = 0$ ), por tanto la intensidad del drenador es igual a la del surtidor ( $I_S = I_D$ ) y se puede plantear de dos maneras:

$$I_D = \frac{K_N}{2} (V_{GS} - V_{TN})^2 ; \text{ si } V_{DS} > V_{GS} - V_{TN}$$

$$I_D = K_N \left( V_{GS} - V_{TN} - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} ; \text{ si } V_{DS} < V_{GS} - V_{TN}$$

Como sabemos el valor de  $V_{GS}$ , vamos a sustituirlo en la primera ecuación para calcular  $I_D$ :

$$I_D = \frac{350 \mu A/V^2}{2} (4V - 1V)^2 = 1,575 mA$$

Despejamos este valor en las ecuaciones obtenidas del circuito y obtenemos el valor de  $V_{DS}$ :

$$V_{DS} = 4V - 1,575 mA \cdot 1,6 K\Omega = 1,48 V$$

Vemos que no se cumple que  $V_{DS} > V_{GS} - V_{TN}$  por tanto vamos a resolver el sistema usando la segunda ecuación planteada de la intensidad de drenador  $I_D$ :

$$V_{DD} = K_N \left( V_{GS} - V_{TN} - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} \cdot R_D + V_{DS}$$

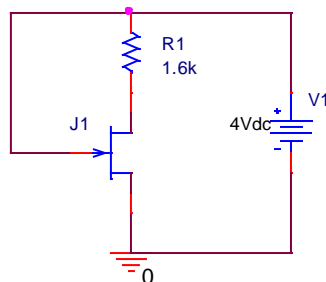
Conocemos todos los datos de la ecuación excepto  $V_{DS}$ , operando obtenemos su valor:

$$V_{DS} = 1,85 V$$

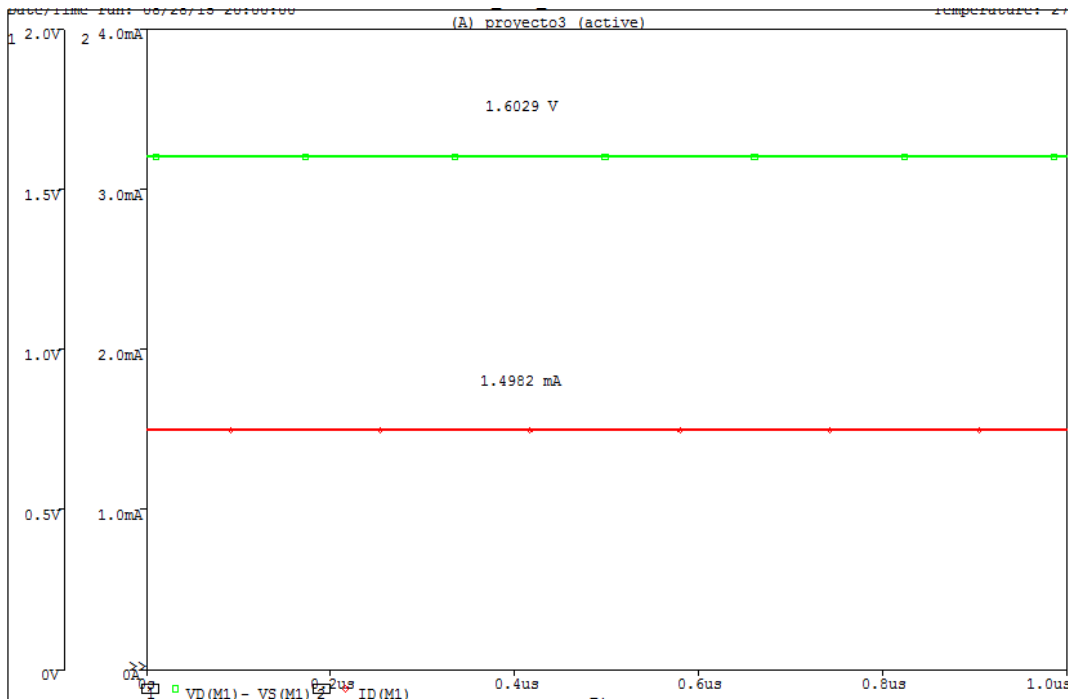
En este caso si se cumple la condición especificada  $V_{DS} < V_{GS} - V_{TN}$ , por tanto el resultado es válido, ahora solo queda calcular  $I_D$  sustituyendo este valor en la segunda ecuación planteada y ya obtendríamos el punto de polarización del circuito:

$$I_D = 350 \mu A/V^2 \left( 4V - 1V - \frac{2,3V}{2} \right) 2,3V = 1,49 mA$$

### **Simulación con Pspice:**



- Punto de polarización:



$$V_{DS} = 1.6029 \text{ V} \quad I_D = 1.4982 \text{ mA}$$

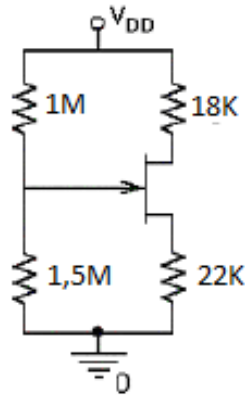
### Comparación de resultados:

	Analítica	Simulada
$I_D$ (mA)	1,49	1,4982
$V_{DS}$ (V)	1,85	1,6029

### PROBLEMA 15. Polarización transistor FET por divisor de tensión

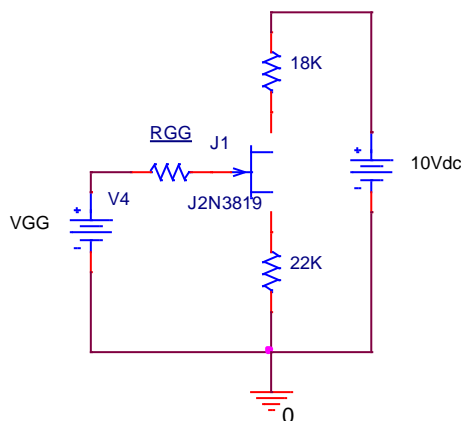
#### Enunciado:

Determinar el punto de polarización del siguiente circuito sabiendo que el valor de la alimentación  $V_{DD} = 10 \text{ V}$  y las características del transistor son  $K_N = 25 \mu\text{A}/\text{V}^2$  y  $V_{TN} = 1\text{V}$ .



### Solución analítica:

Simplificamos el circuito usando el método de Thevenin, al igual que en los ejercicios anteriores:



$$V_{GG} = \frac{1,5M}{1M + 1,5M} \cdot 10V = 6V; R_{BB} = \frac{1M \cdot 1,5M}{1M + 1,5M} = 600K;$$

Obtenemos las siguientes ecuaciones del circuito ya simplificado:

$$V_{DD} = 18K I_D + 22K I_D + V_{DS}$$

$$V_{GG} = 600K I_G + V_{GS} + 22K I_D$$

Como ya sabemos, en los transistores FET la intensidad del drenador se puede plantear de dos maneras distintas según se cumplan las siguientes condiciones:

$$I_D = \frac{K_N}{2} (V_{GS} - V_{TN})^2 ; \text{ si } V_{DS} > V_{GS} - V_{TN}$$

$$I_D = K_N \left( V_{GS} - V_{TN} - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} ; \text{ si } V_{DS} < V_{GS} - V_{TN}$$

Como no sabemos el valor de  $V_{DS}$  ni de  $V_{GS}$ , vamos a probar sustituyendo una de las ecuaciones anteriores en las ecuaciones que hemos obtenido del circuito, por ejemplo la primera, y si los resultados no cumplen las condiciones pues entonces habría que volver a hacerlo con la otra:

$$10 \text{ V} = (18\text{K} + 22\text{K}) \frac{25 \mu\text{A}/\text{V}^2}{2} (V_{GS} - 1\text{V})^2 + V_{DS}$$

$$6 \text{ V} = V_{GS} + 22\text{K} \frac{25 \mu\text{A}/\text{V}^2}{2} (V_{GS} - 1\text{V})^2$$

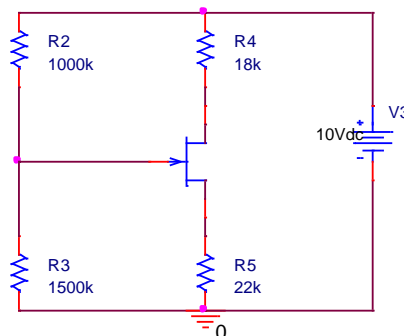
Resolviendo el sistema obtenemos los valores de  $V_{DS}$  y de  $V_{GS}$  y comprobamos si se cumplen las condiciones:

$$V_{GS} = 3,82 \text{ V} ; V_{DS} = 6 \text{ V}$$

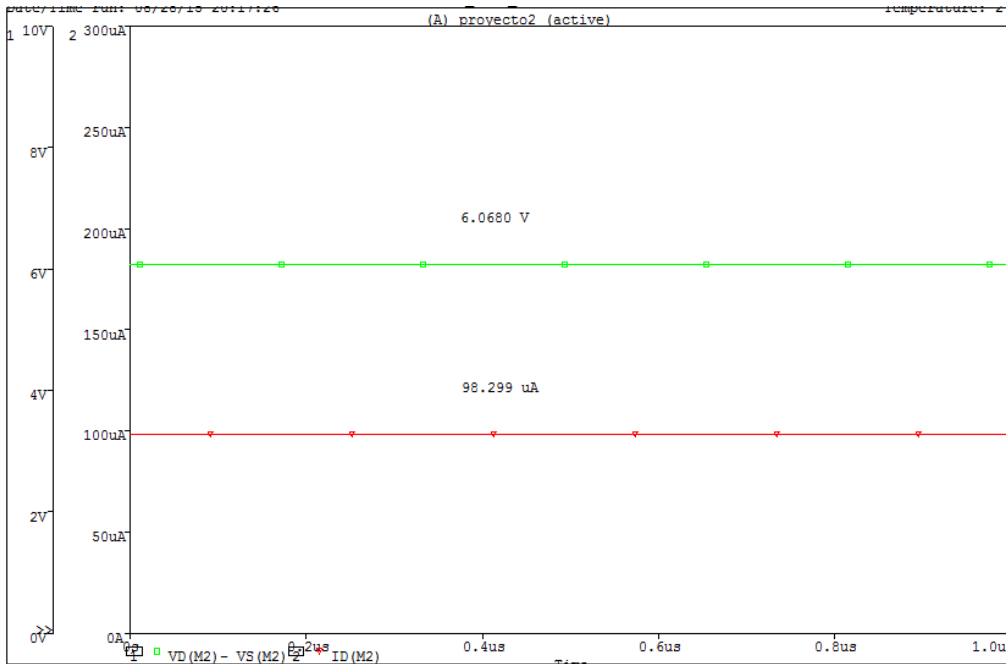
Como se cumple que  $V_{DS} > V_{GS} - V_{TN}$ , entonces sabemos que los resultados son válidos y lo único que nos queda es calcular  $I_D$  para saber el punto de polarización:

$$I_D = \frac{25 \mu\text{A}/\text{V}^2}{2} (3,82\text{V} - 1\text{V})^2 = 99,4 \mu\text{A}$$

### **Simulación con Pspice:**







$$V_{DS} = 6,068 \text{ V} \quad I_D = 98,299 \text{ } \mu\text{A}$$

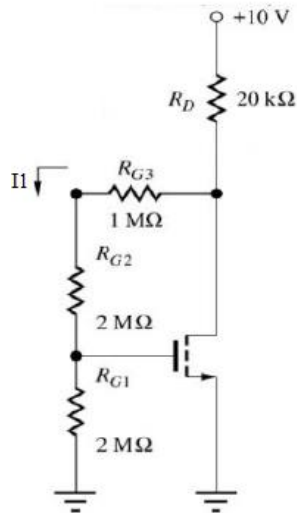
**Comparación de resultados:**

	<b>Analítica</b>	<b>Simulada</b>
$I_D$ ( $\mu\text{A}$ )	99,4	98,299
$V_{DS}$ (V)	6	6,068

**PROBLEMA 16. Polarización transistor FET por resistencia de drenador**

**Enunciado:**

Encontrar el punto de polarización del siguiente circuito sabiendo que  $V_{TN} = 1\text{V}$  y  $K_N = 500 \text{ } \mu\text{A}/\text{V}^2$ .



### Solución analítica:

Planteamos las ecuaciones por el método de las mallas:

$$V_{DS} = I_1(R_{G2} + R_{G3}) + V_{GS}$$

$$V_{DD} = I_D R_D + V_{DS}$$

$$V_{GS} = I_1 R_{G1}$$

Ahora vamos a plantear las ecuaciones de las intensidades del circuito:

$$I_1 = \frac{V_{DS}}{R_{G1} + R_{G2} + R_{G3}}$$

$$I_D = \frac{K_N}{2} (V_{GS} - V_{TN})^2; \text{ si } V_{DS} > V_{GS} - V_{TN}$$

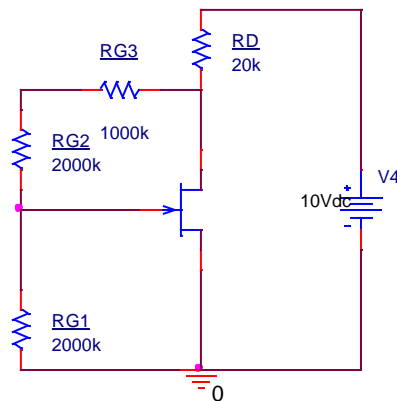
Si sustituimos  $I_1$  e  $I_D$  en las ecuaciones deducidas por el método de las mallas, obtenemos el valor de  $V_{DS}$  y  $V_{GS}$ :

$$V_{DS} = 5 \text{ V}; \quad V_{GS} = 2 \text{ V};$$

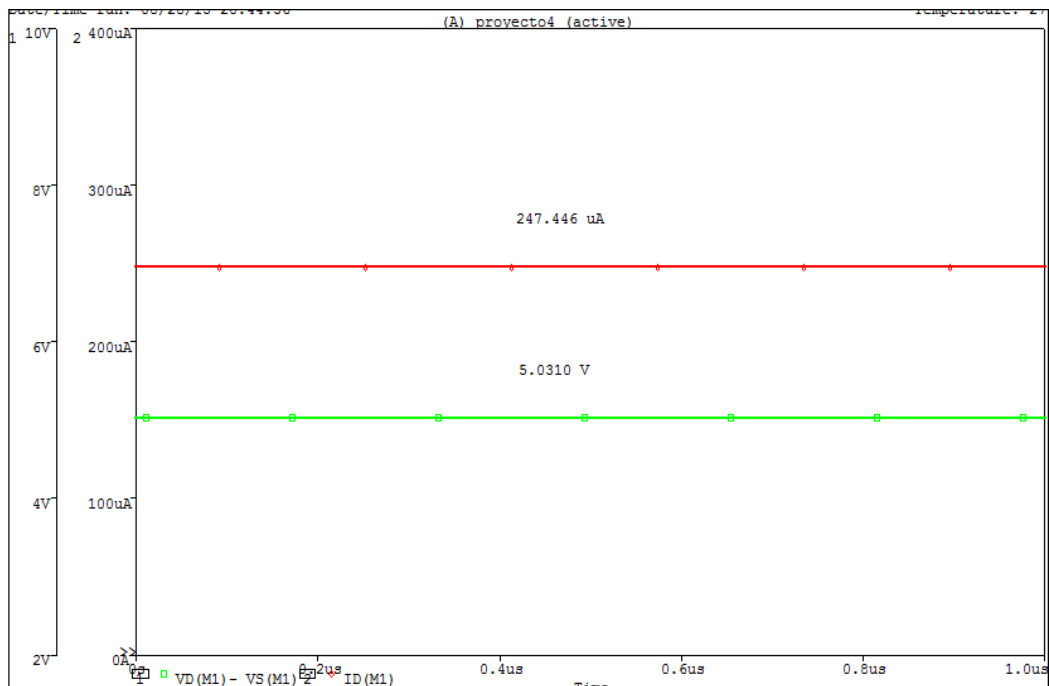
Como  $V_{DS} > V_{GS} - V_{TN}$  entonces sabemos que ecuación tenemos que utilizar para calcular  $I_D$ :

$$I_D = \frac{K_N}{2} (V_{GS} - V_{TN})^2 = \frac{500 \mu A/V^2}{2} (2 V - 1 V)^2 = 250 \mu A$$

### Simulación con Pspice:



- Punto de polarización:



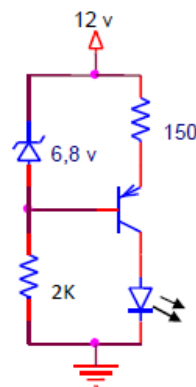
$$V_{DS} = 5,031 V \quad I_D = 247,446 \mu A$$

**Comparación de resultados:**

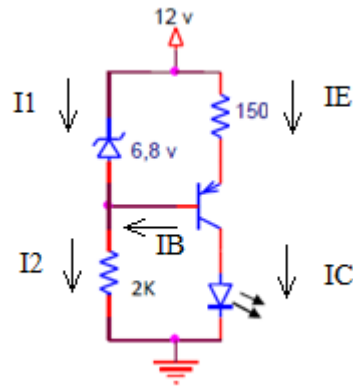
	<b>Analítica</b>	<b>Simulada</b>
$I_D$ ( $\mu A$ )	247,446	250
$V_{DS}$ (V)	5	5,031

**PROBLEMA 17. Transistor PNP con diodos****Enunciado:**

En el circuito de la figura, calcular la corriente por el diodo LED rojo y por el Zener, así como el punto de polarización del transistor. Con  $V_{EB} = 0,7 V$ ,  $\beta = 100$ ,  $V_{LED} = 1,7 V$ .

**Solución analítica:**

Para analizar el circuito vamos a señalar todas las intensidades que circulan por él:



Ahora vamos a plantear las ecuaciones obtenidas del circuito por el método de las mallas:

$$V_{CC} = R_E I_E + V_{EC} + V_{LED};$$

$$V_{CC} = V_Z + R_{B2} I_2 ;$$

$$V_Z = R_E I_E + V_{EB};$$

Y ahora planteamos las ecuaciones obtenidas del circuito por el método de los nudos:

$$I_E = I_B + I_C;$$

$$I_2 = I_B + I_1;$$

También vamos a plantear la ecuación que relaciona  $I_B$  e  $I_C$  mediante la  $\beta$  del transistor:

$$I_C = \beta \cdot I_B;$$

Una vez planteadas todas las ecuaciones, ahora vamos a resolver:

$$I_2 = \frac{V_{CC} - V_Z}{R_{B2}} = \frac{12\text{ V} - 6,8\text{ V}}{2\text{ K}\Omega} = 2,6\text{ mA}$$

$$I_E = \frac{V_Z - V_{EB}}{R_E} = \frac{6,8\text{ V} - 0,7\text{ V}}{150\ \Omega} = 40,6\text{ mA}$$

Como  $I_B$  va a tener un valor muy pequeño podemos decir que  $I_E \simeq I_C$ , por tanto:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{40,6 \text{ mA}}{100} = 406 \mu\text{A}$$

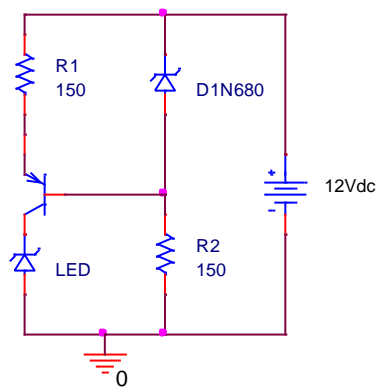
$$I_1 = I_2 - I_B = 2,6 \text{ mA} - 406 \mu\text{A} = 2,19 \text{ mA}$$

Y por último para saber el punto de polarización del transistor nos queda conocer  $V_{EC}$ :

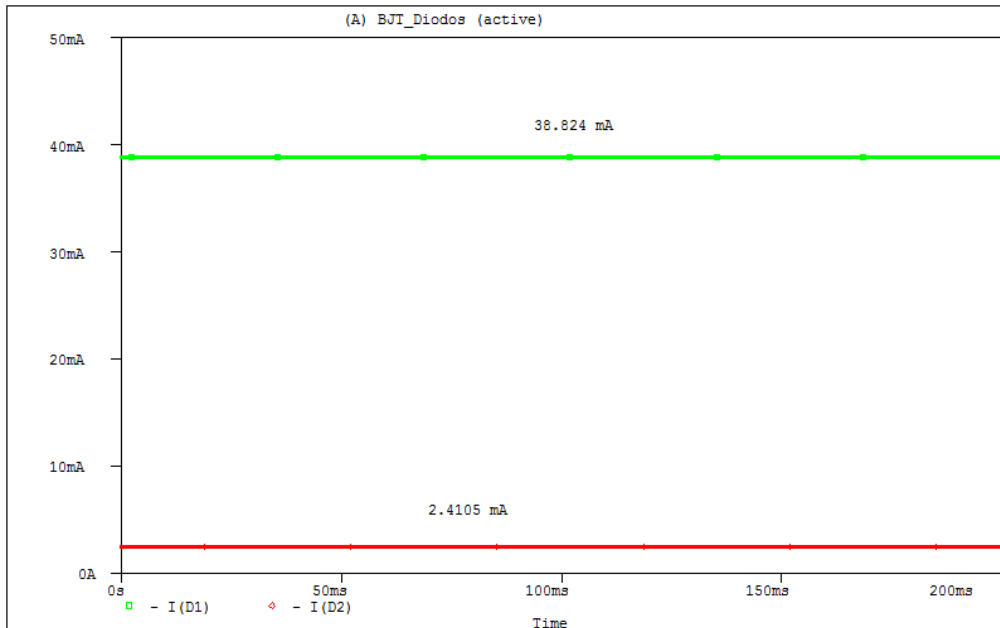
$$V_{EC} = V_{CC} - R_E I_E - V_{LED} = 12 \text{ V} - 150\Omega \cdot 40,6 \text{ mA} - 1,7 \text{ V} = 4,21 \text{ V}$$

Por tanto la intensidad que pasa por el diodo zéner es  $I_1$ , es decir  $2,19 \text{ mA}$  y la intensidad que pasa por el diodo LED es la intensidad de colector  $I_C$ , por tanto es  $40,6 \text{ mA}$ .

### **Simulación con Pspice:**

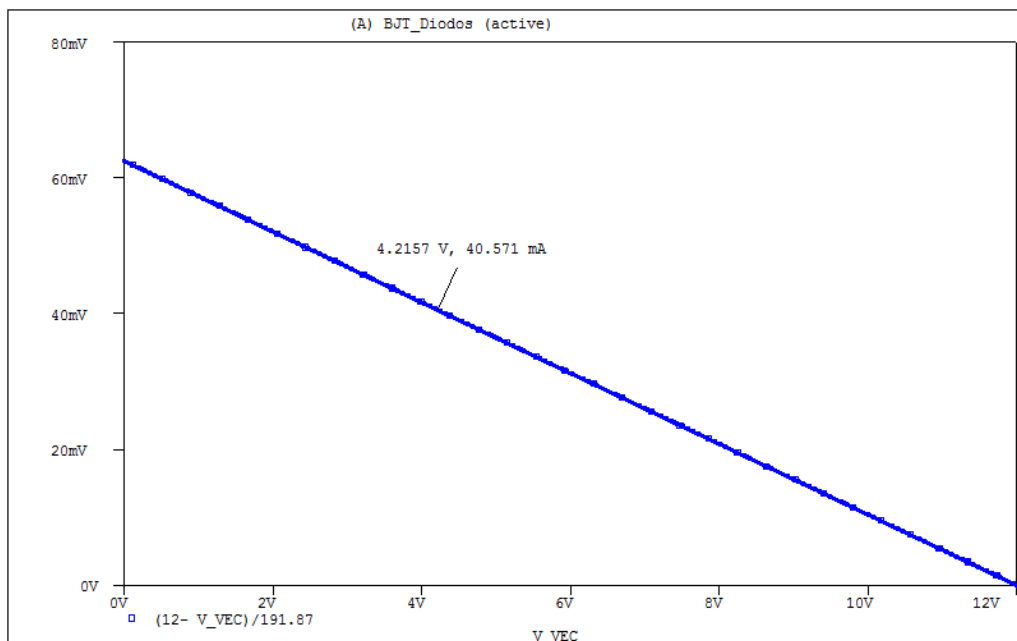


- Corriente que circula por el zéner (rojo) y corriente que circula por el LED (verde):



$$I_Z = 2,4105 \text{ mA} \quad I_{LED} = 38,824 \text{ mA}$$

- Punto de polarización:



$$V_{EC} = 4.2157 \text{ V} \quad I_C = 40.571 \text{ mA}$$

**Comparación de resultados:**

- Intensidad en el zéner y en el diodo LED:

	<b>Analítica</b>	<b>Simulada</b>
$I_Z (mA)$	2,19	2,4105
$I_{LED} (V)$	40,6	38,824

- Punto de polarización:

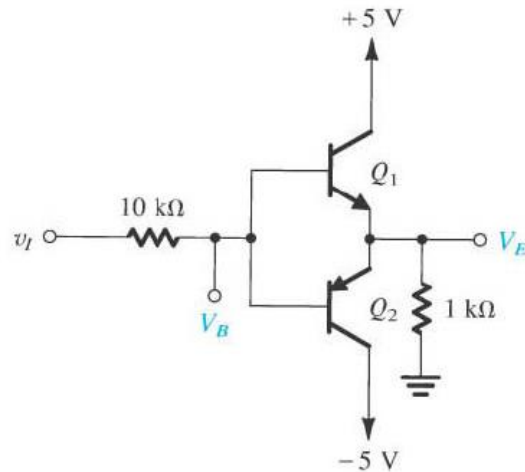
	<b>Analítica</b>	<b>Simulada</b>
$I_{CQ} (mA)$	40,6	40,571
$V_{CEQ} (V)$	4,21	4,2157

**PROBLEMA 18. Región de trabajo transistor BJT****Enunciado:**

Al circuito de la figura se le aplica una onda cuadrada de  $\pm 5V$ , conociendo que  $\beta_{npn} = 100$  y  $\beta_{pnp} = 50$ ,  $V_{BE} = V_{EB} = 0,6 V$ , obtener:

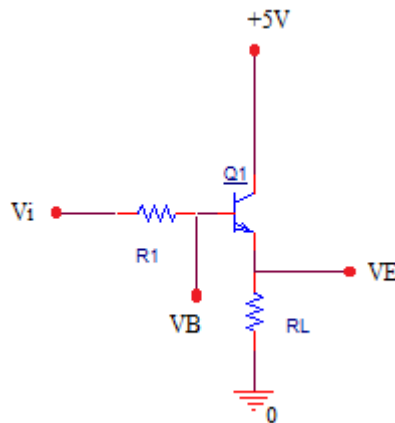
- Para cada semiciclo obtener los valores de  $V_B$ ,  $V_E$ ,  $I_C$  y  $V_{CE}$  de cada transistor indicando la región de trabajo.
- Para cada transistor su recta de carga y sobre ella poner los puntos en los que se encuentran en cada semiciclo.





### Solución analítica:

En el semiciclo positivo, el transistor PNP está en corte, por tanto analizamos el circuito como si no estuviera ya que no circula corriente por él:



$$V_i = I_B R_1 + I_C R_L + V_{BE};$$

$$I_C = \beta I_B ;$$

$$I_B = \frac{V_i - V_{BE}}{R_1 + \beta R_L} = \frac{5 V - 0,6 V}{10 K\Omega + 100 \cdot 1 K\Omega} = 40 \mu A;$$

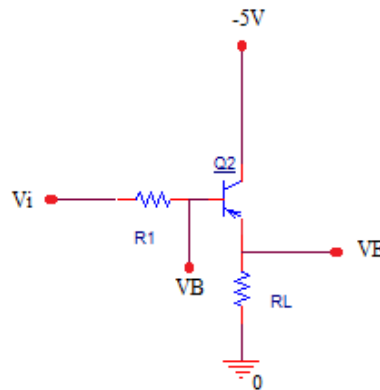
$$I_C = 100 \cdot 40 \mu A = 4 mA;$$

$$V_E = I_C R_L = 4 mA \cdot 1 K\Omega = 4V;$$

$$V_B = V_{BE} + V_E = 0,6V + 4V = 4,6V;$$

$$V_{CE} = V_{CC} - V_E = 5V - 4V = 1V;$$

En el semiciclo negativo, el transistor NPN está en corte, por tanto analizamos el circuito como si no estuviera ya que no circula corriente por él:



$$-V_i = I_B R_1 + I_C R_L + V_{EB};$$

$$I_C = \beta I_B ;$$

$$I_B = \frac{-V_i - V_{BE}}{R_1 + \beta R_L} = \frac{5V - 0,6V}{10K\Omega + 50 \cdot 1K\Omega} = 73,33 \mu A;$$

$$I_C = 50 \cdot 73,33 \mu A = 3,67 mA;$$

$$V_E = I_C R_L = 3,67 mA \cdot 1K\Omega = 3,67V;$$

$$V_B = V_{BE} + V_E = 0,6V + 3,67V = 4,27V;$$

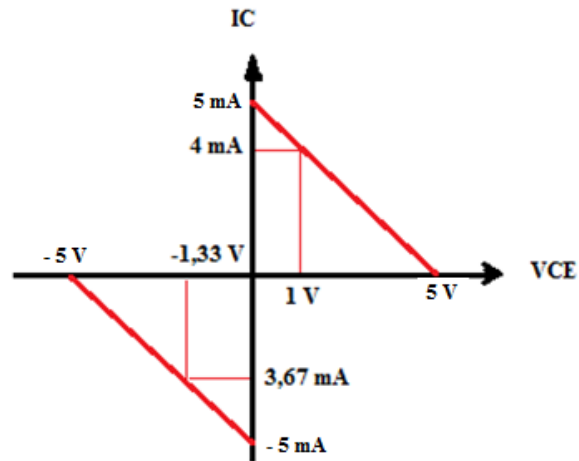
$$V_{EC} = -V_{CC} - V_E = 5V - 3,67V = 1,33V;$$

- Recta de carga de cada transistor:

$V_{CE}$  obtiene su máximo valor cuando  $I_C = 0$ , al igual que  $I_C$  obtiene su máximo valor cuando  $V_{CE} = 0$ :

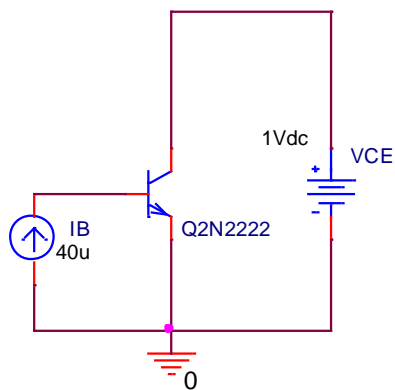
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_E ; V_{CE \max} = V_{CC} = 5V$$

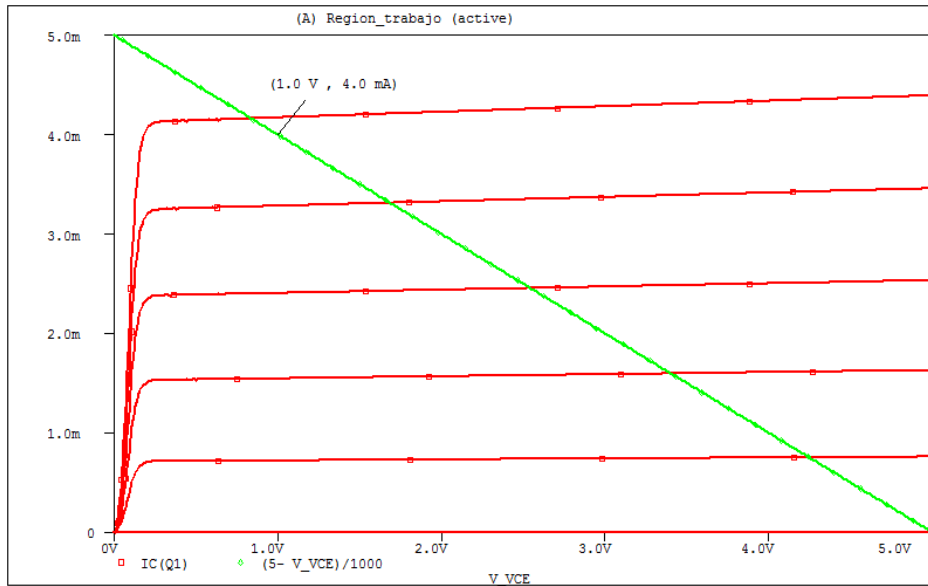
$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_E} ; I_{C \max} = \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{5V}{1K\Omega} = 5mA$$



### Simulación con Pspice:

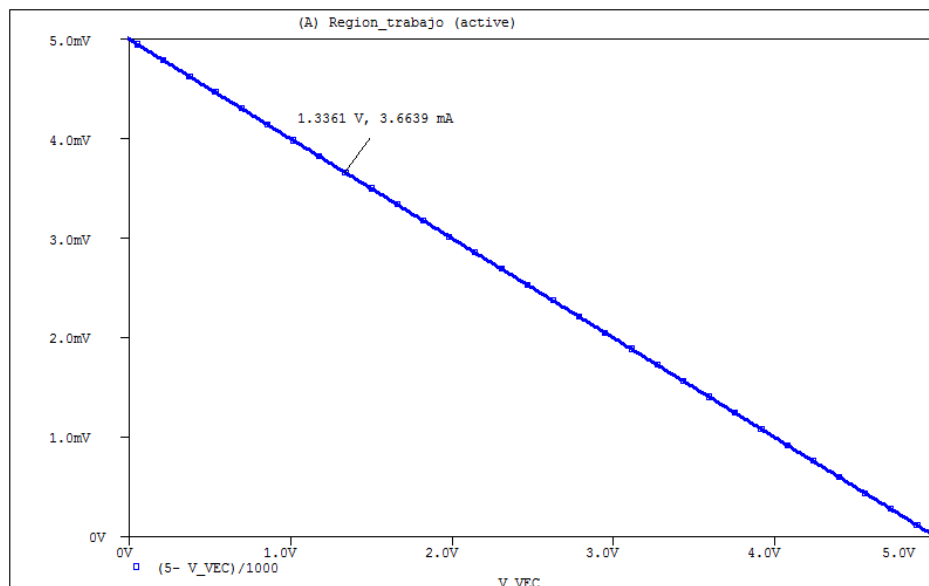
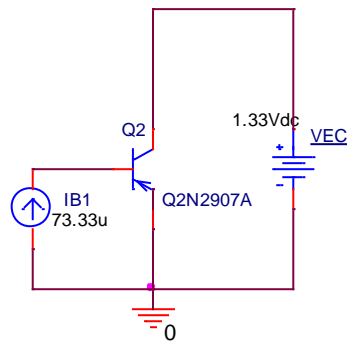
- Transistor 1:





$$V_{CE} = 1 \text{ V} \quad I_C = 4 \text{ mA}$$

- Transistor 2:



$$V_{EC} = 1.3361 \text{ V} \quad I_C = 3,6639 \text{ A}$$

**Comparación de resultados:**

- Transistor 1:

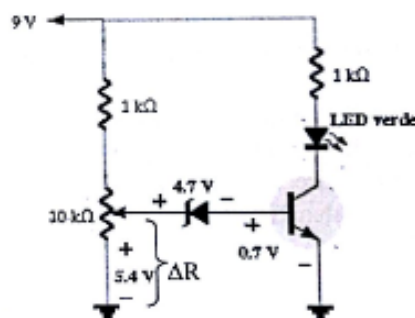
	<b>Analítica</b>	<b>Simulada</b>
$I_{CQ}$ (mA)	4	4
$V_{CEQ}$ (V)	1	1

- Transistor 2:

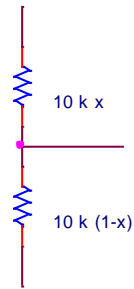
	<b>Analítica</b>	<b>Simulada</b>
$I_{CQ}$ (mA)	3,67	3,6639
$V_{ECQ}$ (V)	1,33	1,3361

**PROBLEMA 19. Resistencia variable****Enunciado:**

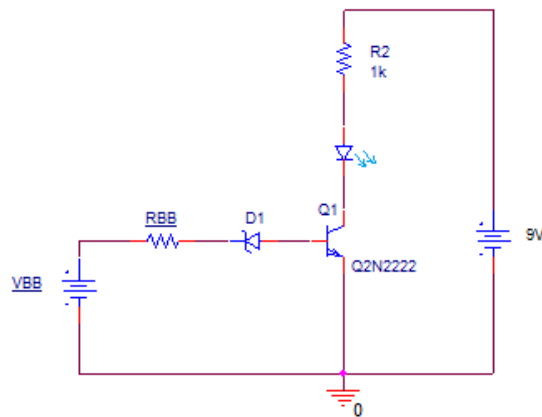
El circuito de la figura es un detector de nivel de tensión, sobre el mismo, determinar: Las corrientes  $I_c$ ,  $I_b$ , y el valor de  $\Delta R$ .

**Solución analítica:**

Lo primero que vamos a hacer es separar la resistencia variable de tal forma que se nos queda de la siguiente manera:



Para resolver el problema primero vamos a obtener el equivalente Thevenin del circuito:



$$R_{BB} = \frac{(1K + 10K \cdot x) \cdot 10K(1 - x)}{(1K + 10K \cdot x) + 10K(1 - x)}$$

$$V_{BB} = 9V \frac{10K(1 - x)}{(1K + 10K \cdot x) + 10K(1 - x)}$$

Operando obtenemos los valores de  $R_{BB}$  y  $V_{BB}$  en función de  $x$ :

$$R_{BB} = -9,09K x^2 + 8,18K x + 909,09$$

$$V_{BB} = -8,18x + 8,18$$

Ahora vamos a plantear las siguientes ecuaciones obtenidas del circuito aplicando el método de las mallas:

$$9V = I_C \cdot 1K + V_{LED} + V_{CE}$$

$$V_{BB} = I_B \cdot R_{BB} + V_Z + V_{BE}$$

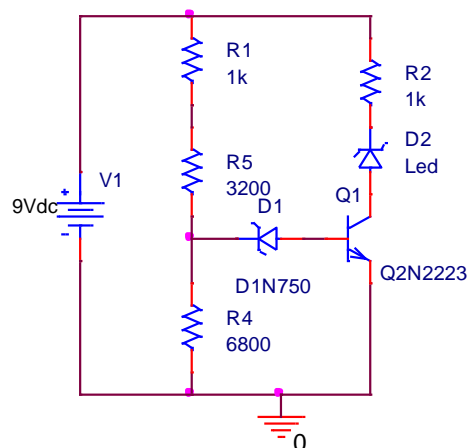
$$I_C = \beta \cdot I_B$$

Como tenemos un led verde sabemos que su tensión de codo es 2,3V y que por él puede circular un intensidad de aproximadamente 5 mA, Por tanto vamos a suponer una  $I_C = 5 \text{ mA}$ , entonces ya podemos calcular el valor de  $x$  y de  $I_B$ :

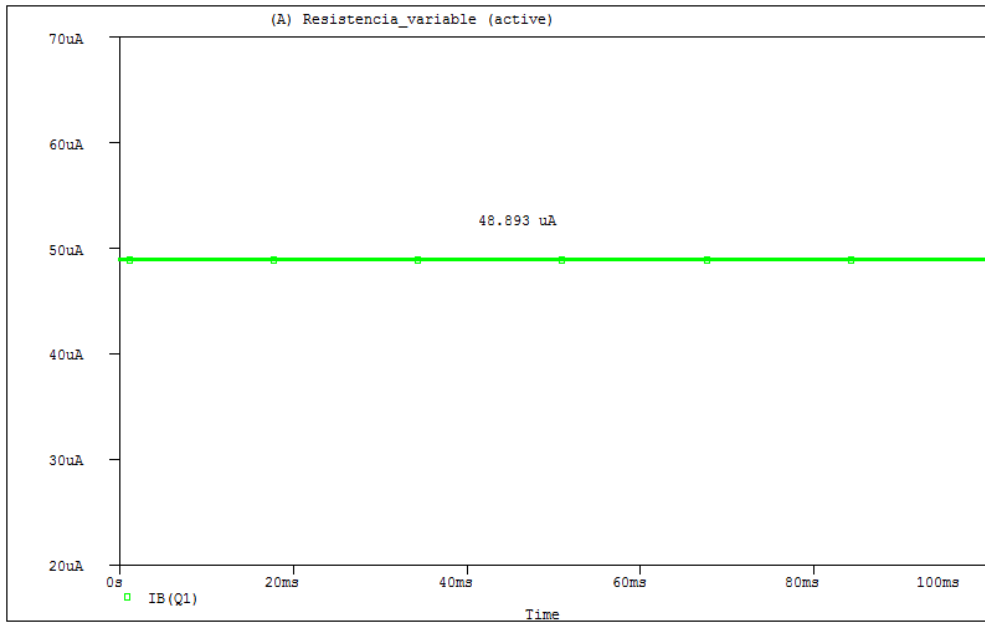
$$I_C = 5 \text{ mA} ; I_B = 50 \mu\text{A} ; \Delta R = x = 0,32$$

### **Simulación con Pspice:**

Para simular el diodo Led he cogido un diodo zéner y le he cambiado la tensión inversa que tenía por defecto por la tensión de codo del Led verde (2,3 V).

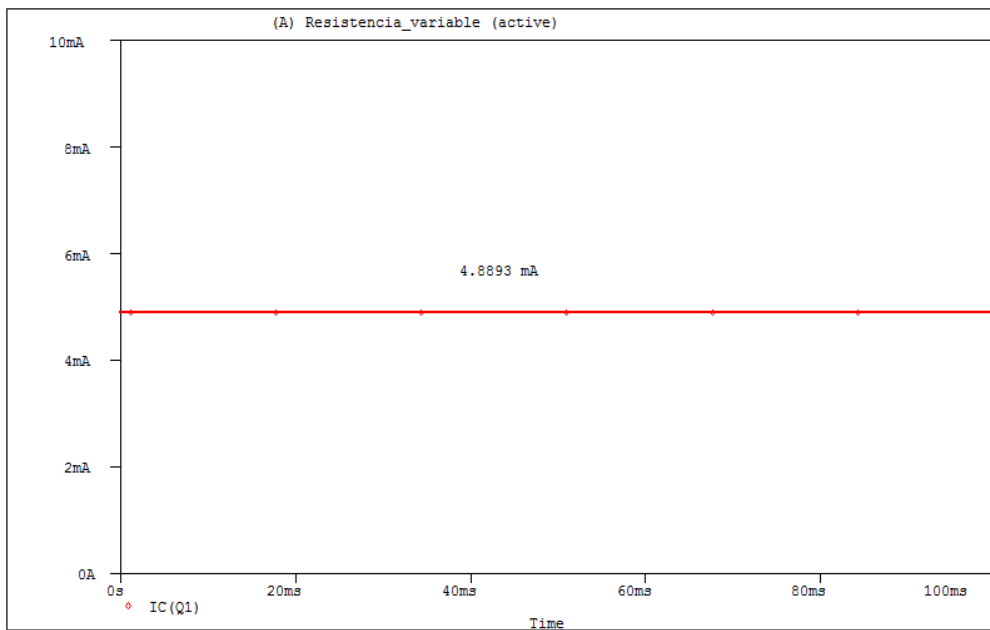


- Intensidad de base:



$$I_B = 48,893 \mu A$$

- Intensidad de colector:



$$I_C = 4,8893 mA$$



**Comparación de resultados:**

	<b>Analítica</b>	<b>Simulada</b>
$I_C$ (mA)	5	4,8893
$I_B$ ( $\mu A$ )	50	48,893

**Nomenclatura**

$V_{CC}$ : Tensión de alimentación en continua (V).

$V_{BE}$ : Tensión Base-Emisor (V).

$V_{CE}$ : Tensión Colector-Emisor (V).

$V_{BB}$ : Tensión Thevenin (V).

$V_{DD}$ : Tensión de alimentación en continua (V).

$V_{GS}$ : Tensión Puerta-Surtidor (V).

$V_{DS}$ : Tensión Drenador-Surtidor (V).

$V_{GG}$ : Tensión Thevenin (V).

$I_C$ : Intensidad de Colector (A).

$I_B$ : Intensidad de Base (A).

$I_E$ : Intensidad de Emisor (A).

$I_D$ : Intensidad de Drenador (A)

$I_G$ : Intensidad de Puerta (A).

$R_{B1}$ : Resistencia de Base 1 ( $\Omega$ ).

$R_{B2}$ : Resistencia de Base 2( $\Omega$ ).

$R_{BB}$ : Resistencia equivalente de Base ( $\Omega$ ).

$R_C$ : Resistencia de Colector ( $\Omega$ ).

$R_E$ : Resistencia de Emisor ( $\Omega$ ).

$\beta$ : Relación entre corriente de colector y corriente de base.

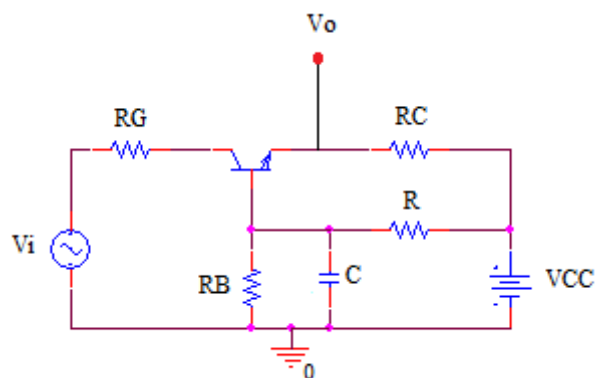
### 3.4. TEMA 4. AMPLIFICADORES RESPUESTA EN FRECUENCIA

#### PROBLEMA 20. Amplificador Base común

##### **Enunciado:**

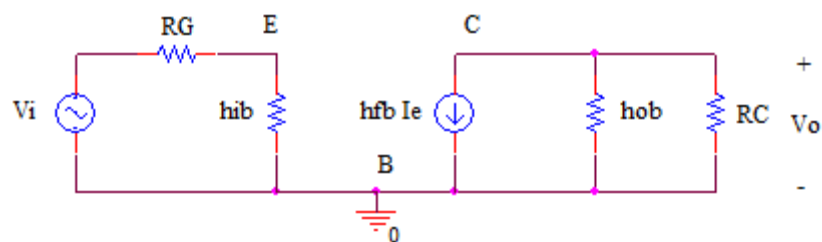
Dado circuito que se muestra en la figura, Determinar teóricamente:

- Impedancia de entrada y salida del circuito.
- Ganancia en tensión e intensidad del amplificador.



##### **Solucion analítica:**

Vamos a pasar el circuito al modelo equivalente en alterna usando parámetros  $h$ , en este caso los condensadores y las fuentes de tensión en continua actúan como cortocircuitos:



$$hfe = \beta ; hie = hfe \frac{V_T}{I_C} ; hoe = \frac{V_A}{I_C}$$

$$Z_i = hib = \frac{hie}{1 + hfe}$$

$$Z'_i = Z_i + R_G$$

$$Z_o = h_{ob} = \frac{h_{oe}}{1 + h_{fe}}$$

$$Z_o' = Z_o // R_C$$

$$h_{fb} = \frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} \approx 1$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i};$$

$$V_o = -h_{fb} I_E (h_{ob} // R_C) = -h_{fb} \frac{V_i}{h_{ib} + R_B} (h_{ob} // R_C) = -h_{fb} \frac{V_i}{Z_i'} Z_o';$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = -h_{fb} \frac{Z_o'}{Z_i'} \approx -\frac{Z_o'}{Z_i'}$$

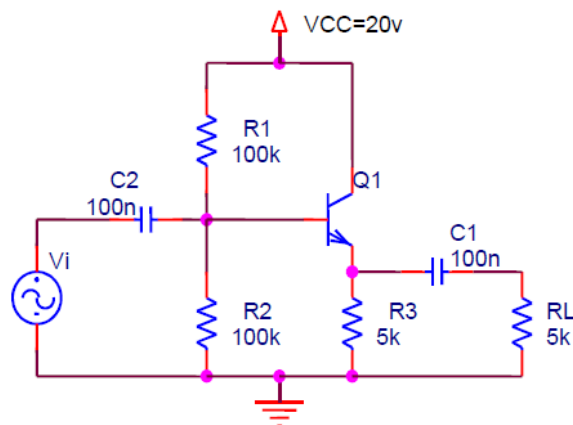
$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{V_o / R_C}{V_i / Z_i'} = A_v \frac{Z_i'}{R_C}$$

## PROBLEMA 21. Amplificador Colector común

### Enunciado:

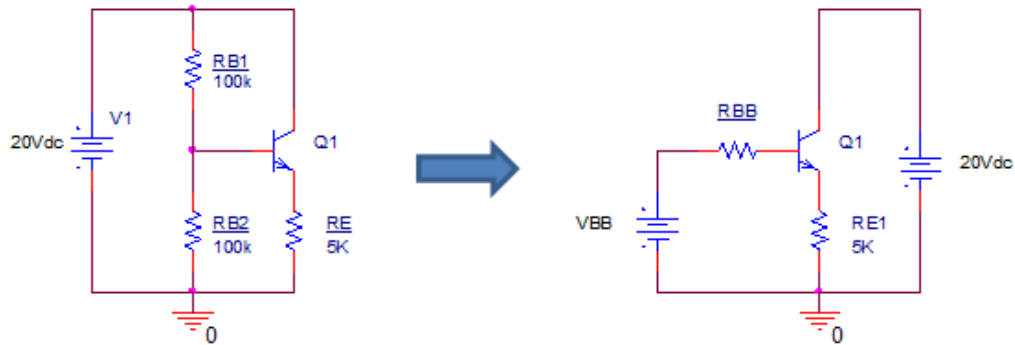
En el circuito de la figura con  $\beta = 300$  y  $V_{BE} = 0,7 V$ , determina:

- Punto de polarización del transistor.
- Ganancia en tensión.



**Solución analítica:**

Para hallar el punto de polarización vamos a analizar el circuito en continua, por tanto los condensadores se comportan como circuitos abiertos:



$$V_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} = \frac{100K}{100K + 100K} 20V = 10V$$

$$R_{BB} = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} = \frac{100K\Omega \cdot 100K\Omega}{100K\Omega + 100K\Omega} = 50 K\Omega$$

Obtenemos las siguientes ecuaciones del circuito ya simplificado:

$$V_{CC} = I_C R_E + V_{CE}$$

$$V_{BB} = I_B R_{BB} + V_{EB} + I_E R_E$$

Ahora vamos a plantar las ecuaciones de las intensidades

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$I_E = I_B + I_C ; I_E \approx I_C$$

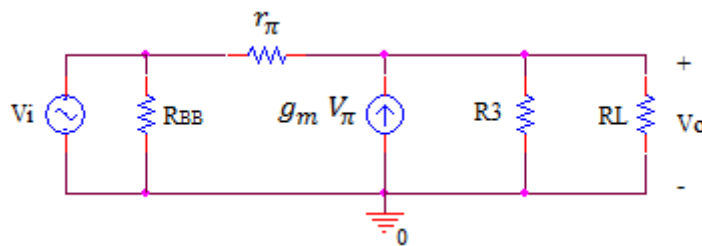
Sustitimos en las ecuaciones planteadas anteriormente del circuito y ya podemos resolver el punto de polarización:

$$V_{BB} = \frac{I_C}{\beta} R_{BB} + V_{EB} + I_C R_E$$

$$I_C = \frac{V_{BB} - V_{EB}}{\frac{R_{BB}}{\beta} + R_E} = \frac{10V - 0,7V}{\frac{50 K\Omega}{300} + 5K\Omega} = 1,8 mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_E = 20V - 1,8 mA \cdot 5 K\Omega = 11V$$

Para hallar la ganancia en tensión, tenemos que hacer el modelo equivalente en alterna usando parámetros  $\pi$ , en este caso los condensadores y las fuentes de tensión en continúa actúan como cortocircuitos:



$$A_v = \frac{V_o}{V_i}$$

$$V_o = I_{R3} R_3 = (i_\pi + g_m V_\pi) R_3 = \left( \frac{V_\pi}{r_\pi} + g_m V_\pi \right) R_3 = V_\pi \left( \frac{1}{r_\pi} + g_m \right) R_3;$$

$$V_\pi = V_i - V_o;$$

Despejando  $V_\pi$  en la primera ecuación, ya lo dejamos todo en función de  $V_i$  y  $V_o$  y por tanto obtener el valor de la ganancia en tensión:

$$V_o = (V_i - V_o) \left( \frac{1}{r_\pi} + g_m \right) R_3;$$

$$V_o \left( 1 + \left( \frac{1}{r_\pi} + g_m \right) R_3 \right) = V_i \left( \frac{1}{r_\pi} + g_m \right) R_3;$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\left( \frac{1}{r_\pi} + g_m \right) R_3}{1 + \left( \frac{1}{r_\pi} + g_m \right) R_3}$$

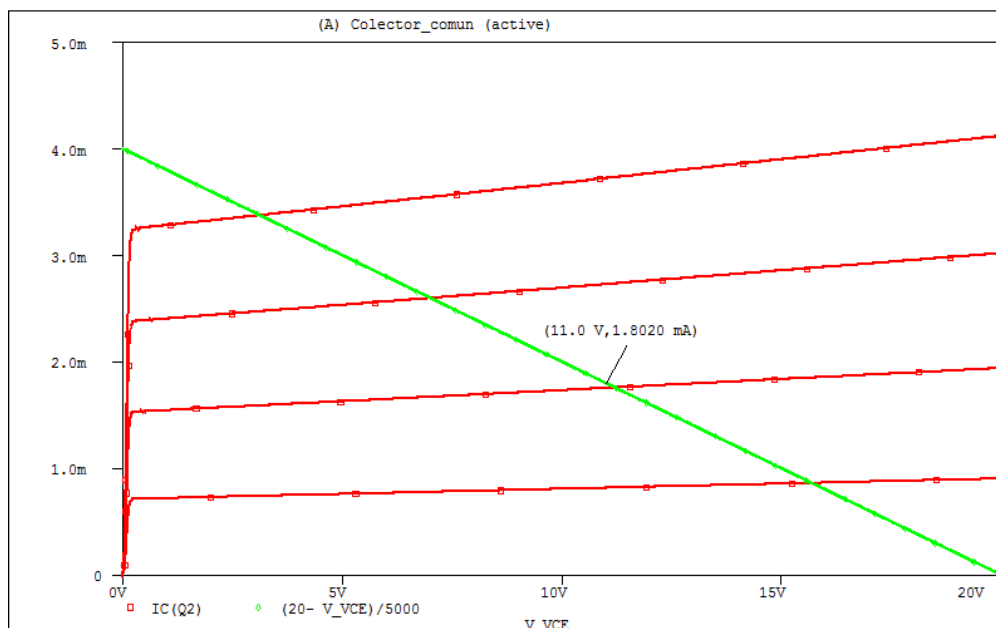
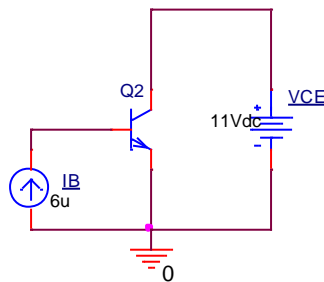
Ya tenemos la expresión de la ganancia para este circuito, ahora vamos a obtener el valor de  $g_m$  y  $r_\pi$ :

$$r_\pi = \beta \frac{V_T}{I_C} = 300 \frac{25 \text{ mV}}{1,8 \text{ mA}} = 4,17 \text{ K}\Omega \quad ; \quad g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{1,8 \text{ mA}}{25 \text{ mV}} = 0,072 \frac{1}{\Omega}$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\left( \frac{1}{4,17 \text{ K}\Omega} + 0,072 \frac{1}{\Omega} \right) 5 \text{ K}\Omega}{1 + \left( \frac{1}{4,17 \text{ K}\Omega} + 0,072 \frac{1}{\Omega} \right) 5 \text{ K}\Omega} = 0,997 \approx 1$$

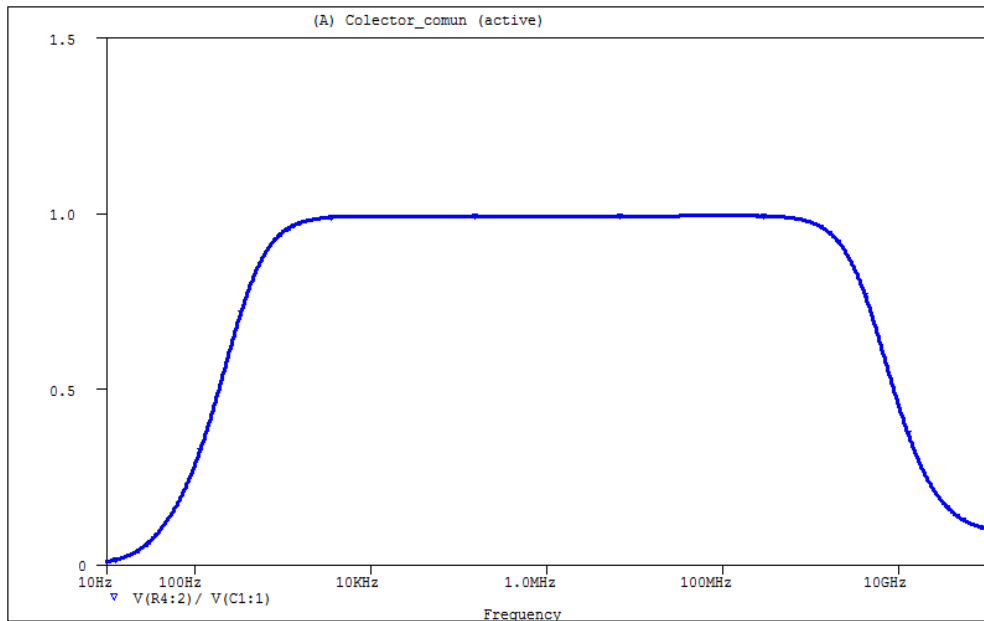
### Simulación con Pspice:

- Punto de polarización:



$$V_{CEQ} = 11 \text{ V} \quad I_{CQ} = 1,802 \text{ mA}$$

- Ganancia en tensión:



$$A_v = 1$$

### Comparación de resultados:

- Punto de polarización:

	Analítica	Simulada
$I_{CQ}$ (mA)	1,8	1,802
$V_{CEQ}$ (V)	11	11

- Ganancia en tensión:

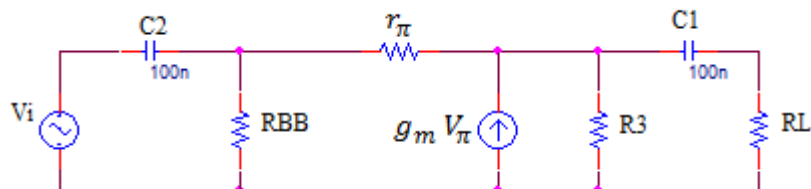
Analítica	Simulada
0,997	1

**PROBLEMA 22. Respuesta en frecuencia Amplificador Colector común****Enunciado:**

Determinar la frecuencia de corte inferior del circuito del ejercicio anterior.

**Solución analítica:**

Para determinar la frecuencia de corte inferior, vamos a obtener el circuito a frecuencias bajas, que es igual que el modelo en alterna pero sin cortocircuitar los condensadores:



Observamos que tenemos dos condensadores de acoplo y ninguno de desacoplo:

$$Av(j\omega) = Avm \frac{j\omega}{j\omega + \omega_{P1}} \frac{j\omega}{j\omega + \omega_{P2}}$$

$$Avm = 20 \log|Av| = 20 \log|1| = 0 \text{ dB}$$

Para calcular  $\omega_{P1}$  y  $\omega_{P2}$  vamos a usar el método de las constantes de tiempo. Como estamos analizando el circuito a bajas frecuencias, vamos a calcular los polos de cada uno de los condensadores cuando el otro está en cortocircuito:

$$\text{Para } C_2 = \infty; \omega_{P1} = \frac{1}{C_1 (R_3 + R_L)} = \frac{1}{100 \text{ nF} (5 \text{ K}\Omega + 5 \text{ K}\Omega)} = 1000 \text{ rad/s}$$

$$\text{Para } C_1 = \infty; \omega_{P2} = \frac{1}{C_2 (R_{BB} // r_{\pi})} = \frac{1}{100 \text{ nF} 3,85 \text{ K}\Omega} = 2597,4 \text{ rad/s}$$

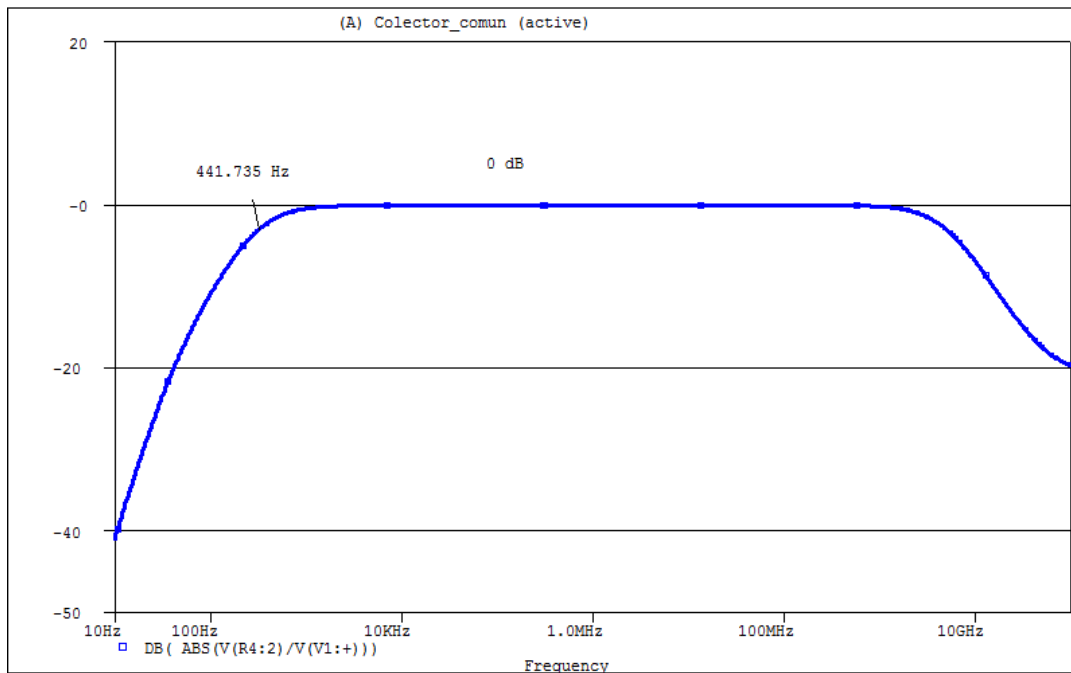
Ahora ya si podemos calcular la frecuencia de corte inferior de la siguiente manera:



$$W_L = \sqrt{w_{P1}^2 + w_{P2}^2} = \sqrt{1000^2 + 2597,4^2} = 2783,25 \text{ rad/s}$$

$$f_{CL} = \frac{1}{2\pi \text{ rad}} 2783,25 \text{ rad/s} = 443,35 \text{ Hz}$$

### Simulación con Pspice:



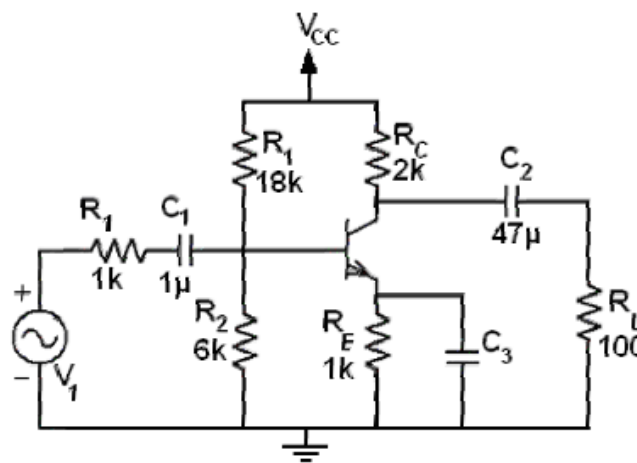
### Comparación de resultados:

	Analítica	Simulada
$Av_m$ (dB)	0	0
$F_{CL}$ (Hz)	443,35	441,735

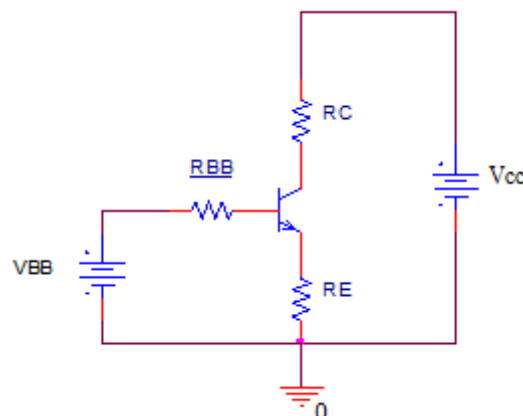
**PROBLEMA 23. Amplificador emisor común****Enunciado:**

En el circuito de la figura con  $V_{CC} = 20\text{ V}$ ,  $V_{BE} = 0,6\text{ V}$ ,  $\beta = 100$ , determinar:

- Punto de polarización del transistor.
- Ganancia en tensión y en corriente, la impedancia de entrada (en  $V_1$ ) y de salida (sin  $R_L$ ).

**Solución analítica:**

Para encontrar el punto de polarización vamos a analizar el circuito en continua, por tanto los condensadores se comportan como circuitos abiertos y como es polarización por divisor de tensión, podemos simplificar el circuito usando el método de Thevenin:



$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{6 \text{ K}\Omega}{18 \text{ K}\Omega + 6 \text{ K}\Omega} 20\text{V} = 5\text{V}$$

$$R_{BB} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{18 \text{ K}\Omega \cdot 6 \text{ K}\Omega}{18 \text{ K}\Omega + 6 \text{ K}\Omega} = 4,5 \text{ K}\Omega$$

Obtenemos las siguientes ecuaciones del circuito ya simplificado. Como  $I_B$  va a tener un valor muy pequeño, podemos considerar que  $I_E \simeq I_C$ :

$$I_C = \beta I_B;$$

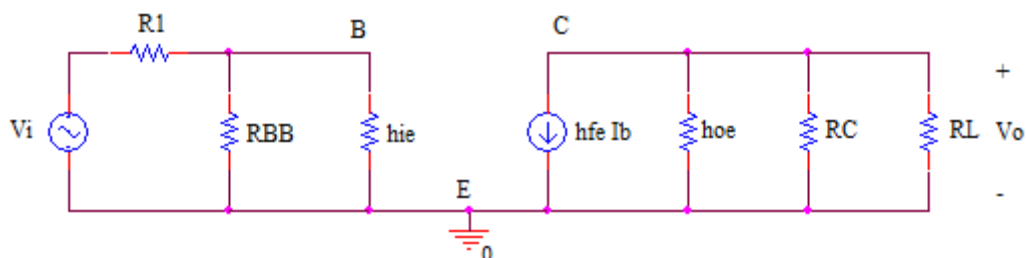
$$V_{BB} = R_{BB} I_B + V_{BE} + I_C R_E;$$

$$V_{CC} = I_C R_C + I_C R_E + V_{CE};$$

$$I_C = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{BB}}{\beta}} = \frac{5\text{V} - 0,6\text{V}}{1 \text{ K}\Omega + \frac{4,5 \text{ K}\Omega}{100}} = 4,21 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E) = 20\text{V} - 4,21 \text{ mA} (2 \text{ K}\Omega + 1 \text{ K}\Omega) = 7,37 \text{ V}$$

Para resolver el siguiente apartado, tenemos que hacer el modelo equivalente en alterna, en este caso vamos a usar parámetros H:



$$hfe = \beta ; hie = hfe \frac{V_T}{I_C} = 100 \frac{25 \text{ mV}}{4,21 \text{ mA}} = 593,8 \Omega$$

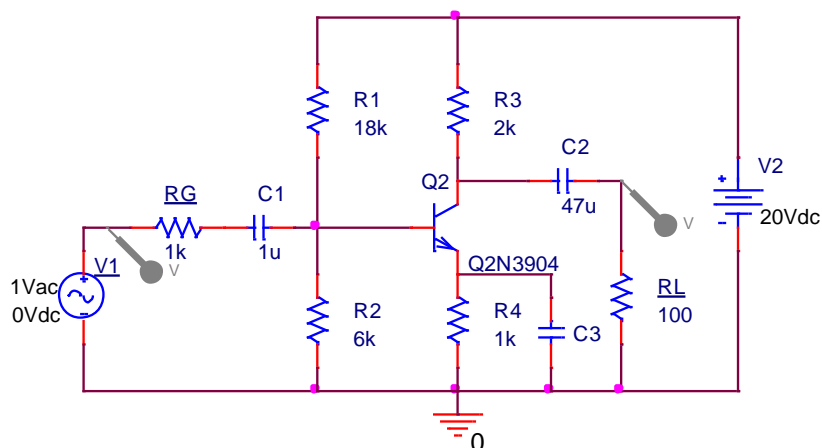
$$Zi = \frac{V_i}{i_i}_{V_o=0} = R_1 + (R_{BB} // hie) = 1 \text{ K}\Omega + (4,5 \text{ K}\Omega // 593,8 \Omega) = 1524,6 \Omega$$

$$Zo = \frac{V_o}{i_o}_{V_i=0} = R_L // (R_C // h_{oe})_{h_{oe} \gg R_C} = 95,24 \Omega$$

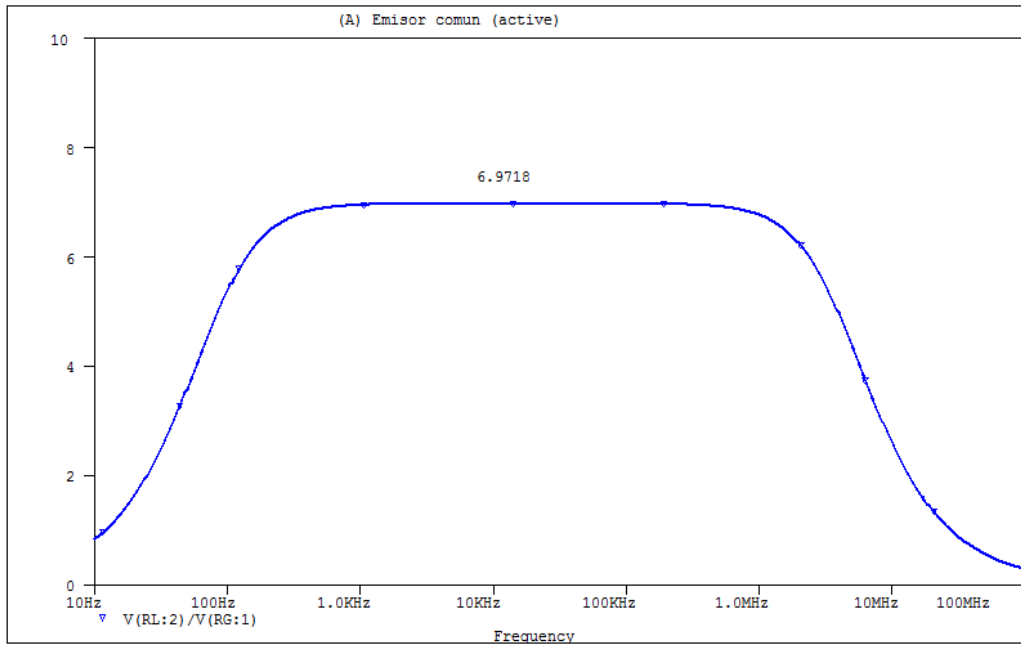
$$Av = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-hfe I_B Z_o}{V_i} = \frac{-hfe \frac{V_i}{Z_i} Z_o}{V_i} = \frac{-hfe Z_o}{Z_i} = \frac{-100 \cdot 95,24 \Omega}{1524,6 \Omega} = -6,25$$

$$Ai = \frac{i_o}{i_i} = \frac{V_o / Z_o}{V_i / Z_i} = Av \frac{Z_i}{Z_o} = -6,25 \frac{1524,6 \Omega}{95,24 \Omega} = -100$$

### Simulación con Pspice:

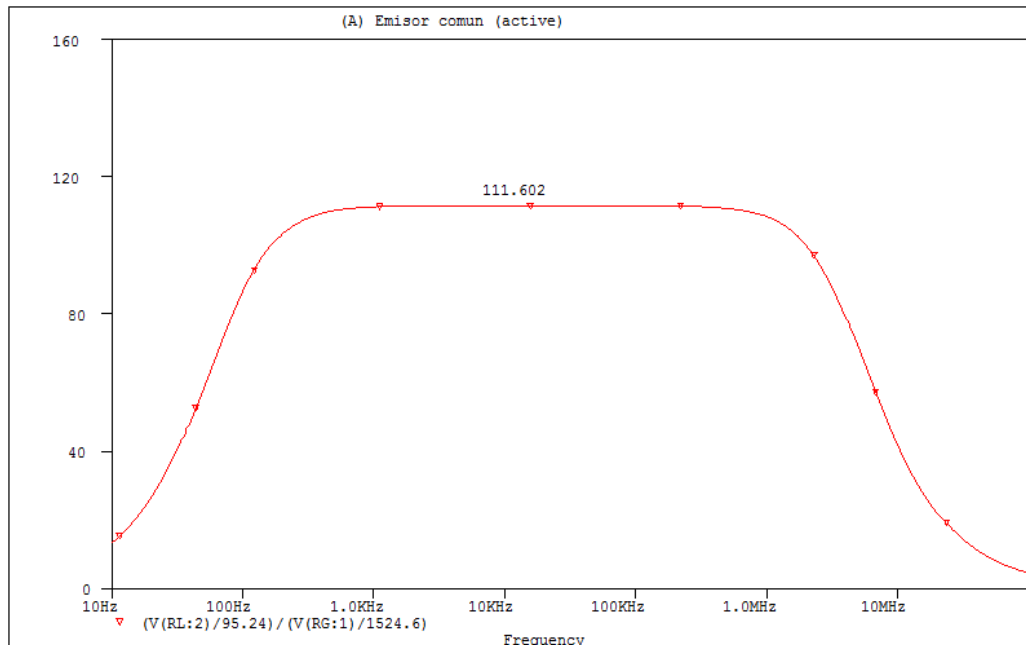


- Ganancia en tensión:



$$|Av| = 6,9718$$

- Ganancia en Intensidad:



$$|Ai| = 111,602$$

**Comparación de resultados:**

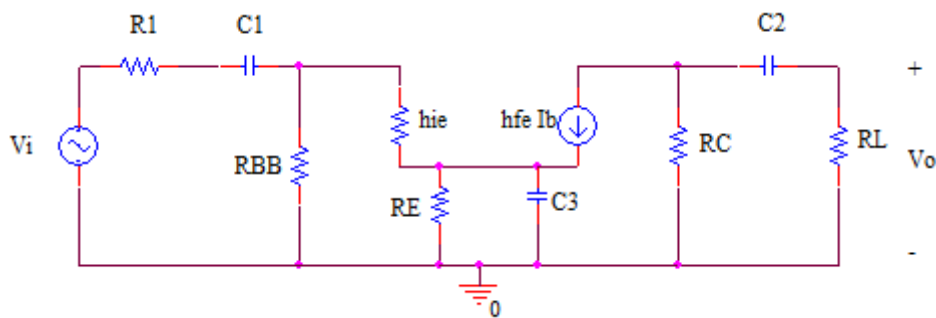
	Análítica	Simulada
$ A_v $	6,25	6,9718
$ A_i $	100	111,602

**PROBLEMA 24. Respuesta en frecuencia Amplificador emisor común****Enunciado:**

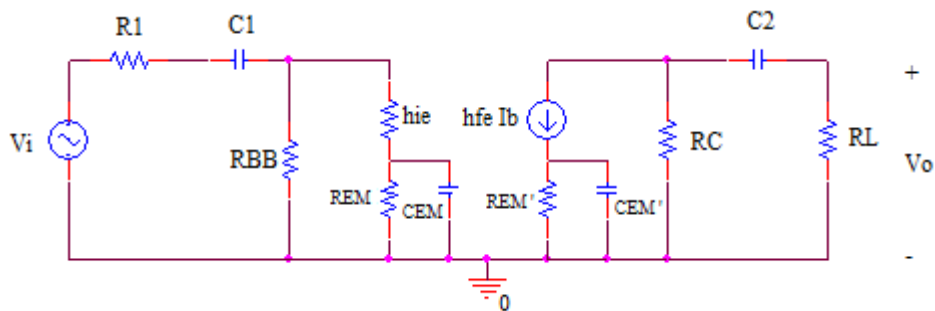
Determinar la frecuencia de corte inferior y superior del circuito del ejercicio anterior sabiendo que  $C_3 = \infty$ ,  $C_\pi = 30 \text{ pf}$ ,  $C_\mu = 2 \text{ pf}$ .

**Solución analítica:**

Para determinar la frecuencia de corte inferior, vamos a obtener el circuito a frecuencias bajas, que es igual que el modelo en alterna pero sin cortocircuitar los condensadores:



Como esta vez tenemos resistencia de emisor, vamos a realizar el teorema de Miller:



$$R_{EM} = R_E(1 + \beta) = 101 \text{ K}\Omega \quad R_{EM}' = R_E \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 1010 \Omega$$

$$C_{EM} = \frac{C3}{1 + \beta} = \infty \quad C_{EM}' = \frac{C3}{1 + \frac{1}{\beta}} = \infty$$

$$Av(j\omega) = Avm \frac{j\omega}{j\omega + \omega_{P1}} \frac{j\omega}{j\omega + \omega_{P2}} \frac{j\omega}{j\omega + \omega_{P3}}$$

$$Avm = 20 \log|Av| = 20 \log|6,25| = 15,92 \text{ dB}$$

$$\text{Para } C_2 = \infty; \omega_{P1} = \frac{1}{C_1 (R_1 + R_{BB} // hie)} = \frac{1}{1 \mu\text{F} (1 \text{ K}\Omega + 4,5 \text{ K}\Omega // 593,8 \Omega)} \\ = 656 \text{ rad/s}$$

$$\text{Para } C_1 = \infty; \omega_{P2} = \frac{1}{C_2 (R_C + R_L)} = \frac{1}{47 \mu\text{F} (2 \text{ K}\Omega + 100 \Omega)} = 10,13 \text{ rad/s}$$

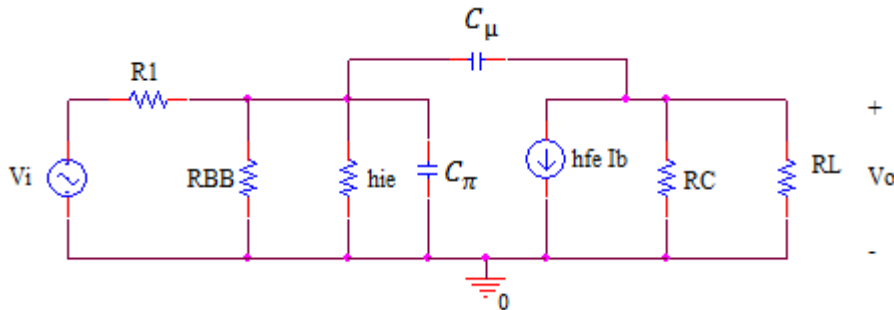
$$\text{Para } C_1 = \infty, C_2 = \infty; \omega_{P3} = \frac{1}{C_{EM} ((hie + R_{BB} // R_1) // R_{EM})} = 0$$

Ahora ya si podemos calcular la frecuencia de corte inferior de la siguiente manera:

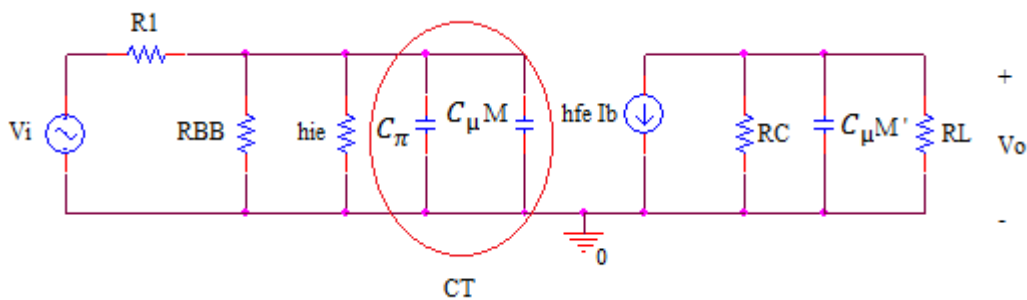
$$\omega_L = \sqrt{\omega_{P1}^2 + \omega_{P2}^2 + \omega_{P3}^2} = \sqrt{656^2 + 10,13^2} = 656 \text{ rad/s}$$

$$f_{CL} = \frac{1}{2\pi \text{ rad}} 656 \text{ rad/s} = 104,42 \text{ Hz}$$

Para determinar la frecuencia de corte inferior, vamos a obtener el circuito a frecuencias bajas, que es igual que el modelo en alterna pero añadiendo los condensadores  $C_\pi$  y  $C_\mu$ :



Aplicamos Miller en el condensador  $C_\mu$  para separar el circuito y así facilitarnos los cálculos:



$$C_T = C_\pi + C_\mu M = C_\pi + C_\mu (1 + A_v) = 30 \text{ pF} + 2 \text{ pF} (1 + 6,25) = 44,5 \text{ pF}$$

$$C_\mu M' = C_\mu \left(1 + \frac{1}{A_v}\right) = 2 \text{ pF} \left(1 + \frac{1}{6,25}\right) = 2,32 \text{ pF}$$

$$A_v(j\omega) = A_{vm} \frac{\omega_{P1}}{j\omega + \omega_{P1}} \frac{\omega_{P2}}{j\omega + \omega_{P2}}$$

Para calcular  $\omega_{P1}$  y  $\omega_{P2}$  vamos a usar el método de las constantes de tiempo. Como estamos analizando el circuito a altas frecuencias, vamos a calcular los polos de cada uno de los condensadores mientras que el otro se comporta como un circuito abierto:

$$\begin{aligned} \text{Para } C_\mu M' = 0; \omega_{P1} &= \frac{1}{C_T (R_1 // R_{BB} // h_{ie})} = \frac{1}{44,5 \text{ pF} \cdot 350\Omega} \\ &= 64205457,46 \text{ rad/s} \end{aligned}$$



$$\text{Para } C_T = 0; w_{P2} = \frac{1}{C_{\mu} M' (R_L // R_C)} = \frac{1}{2,32 \text{ pF } 95 \Omega} = 4537205082 \text{ rad/s}$$

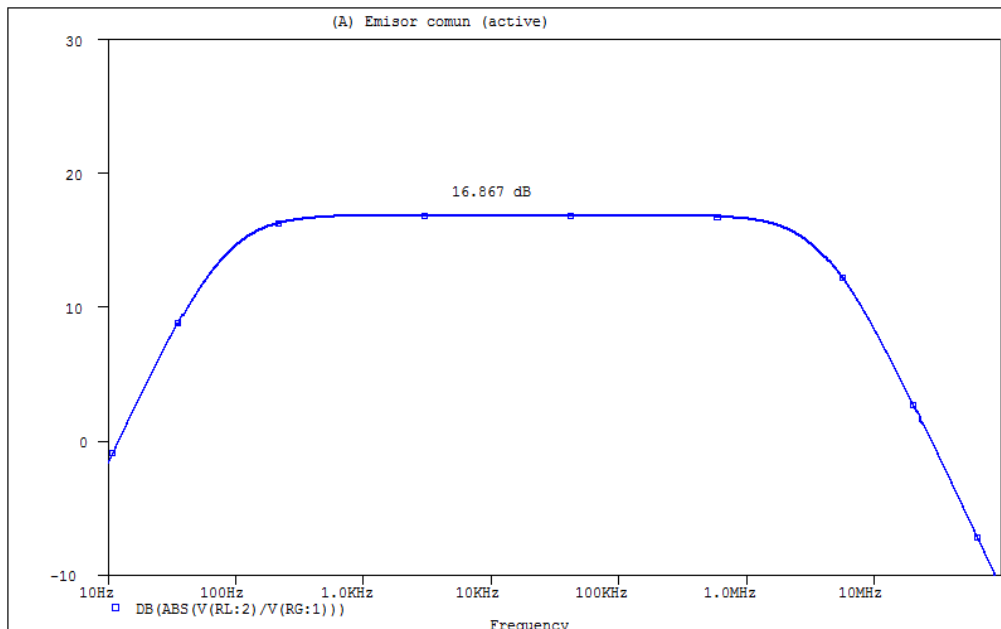
Ahora vamos a calcular la frecuencia de corte superior:

$$W_H = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{w_{P1}^2} + \frac{1}{w_{P2}^2}}} = 4537659341 \text{ rad/s}$$

$$f_{CH} = \frac{1}{2\pi} W_H = 722,19 \text{ MHz}$$

### Simulación con Pspice:

- Diagrama de Bode:



$$A_{vm} = 16,867 \text{ dB}$$

### Comparación de resultados:

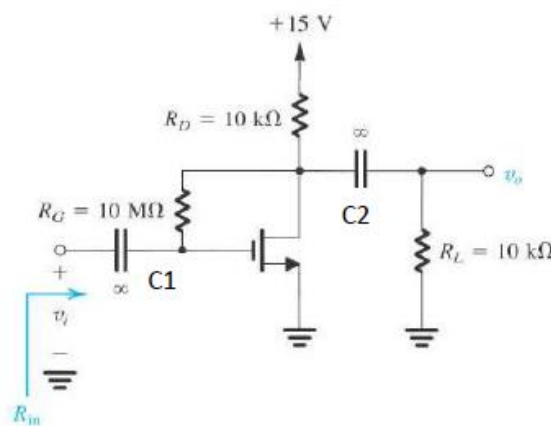
- Ganancia en decibelios:

Analítica	Simulada
15,92 dB	16,867 dB

**PROBLEMA 25. Amplificador surtidor común****Enunciado:**

En el amplificador de la figura se conoce que  $V_{TN} = 1V$ ,  $K_N = 0,25 \text{ mA/V}^2$ ,  $V_{DD} = 15V$  y  $\lambda = 0,02 \text{ V}^{-1}$ . Determinar:

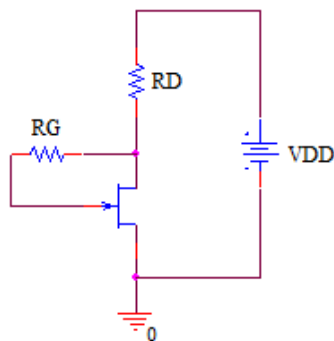
- Punto de polarización del transistor.
- Ganancia en tensión, la impedancia de entrada y de salida.



$$g_{m|Q} = \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} = k_n (v_{GS} - V_{TN}) \quad r_d = \frac{1}{\lambda \cdot I_D}$$

**Solución analítica:**

Para hallar el punto de polarización vamos a analizar el circuito en continua, por tanto los condensadores se comportan como circuitos abiertos:



$$V_{DD} = I_D R_D + V_{DS}$$

$$V_{DD} = I_D R_D + I_G R_G + V_{GS}$$

$$I_D = \frac{K_N}{2} (V_{GS} - V_{TN})^2$$

Sustituimos  $I_D$  en la segunda ecuación y obtenemos el valor de  $V_{GS}$  ya que sabemos que  $I_G = 0$  y el resto de datos los conocemos:

$$15V = \frac{0,25 \text{ mA/V}^2}{2} (V_{GS} - 1V)^2 10 \text{ K}\Omega + V_{GS}$$

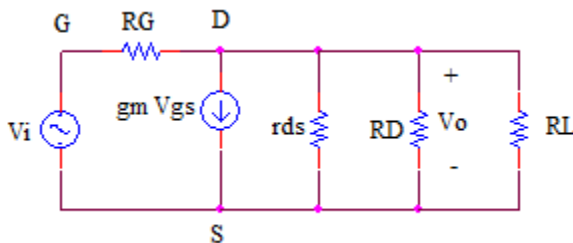
$$V_{GS} = 3,97V$$

Una vez calculado el valor de  $V_{GS}$ , ya podemos conocer el punto de polarización del transistor:

$$I_D = \frac{0,25 \text{ mA/V}^2}{2} (3,97 - 1V)^2 = 1,1026 \text{ mA}$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D = 15V - 1,1026 \text{ mA} \cdot 10 \text{ K}\Omega = 3,97V$$

Para calcular la ganancia y las impedancias de entrada y salida, vamos a obtener el equivalente Norton del circuito en alterna, por tanto los condensadores y las fuentes de tensión continua se cortocircuitan:

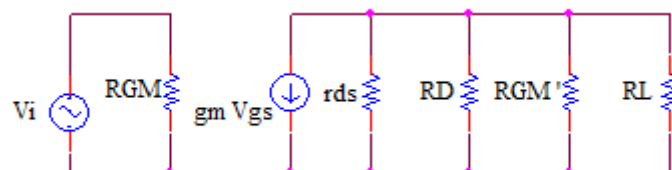


$$gm = 0,25 \text{ mA/V}^2 (3,97V - 1V) = 0,74 \text{ mA/V}$$

$$r_{ds} = \frac{1}{0,02 \text{ V}^{-1} \cdot 1,1026 \text{ mA}} = 45347,36 \Omega$$

$$Av = \frac{V_o}{V_i} = \frac{gm V_{GS} (r_{ds} // R_D // R_L)}{V_{GS}} = 3,37$$

Aplicamos el método de Miller para reorganizar el circuito para calcular la impedancia de entrada y salida del circuito:



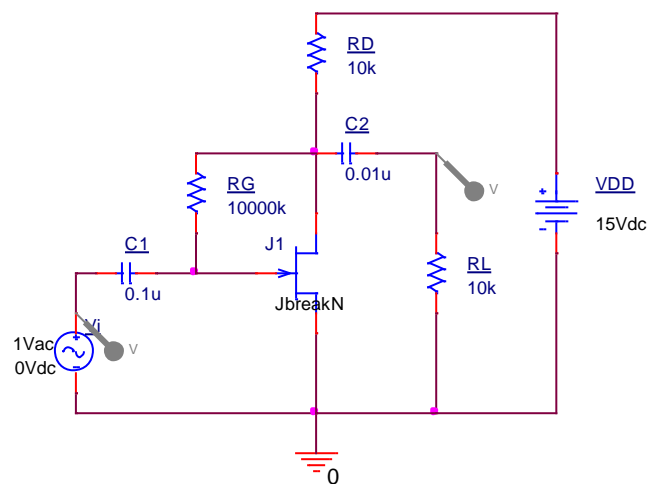
$$R_{GM} = R_G \left( \frac{1}{1 + Av} \right) = 10 \text{ M}\Omega \left( \frac{1}{1 + 6,063} \right) = 1,4 \text{ M}\Omega$$

$$R_{GM}' = R_G \left( \frac{1}{1 + \frac{1}{Av}} \right) = 10 \text{ M}\Omega \left( \frac{1}{1 + \frac{1}{6,063}} \right) = 8,6 \text{ M}\Omega$$

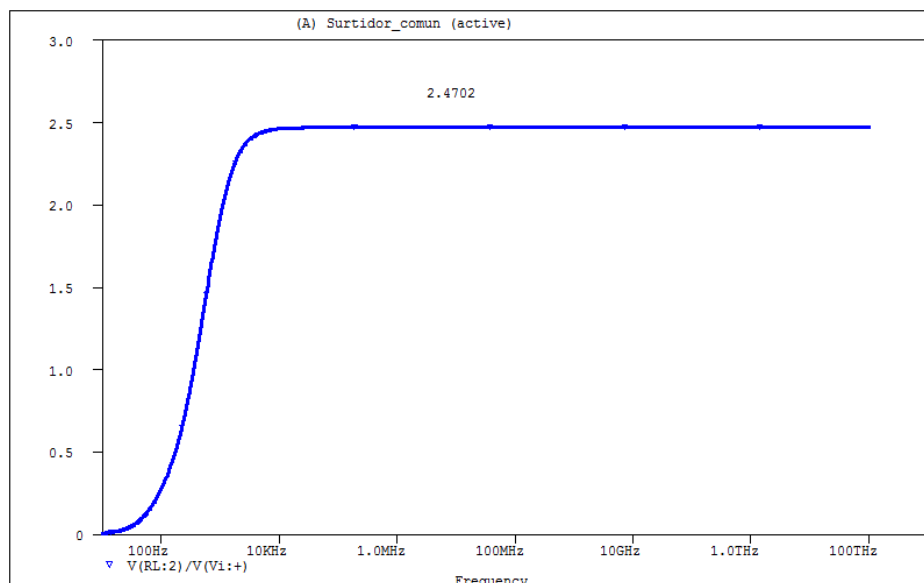
$$Z_i = R_{GM} = 1,4 \text{ M}\Omega$$

$$Z_o = (r_{ds} // R_{GM}' // R_D) = 8,18 \text{ K}\Omega$$

### Simulación con Pspice:



- Ganancia en tensión:



$$Av = 2,47$$

**Comparación de resultados:**

- Ganancia en tensión:

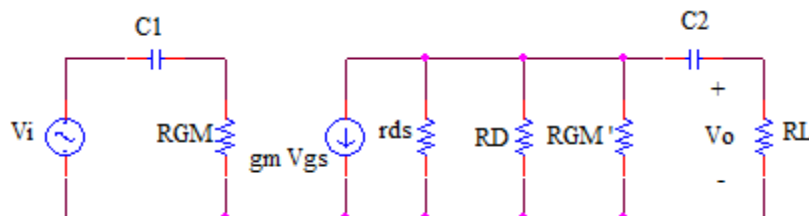
Analítica	Simulada
3,34	2,47

**PROBLEMA 26. Respuesta en frecuencia de un Amplificador surtidor común****Enunciado:**

Determinar la frecuencia de corte inferior del ejercicio anterior si  $C_1 = 0,1 \mu F$  y  $C_2 = 0,01 \mu F$ .

**Solución analítica:**

Para determinar la frecuencia de corte inferior, vamos a obtener el circuito a frecuencias bajas, que es igual que el modelo en alterna pero sin cortocircuitar los condensadores:



$$A_v(j\omega) = A_{vm} \frac{j\omega}{j\omega + \omega_{P1}} \frac{j\omega}{j\omega + \omega_{P2}}$$

$$A_{vm} = 20 \log|A_v| = 20 \log|3,34| = 10,47 \text{ dB}$$

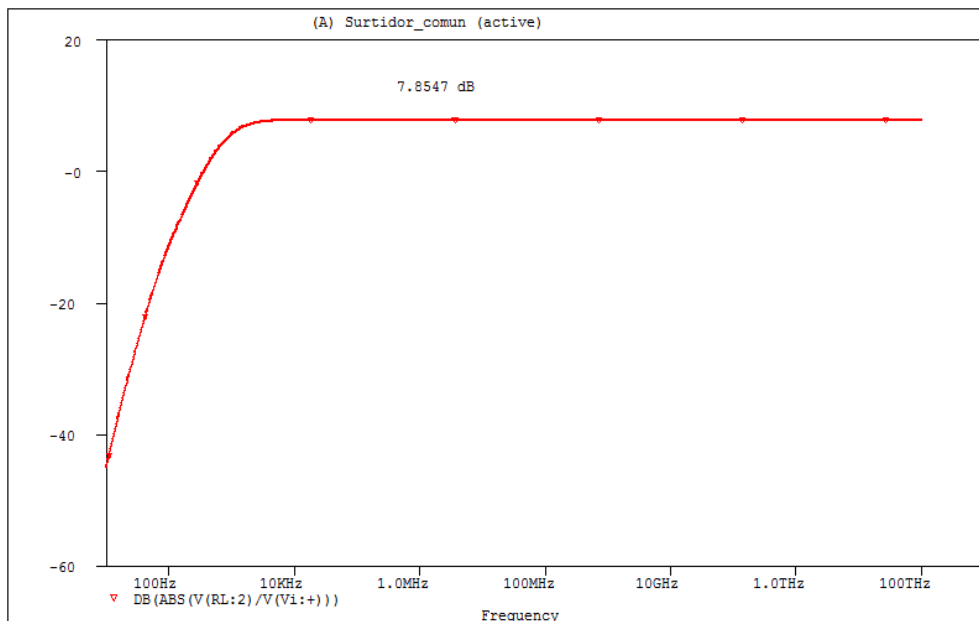
$$\text{Para } C_2 = \infty; \omega_{P1} = \frac{1}{C_1 (R_{GM})} = \frac{1}{0,1 \mu F (1,4 \text{ M}\Omega)} = 7,14 \text{ rad/s}$$

$$\text{Para } C_1 = \infty; \omega_{P2} = \frac{1}{C_2 (R_{GM} + R_L)} = \frac{1}{0,01 \mu F (8,6 \text{ M}\Omega + 10 \text{ K}\Omega)} = 11,61 \text{ rad/s}$$

$$W_L = \sqrt{w_{P1}^2 + w_{P2}^2} = \sqrt{7,14^2 + 11,61^2} = 13,63 \text{ rad/s}$$

$$f_{CL} = \frac{1}{2\pi \text{ rad}} 13,63 \text{ rad/s} = 2,16 \text{ Hz}$$

### Simulación con Pspice:



$$A_{vm} = 7,8547 \text{ dB}$$

### Comparación de resultados:

- Ganancia en decibelios:

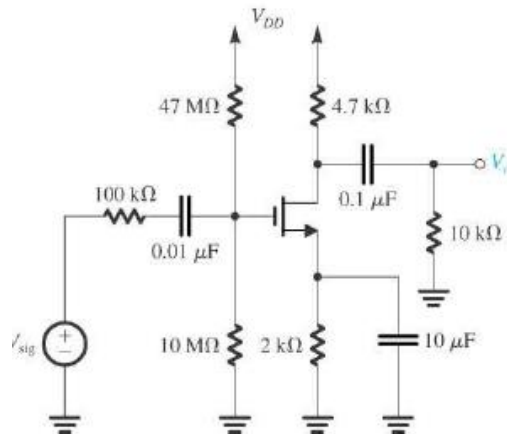
Analítica	Simulada
10,47	7,8547

### PROBLEMA 27. Amplificador surtidor común por divisor de tensión

#### Enunciado:

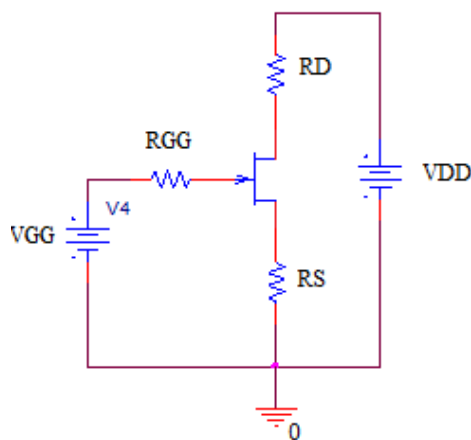
En el amplificador de la figura, se conoce  $V_{TN} = 1V$ ,  $K_N = 2 \text{ mA/V}^2$ ,  $V_{DD} = 15V$  y  $\lambda = 0,01 \text{ V}^{-1}$ . Determinar:

- Punto de polarización del transistor.
- Ganancia en tensión, la impedancia de entrada y de salida.



### Solución analítica:

Para el punto de polarización analizamos el circuito en continua y simplificamos el circuito mediante el método de Thevenin:



$$V_{GG} = \frac{10M\Omega}{47M\Omega + 10M\Omega} \cdot 15V = 2,63V;$$

$$R_{GG} = \frac{10M\Omega \cdot 47M\Omega}{10M\Omega + 47M\Omega} = 8,25M\Omega;$$

Planteamos las ecuaciones del circuito:

$$V_{DD} = R_D I_D + R_S I_D + V_{DS}$$

$$V_{GG} = R_{GG} I_G + V_{GS} + R_S I_D$$

$$I_D = \frac{K_N}{2} (V_{GS} - V_{TN})^2; \text{ si } V_{DS} > V_{GS} - V_{TN}$$

Sustituimos  $I_D$  en la segunda ecuación y obtenemos el valor de  $V_{GS}$  ya que sabemos que  $I_G = 0$  y el resto de datos los conocemos:

$$V_{GG} = V_{GS} + R_S \frac{K_N}{2} (V_{GS} - V_{TN})^2$$

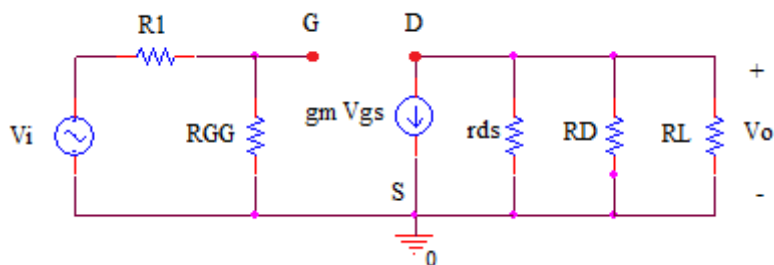
$$V_{GS} = 1,68 V$$

Una vez calculado el valor de  $V_{GS}$ , ya podemos conocer el punto de polarización del transistor:

$$I_D = \frac{2 mA/V^2}{2} (1,68 - 1V)^2 = 0,46 mA$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S) = 15V - 0,46 mA \cdot (4,7K\Omega + 2K\Omega) = 11,92 V$$

Para calcular la ganancia y las impedancias de entrada y salida, vamos a obtener el equivalente Norton del circuito en alterna, por tanto los condensadores y las fuentes de tensión continua se cortocircuitan:



$$gm = K_N (V_{GS} - V_{TN}) = 2 mA/V^2 (1,68V - 1V) = 1,36 mA/V$$

$$r_{ds} = \frac{1}{\lambda I_D} = \frac{1}{0,01 V^{-1} \cdot 0,46 mA} = 217,4 K\Omega$$

$$Z_i = R_1 + R_{GG} = 100 K\Omega + 8,25 M\Omega = 8,35 M\Omega$$

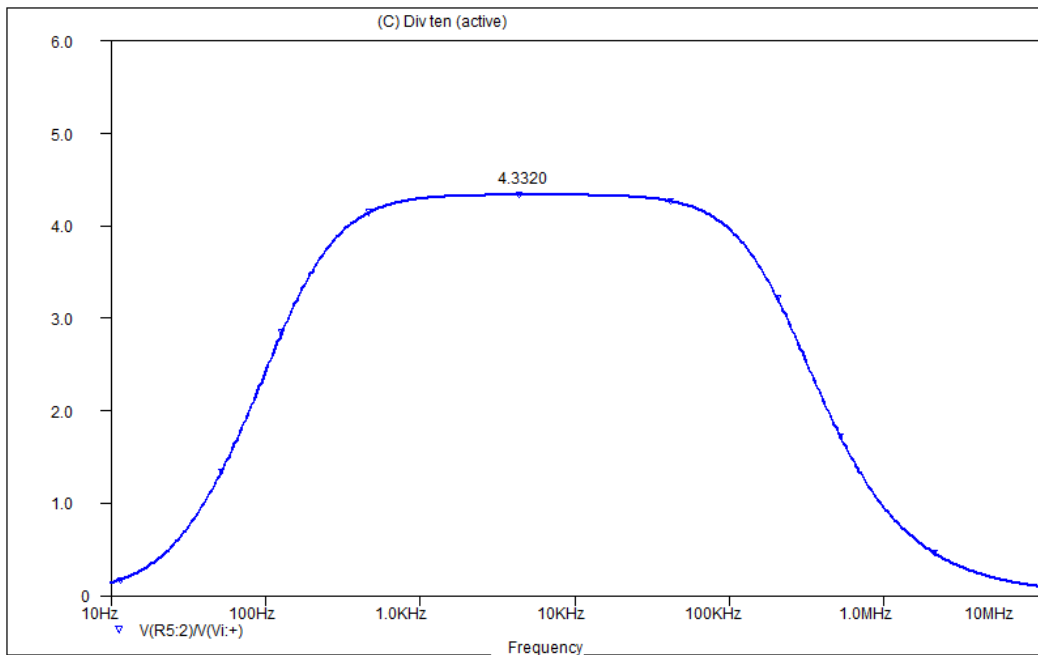
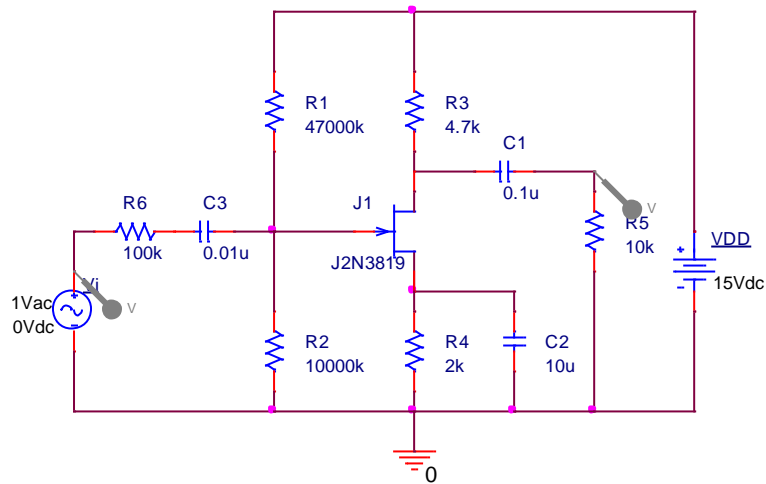
$$Z_o = r_{ds} // R_D // R_L = 217,4 K\Omega // 4,7 K\Omega // 10 K\Omega = 3,15 K\Omega$$



$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{g_m V_{GS} Z_o}{V_i} = \frac{g_m I_i R_{GG} Z_o}{V_i} = \frac{g_m \frac{V_i}{Z_i} R_{GG} Z_o}{V_i} = \frac{g_m R_{GG} Z_o}{Z_i}$$

$$A_v = \frac{1,36 \text{ mA/V} \cdot 8,25 \text{ M}\Omega \cdot 3,15 \text{ K}\Omega}{8,35 \text{ M}\Omega} = 4,23$$

**Simulación con Pspice:**



$A_v = 4,332$

**Comparación de resultados:**

- Ganancia en tensión:

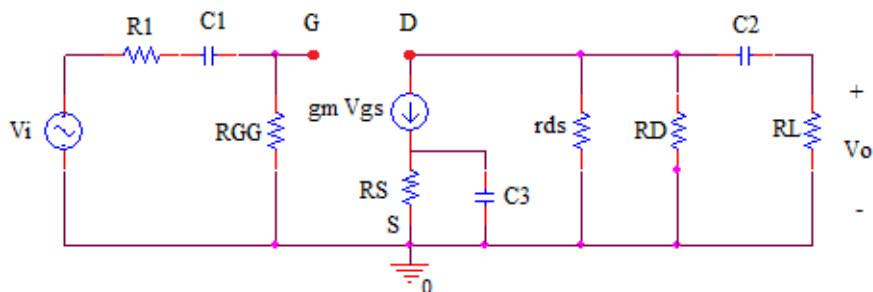
Analítica	Simulada
4,23	4,332

**PROBLEMA 28. Respuesta en frecuencia Amplificador surtidor común por divisor de tensión****Enunciado:**

Determinar la frecuencia de corte inferior del ejercicio anterior.

**Solución analítica:**

Para determinar la frecuencia de corte inferior, vamos a obtener el circuito a frecuencias bajas, que es igual que el modelo en alterna pero sin cortocircuitar los condensadores:



$$Av(j\omega) = Avm \frac{j\omega}{j\omega + \omega_{P1}} \frac{j\omega}{j\omega + \omega_{P2}} \frac{j\omega}{j\omega + \omega_{P3}}$$

$$Avm = 20 \log|Av| = 20 \log|6,18| = 15,81 \text{ dB}$$

$$\omega_{P1} \begin{matrix} C_2 = \infty \\ C_3 = \infty \end{matrix} = \frac{1}{C_1 (R_1 + R_{GG})} = \frac{1}{0,01 \mu F (100 \text{ K}\Omega + 8,25 \text{ M}\Omega)} = 11,97 \text{ rad/s}$$

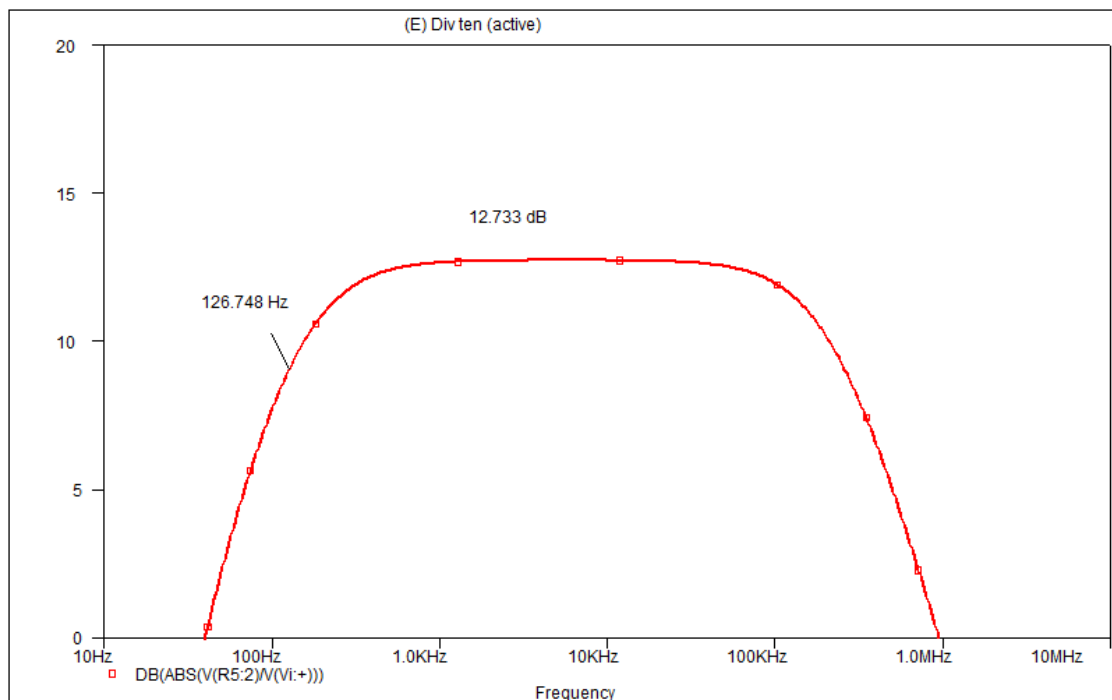
$$\omega_{P2} \begin{matrix} C_1 = \infty \\ C_3 = \infty \end{matrix} = \frac{1}{C_2 (r_{ds} // R_D + R_L)} = \frac{1}{0,1 \mu F (4,6 \text{ M}\Omega + 10 \text{ K}\Omega)} = 684,93 \text{ rad/s}$$

$$w_{P3} \underset{C_2=\infty}{C_1=\infty} = \frac{1}{C_3 (r_{ds} // (R_D // R_L))} = \frac{1}{10\mu F (2K\Omega // 4,6K\Omega)} = 71,74 \text{ rad/s}$$

$$W_L = \sqrt{w_{P1}^2 + w_{P2}^2 + w_{P3}^2} = \sqrt{11,97^2 + 684,93^2 + 71,74^2} = 688,78 \text{ rad/s}$$

$$f_{CL} = \frac{1}{2\pi \text{ rad}} 688,78 \text{ rad/s} = 109,62 \text{ Hz}$$

### Simulación con Pspice:



$$A_{vm} = 12,733 \text{ dB}$$

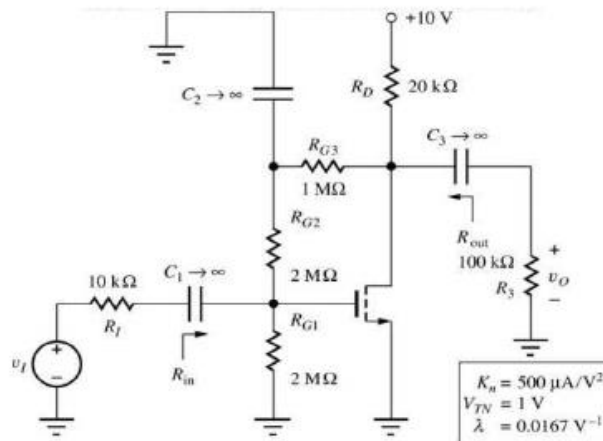
### Comparación de resultados:

	Analítica	Simulada
$ A_{vm}  \text{ (dB)}$	15,81	12,733
$f_{CL} \text{ (Hz)}$	109,62	126,748

**PROBLEMA 29. Amplificador surtidor común por resistencia de drenador****Enunciado:**

En el circuito de la figura calcular:

- Punto de polarización del transistor.
- Ganancia en tensión, la impedancia de entrada y de salida.

**Solución analítica:**

Para hallar el punto de polarización, planteamos las ecuaciones por el método de las mallas:

$$V_{DS} = I_1(R_{G2} + R_{G3}) + V_{GS}$$

$$V_{DD} = I_D R_D + V_{DS}$$

$$V_{GS} = I_1 R_{G1}$$

Ahora vamos a plantear las ecuaciones de las intensidades del circuito:

$$I_1 = \frac{V_{DS}}{R_{G1} + R_{G2} + R_{G3}}$$

$$I_D = \frac{K_N}{2} (V_{GS} - V_{TN})^2; \text{ si } V_{DS} > V_{GS} - V_{TN}$$

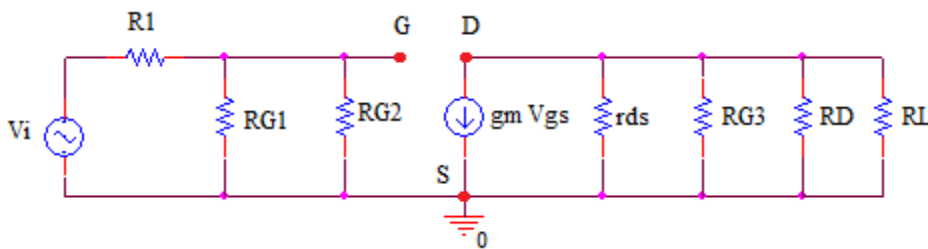
Si sustituimos  $I_1$  e  $I_D$  en las ecuaciones deducidas por el método de las mallas, obtenemos el valor de  $V_{DS}$  y  $V_{GS}$ :

$$V_{DS} = 5 V; \quad V_{GS} = 2 V;$$

Como  $V_{DS} > V_{GS} - V_{TN}$  entonces sabemos que ecuación tenemos que utilizar para calcular  $I_D$ :

$$I_D = \frac{K_N}{2} (V_{GS} - V_{TN})^2 = \frac{500 \mu A/V^2}{2} (2 V - 1 V)^2 = 250 \mu A$$

Para calcular la ganancia y las impedancias de entrada y salida, vamos a obtener el equivalente Norton del circuito en alterna, por tanto los condensadores y las fuentes de tensión continua se cortocircuitan:



$$gm = K_N (V_{GS} - V_{TN}) = 500 \mu A/V^2 (2V - 1V) = 500 \mu A/V$$

$$r_{ds} = \frac{1}{\lambda I_D} = \frac{1}{0,0167 V^{-1} \cdot 250 \mu A} = 239,52 K\Omega$$

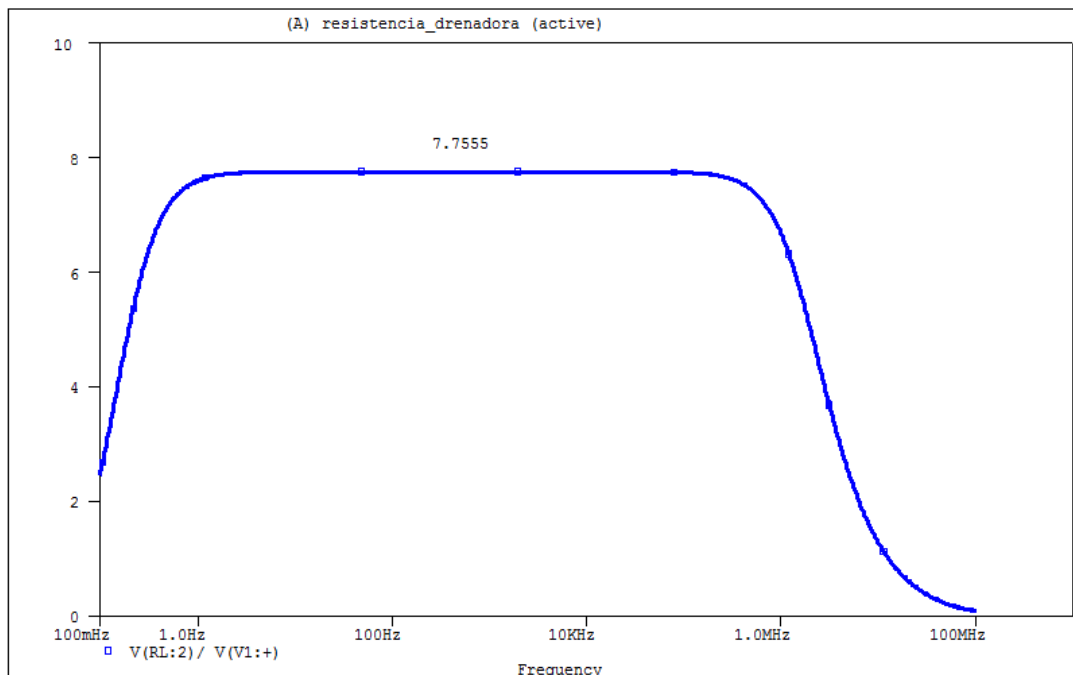
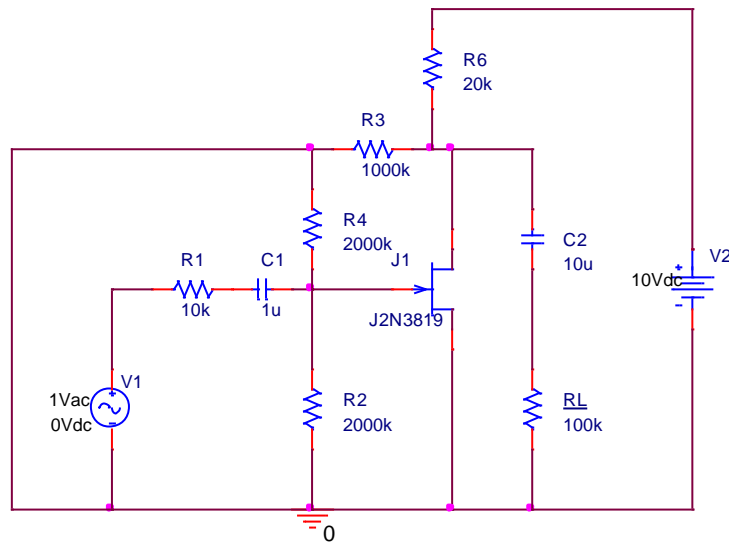
$$Z_i = R_1 + (R_{G1} // R_{G2}) = 10K\Omega + 1M\Omega = 1,01M\Omega$$

$$Z_o = r_{ds} // R_{G3} // R_D // R_L = 15,34 K\Omega$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{gm V_{GS} Z_o}{V_i} = \frac{gm I_i (R_{G1} // R_{G2}) Z_o}{V_i} = \frac{gm \frac{V_i}{Z_i} (R_{G1} // R_{G2}) Z_o}{V_i}$$

$$A_v = \frac{gm (R_{G1} // R_{G2}) Z_o}{Z_i} = \frac{500 \mu A/V \cdot 1 M\Omega \cdot 15,34 K\Omega}{1,01 M\Omega} = 7,59$$

**Simulación con Pspice:**



$$A_v = 7,7555$$

**Comparación de resultados:**

- Ganancia en tensión:

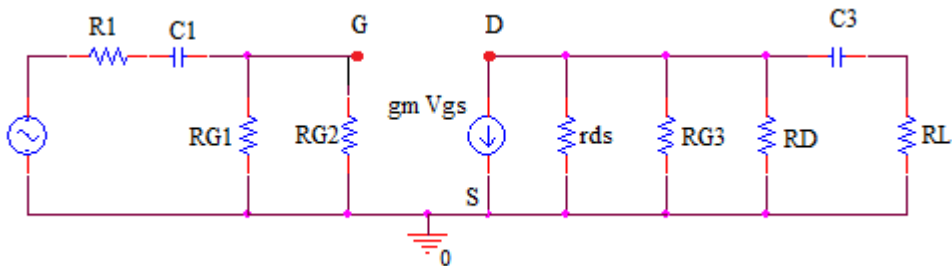
Analítica	Simulada
7,59	7,7555

**PROBLEMA 30. Respuesta en frecuencia y diagrama de bode****Enunciado:**

Frecuencia de corte inferior del ejercicio anterior si  $C_1 = 1\mu F$ ,  $C_2 = \infty$ ,  $C_3 = 10\mu F$  y representar el diagrama de bode del módulo de  $A_v$ .

**Solución analítica:**

Para determinar la frecuencia de corte inferior, vamos a obtener el circuito a frecuencias bajas, que es igual que el modelo en alterna pero sin cortocircuitar los condensadores:



$$A_v(j\omega) = A_{vm} \frac{j\omega}{j\omega + \omega_{P1}} \frac{j\omega}{j\omega + \omega_{P2}} \frac{j\omega}{j\omega + \omega_{P3}}$$

$$A_{vm} = 20 \log|A_v| = 20 \log|7,59| = 17,6 \text{ dB}$$

$$\text{Para } C_3 = \infty; \omega_{P1} = \frac{1}{C_1 (R_1 + (R_{G1} // R_{G2}))} = \frac{1}{1 \mu F (1,01 M\Omega)} = 0,99 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{P2} = 0; C_2 = \infty$$

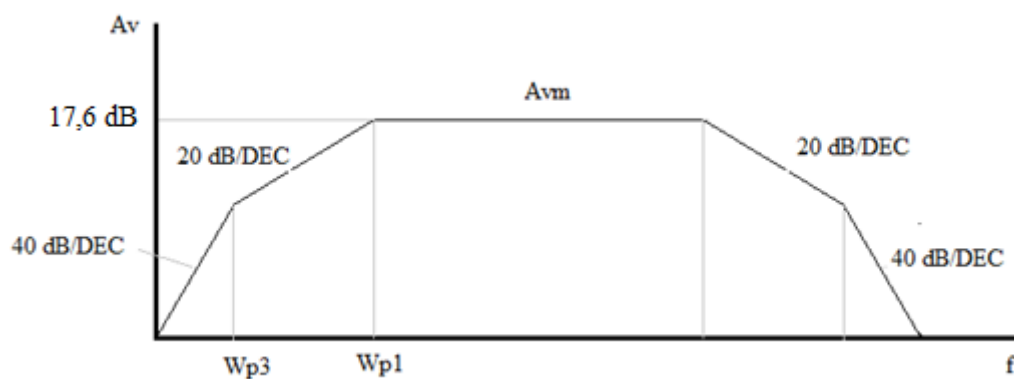
$$\text{Para } C_1 = \infty; w_{P3} = \frac{1}{C_3 ((r_{ds} // R_{G3} // R_D) + R_L)} = \frac{1}{10 \mu F (18,1 K\Omega + 100K\Omega)}$$

$$w_{P3} = 0,85 \text{ rad/s}$$

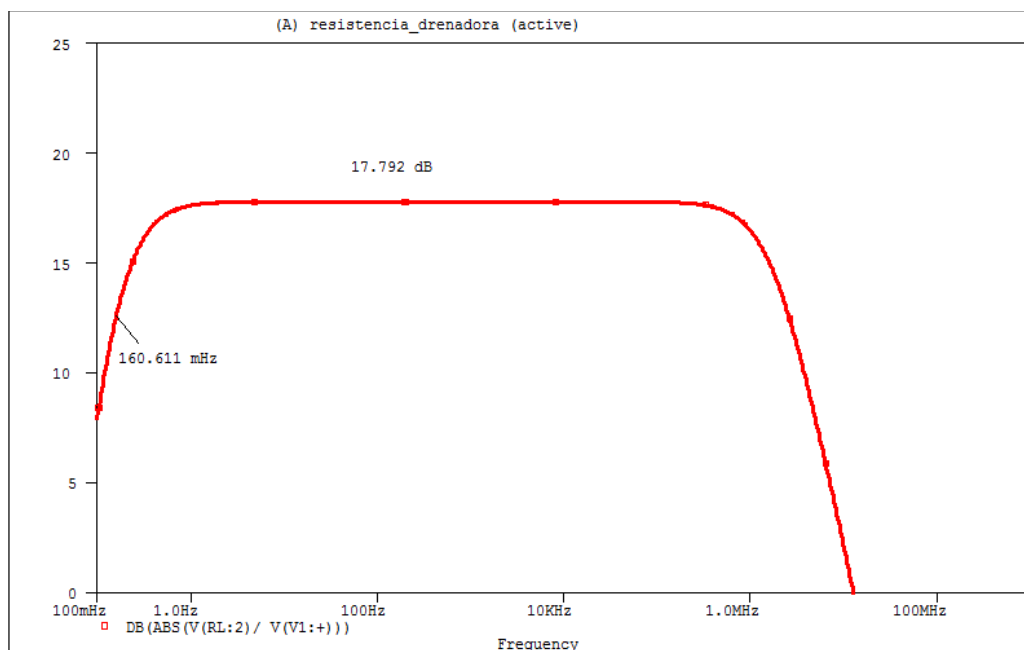
$$W_L = \sqrt{w_{P1}^2 + w_{P2}^2 + w_{P3}^2} = \sqrt{0,99^2 + 0,85^2} = 1,3 \text{ rad/s}$$

$$f_{CL} = \frac{1}{2\pi \text{ rad}} 1,3 \text{ rad/s} = 0,21 \text{ Hz}$$

Diagrama de Bode:



**Simulación con Pspice:**



$$A_{vm} = 17,792 \text{ dB} \quad F_{CL} = 0,1606 \text{ Hz}$$



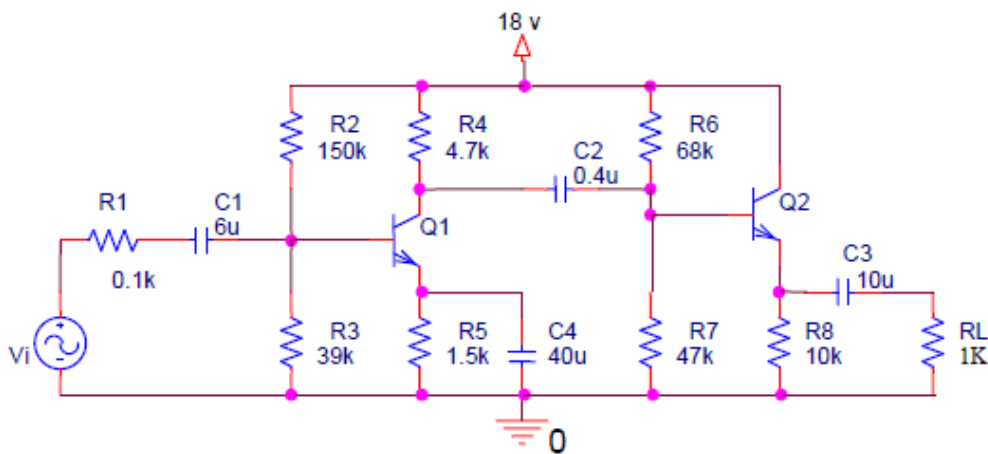
**Comparación de resultados:**

	<b>Analítica</b>	<b>Simulada</b>
$A_{vm} (dB)$	17,6	17,792
$F_{CL} (V)$	0,21	0,1606

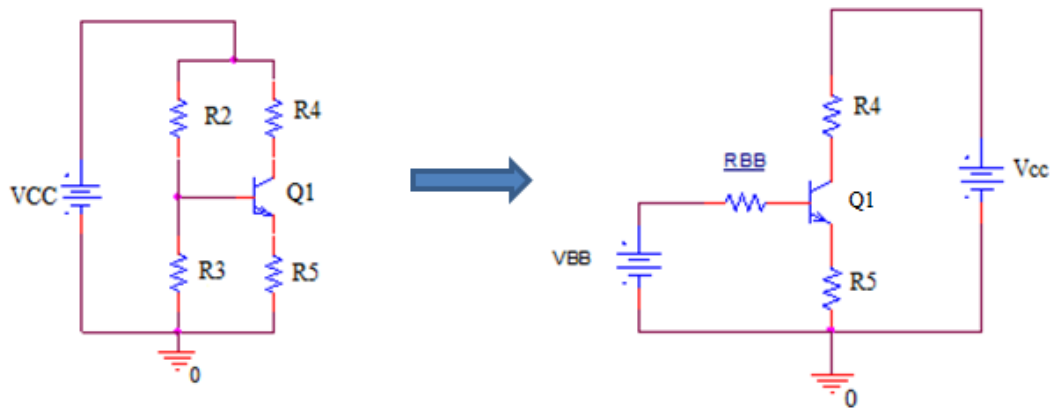
**PROBLEMA 31. Amplificador por etapas****Enunciado:**

En el circuito de la figura, con  $\beta_1 = 200$ ,  $\beta_2 = 100$ ,  $V_{BE} = 0,6 V$ , obtener:

- Punto de polarización de los transistores.
- Ganancia en tensión, la impedancia de entrada del circuito completo, así como la de cada etapa.

**Solución analítica:**

Para encontrar el punto de polarización de los transistores vamos a analizar el circuito en continua, por tanto los condensadores se comportan como circuitos abiertos y como son de polarización por divisor de tensión, podemos simplificar el circuito usando el método de Thevenin:

Transistor 1

$$V_{BB1} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} V_{CC} = \frac{39 \text{ K}\Omega}{150 \text{ K}\Omega + 39 \text{ K}\Omega} 18\text{V} = 3,71 \text{ V}$$

$$R_{BB1} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{150 \text{ K}\Omega \cdot 39 \text{ K}\Omega}{150 \text{ K}\Omega + 39 \text{ K}\Omega} = 31 \text{ K}\Omega$$

Obtenemos las siguientes ecuaciones del circuito ya simplificado. Como  $I_b$  va a tener un valor muy pequeño, podemos considerar que  $I_E \approx I_C$ :

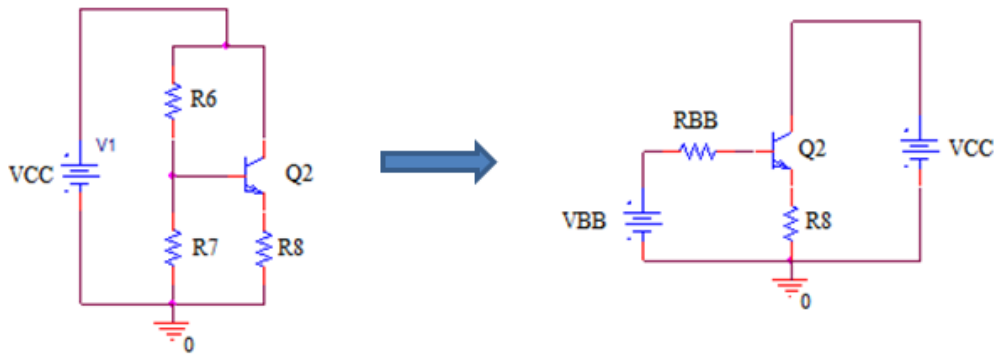
$$I_{C1} = \beta I_{B1};$$

$$V_{BB1} = R_{BB1} I_{B1} + V_{BE} + I_{C1} R_5;$$

$$V_{CC} = I_{C1} R_4 + I_{C1} R_5 + V_{CE1};$$

$$I_{C1} = \frac{V_{BB1} - V_{BE}}{R_5 + \frac{R_{BB1}}{\beta}} = \frac{3,71\text{V} - 0,6\text{V}}{1,5 \text{ K}\Omega + \frac{31 \text{ K}\Omega}{200}} = 1,87 \text{ mA}$$

$$V_{CE1} = V_{CC} - I_{C1} (R_4 + R_5) = 18\text{V} - 1,87 \text{ mA} (4,7 \text{ K}\Omega + 1,5 \text{ K}\Omega) = 6,4 \text{ V}$$

**Transistor 2**

$$V_{BB2} = \frac{R_7}{R_6 + R_7} V_{CC} = \frac{47 \text{ K}\Omega}{68 \text{ K}\Omega + 47 \text{ K}\Omega} 18\text{V} = 7,35 \text{ V}$$

$$R_{BB2} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{68 \text{ K}\Omega \cdot 47 \text{ K}\Omega}{68 \text{ K}\Omega + 47 \text{ K}\Omega} = 27,8 \text{ K}\Omega$$

Obtenemos las siguientes ecuaciones del circuito ya simplificado. Como  $I_b$  va a tener un valor muy pequeño, podemos considerar que  $I_E \approx I_C$ :

$$I_{C2} = \beta I_{B2};$$

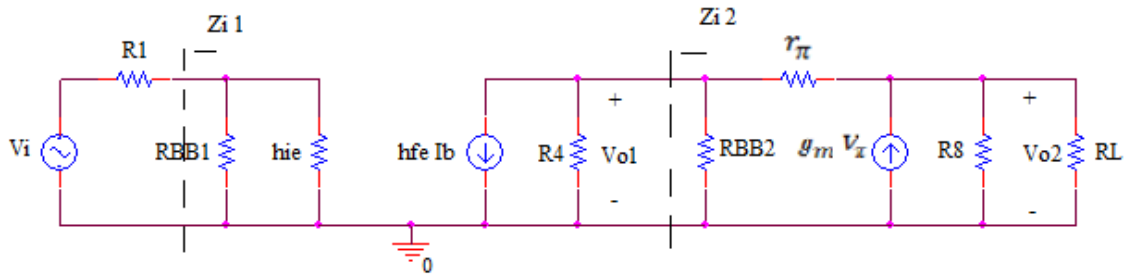
$$V_{BB2} = R_{BB2} I_{B2} + V_{BE} + I_{C2} R_8;$$

$$V_{CC} = I_{C2} R_8 + V_{CE};$$

$$I_{C2} = \frac{V_{BB2} - V_{BE}}{R_8 + \frac{R_{BB2}}{\beta}} = \frac{7,35\text{V} - 0,6\text{V}}{10 \text{ K}\Omega + \frac{27,8 \text{ K}\Omega}{100}} = 0,65 \text{ mA}$$

$$V_{CE2} = V_{CC} - I_{C2} R_8 = 18\text{V} - 0,65 \text{ mA} (10 \text{ K}\Omega) = 11,5 \text{ V}$$

Para hallar la ganancia en tensión, tenemos que hacer el modelo equivalente en alterna, en este caso los condensadores y las fuentes de tensión en continua actúan como cortocircuitos. El primer transistor se trata de un emisor común, por lo tanto vamos a usar parámetros  $h$  y para el segundo transistor vamos a usar parámetros  $\pi$ , ya que se trata de un colector común:



### Transistor 1

$$hfe = \beta_1; hie = hfe \frac{V_T}{I_{C1}} = 200 \frac{25 \text{ mV}}{1,87 \text{ mA}} = 2,67 \text{ K}\Omega$$

$$Zi1 = \frac{V_i}{i_i}_{V_{o1}=0} = R_{BB1} // hie = 31 \text{ K}\Omega // 2,67 \text{ K}\Omega = 2,46 \text{ K}\Omega$$

$$Zi' = Zi + R_1 = 2,46 \text{ K}\Omega + 0,1 \text{ K}\Omega = 2,56 \text{ K}\Omega$$

$$Av1 = \frac{V_{o1}}{V_i} = \frac{-hfe I_B R_4}{V_i} = \frac{-hfe \frac{V_i}{Zi'} R_4}{V_i} = \frac{-hfe R_4}{Zi'} = \frac{-200 \cdot 4,7 \text{ K}\Omega}{2,56 \text{ K}\Omega} = -367,2$$

### Transistor 2

$$r_\pi = \beta \frac{V_T}{I_{C2}} = 100 \frac{25 \text{ mV}}{0,65 \text{ mA}} = 3,85 \text{ K}\Omega; \quad gm = \frac{I_{C2}}{V_T} = \frac{0,65 \text{ mA}}{25 \text{ mV}} = 0,026 \frac{1}{\Omega}$$

$$Zi2_{V_{o2}=0} = (R_{BB2} // r_\pi)_{R_{BB2} \gg r_\pi} \approx r_\pi = 2 \text{ K}\Omega$$

$$Av2 = \frac{V_{o2}}{V_{o1}}$$

$$V_{o2} = \left( \frac{V_\pi}{r_\pi} + gm V_\pi \right) R_8 = V_\pi \left( \frac{1}{r_\pi} + gm \right) R_8;$$

$$V_\pi = V_{o1} - V_{o2};$$

Despejando  $V_\pi$  en la primera ecuación, ya lo dejamos todo en función de  $V_{o1}$  y  $V_{o2}$  y por tanto obtener el valor de la ganancia en tensión:

$$V_{o2} = (V_{o1} - V_{o2}) \left( \frac{1}{r_{\pi}} + g_m \right) R_8;$$

$$V_{o2} \left( 1 + \left( \frac{1}{r_{\pi}} + g_m \right) R_8 \right) = V_{o1} \left( \frac{1}{r_{\pi}} + g_m \right) R_8;$$

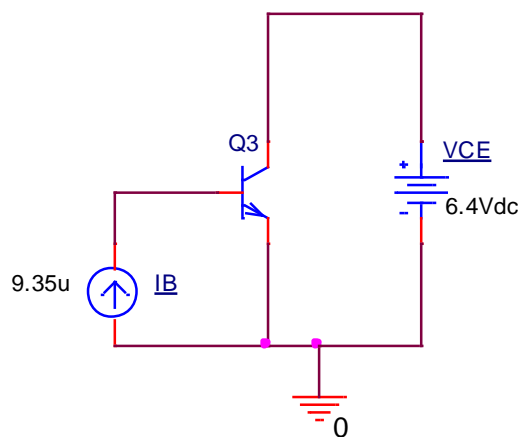
$$Av2 = \frac{V_{o2}}{V_{o1}} = \frac{\left( \frac{1}{r_{\pi}} + g_m \right) R_8}{1 + \left( \frac{1}{r_{\pi}} + g_m \right) R_8} = \frac{\left( \frac{1}{3,85 \text{ K}\Omega} + 0,026 \frac{1}{\Omega} \right) 10 \text{ K}\Omega}{1 + \left( \frac{1}{3,85 \text{ K}\Omega} + 0,026 \frac{1}{\Omega} \right) 10 \text{ K}\Omega} = 0,99$$

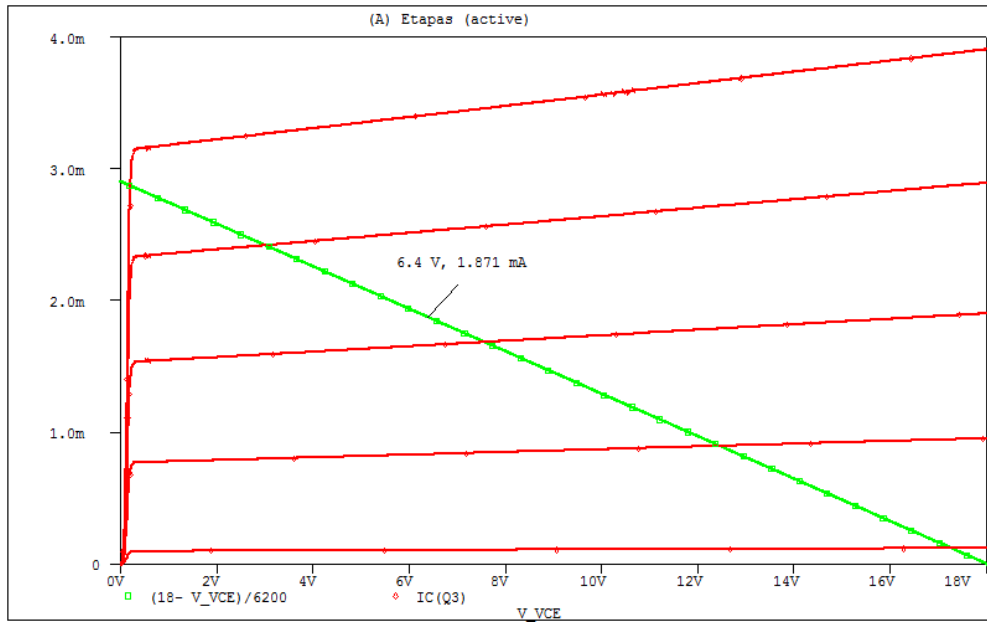
Por tanto, el valor de la ganancia del circuito completo será el producto de las ganancias de los transistores:

$$Av = Av1 \cdot Av2 = -367,2 \cdot 0,99 = -364,53$$

### **Simulación con Pspice:**

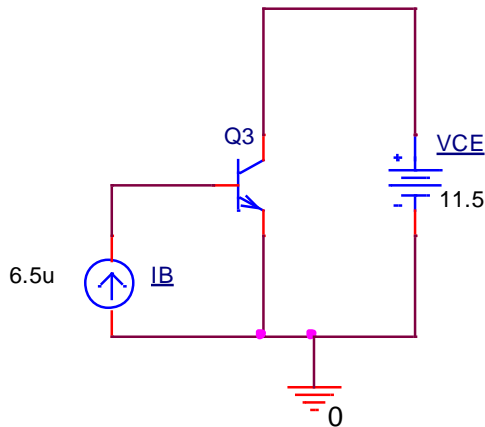
- Punto de polarización transistor 1:

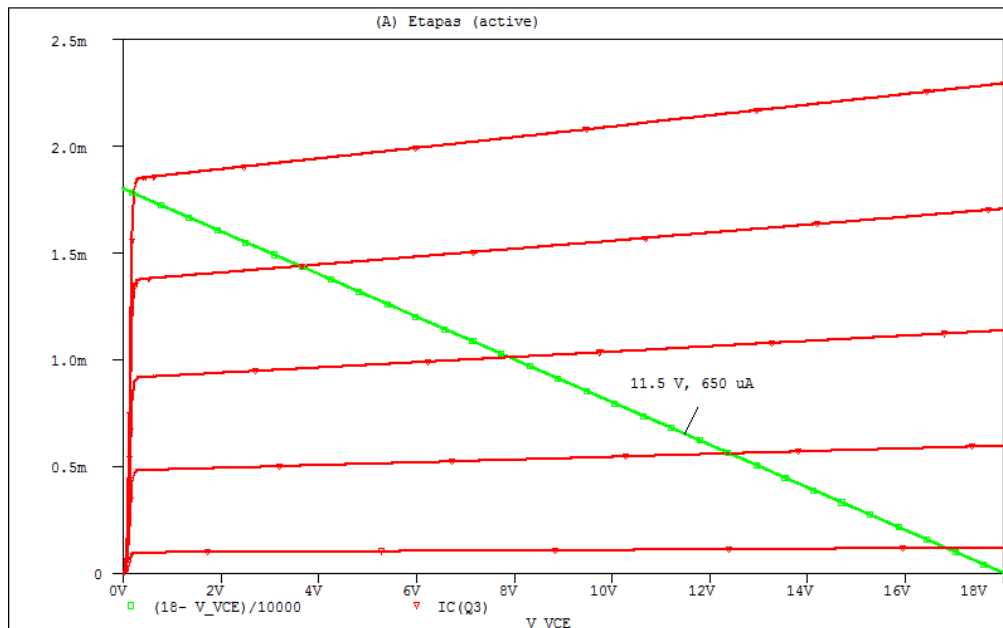




$$V_{CE} = 6,4 V \quad I_C = 1,871 mA$$

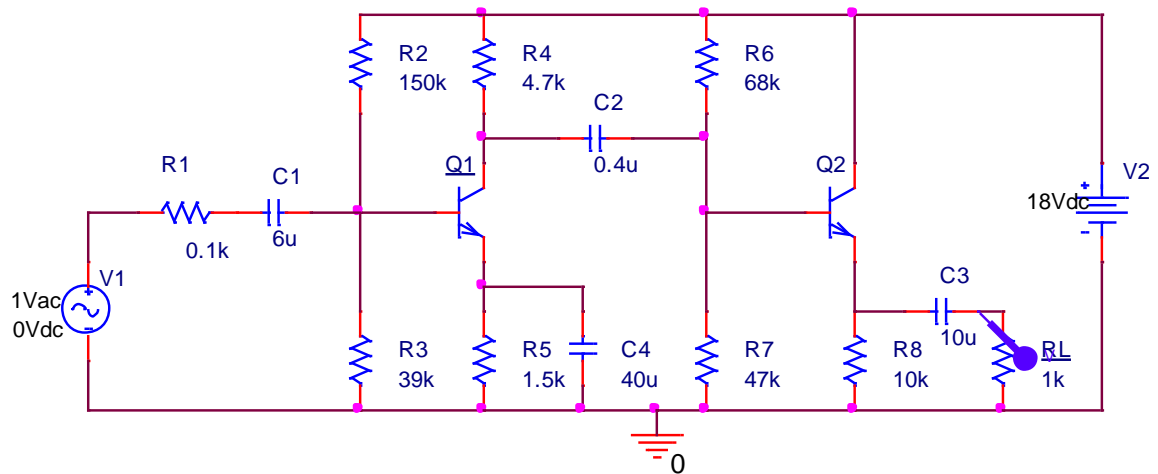
- Punto de polarización transistor 2:

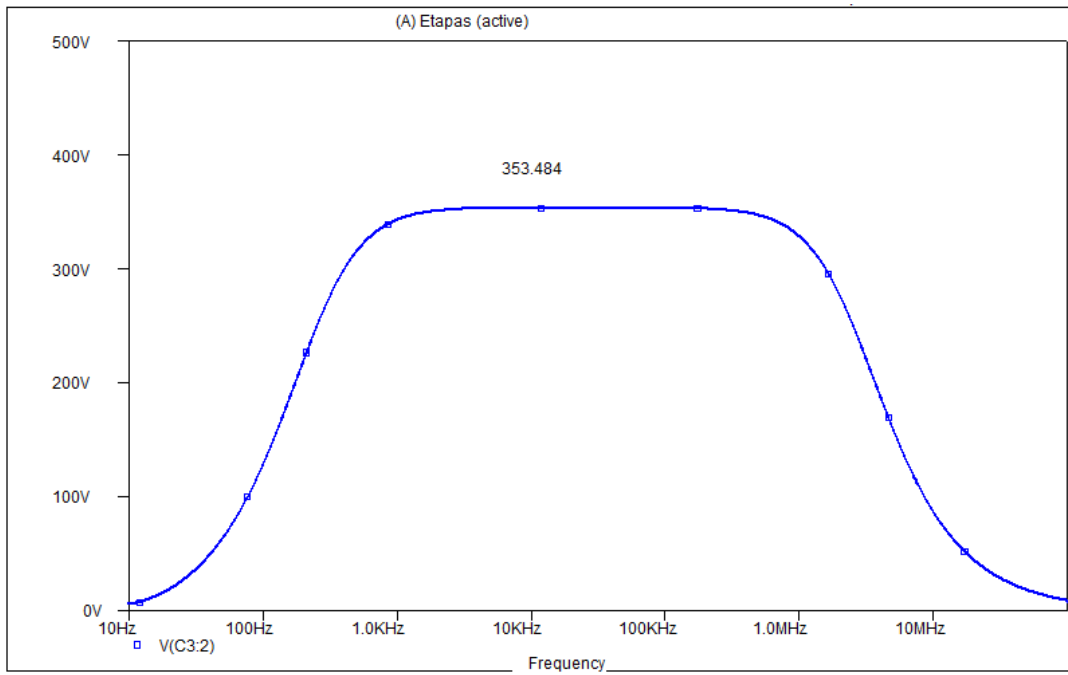




$$V_{CE} = 11,5\text{ V} \quad I_C = 650\text{ }\mu\text{A}$$

- Ganancia en tensión:





$$|Av| = 353,484$$

### Comparación de resultados:

- Punto de polarización transistor 1:

	Analítica	Simulada
$I_{CQ}$ (mA)	1,87	1,871
$V_{CEQ}$ (V)	6,4	6,4

- Punto de polarización transistor 2:

	Analítica	Simulada
$I_{CQ}$ (mA)	0,65	0,65
$V_{CEQ}$ (V)	11,5	11,5



- Ganancia en tensión:

Analítica	Simulada
364,53	353,484

### Nomenclatura

$V_{CC}$ : Tensión de alimentación en continua (V).

$V_{BE}$ : Tensión Base-Emisor (V).

$V_{CE}$ : Tensión Colector-Emisor (V).

$V_{BB}$ : Tensión Thevenin (V).

$V_{DD}$ : Tensión de alimentación en continua (V).

$V_{GS}$ : Tensión Puerta-Surtidor (V).

$V_{DS}$ : Tensión Drenador-Surtidor (V).

$V_{GG}$ : Tensión Thevenin (V).

$V_O$ : Tensión de salida (V).

$V_i$ : Tensión de entrada (V).

$V_{TN}$ : Tensión característica del FET (V).

$V_{\pi}$ : Tensión parámetros  $\pi$  (V).

$V_T$ : Tensión térmica (25mV).

$V_A$ : Tensión Early (V).

$A_v$ : Ganancia en tensión.

$A_i$ : Ganancia en intensidad.

$A_{vm}$ : Ganancia en decibelios (dB).

$I_C$ : Intensidad de Colector (A).

$I_B$ : Intensidad de Base (A).

$I_E$ : Intensidad de Emisor (A).

$I_D$ : Intensidad de Drenador (A)

$I_G$ : Intensidad de Puerta (A).

$R_{B1}$ : Resistencia de Base 1 ( $\Omega$ ).

$R_{B2}$ : Resistencia de Base 2( $\Omega$ ).

$R_{BB}$ : Resistencia equivalente de Base ( $\Omega$ ).

$R_C$ : Resistencia de Colector ( $\Omega$ ).

**$R_E$** : Resistencia de Emisor ( $\Omega$ ).

**$r_{ds}$** : Resistencia modelo equivalente Norton ( $\Omega$ ).

**$r_\pi$** : Resistencia parámetros  $\pi$  ( $\Omega$ ).

**$Z_i$** : Impedancia de entrada ( $\Omega$ ).

**$Z_o$** : Impedancia de salida ( $\Omega$ ).

**$g_m$** : Característica de la fuente de intensidad parámetros  $\pi$  (A/V).

**$\beta$** : Relación entre corriente de colector y corriente de base.

**$h_{fe}$** : Equivalente a  $\beta$  en los parámetros H.

**$h_{ie}$** : Resistencia de entrada en los parámetros H ( $\Omega$ ).

**$h_{oe}$** : Resistencia de salida en los parámetros H ( $\Omega$ ).

**$K_n$** : Característica de los transistores FET (A/V<sup>2</sup>).

**$\lambda$** : Característica de los transistores FET (V<sup>-1</sup>).

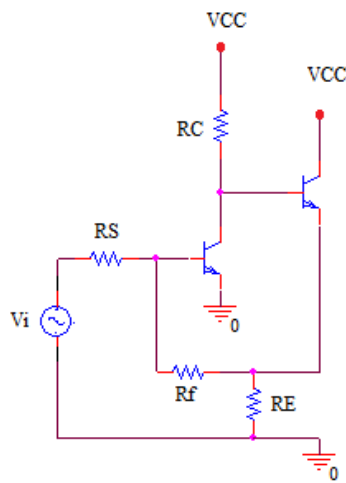
### 3.5. TEMA 5. AMPLIFICADORES RETROALIMENTADOS

#### PROBLEMA 32. Diseño diagrama de bloques

**Enunciado:**

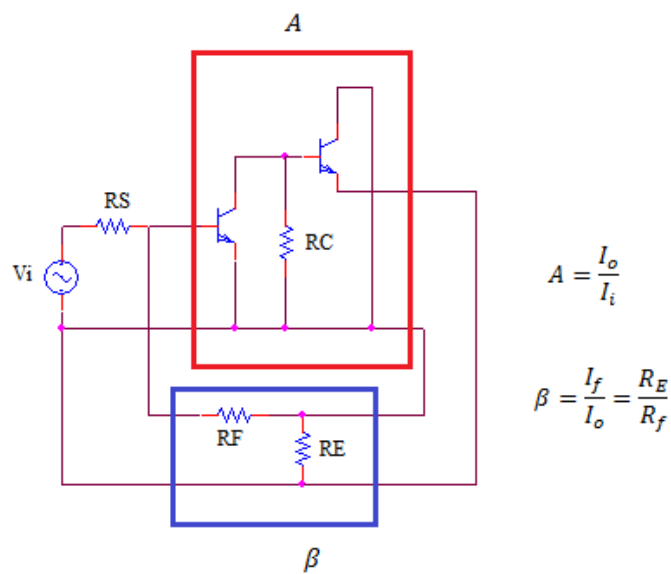
A partir del circuito de la de la figura, obtener:

- El diagrama de bloques del amplificador y de la realimentación.
- $A_f$ ,  $\beta_f$ ,  $Zi_f$  y  $Zo_f$  en función de  $A$  y  $\beta$ .



**Solución analítica:**

El diagrama de bloques del circuito sería el siguiente:



$$A_f = \frac{A}{1 + A\beta}$$

$$\beta_f = \beta (1 + A\beta)$$

$$Z_{i_f} = \frac{Z_i}{1 + A\beta}$$

$$Z_{o_f} = Z_o (1 + A\beta)$$

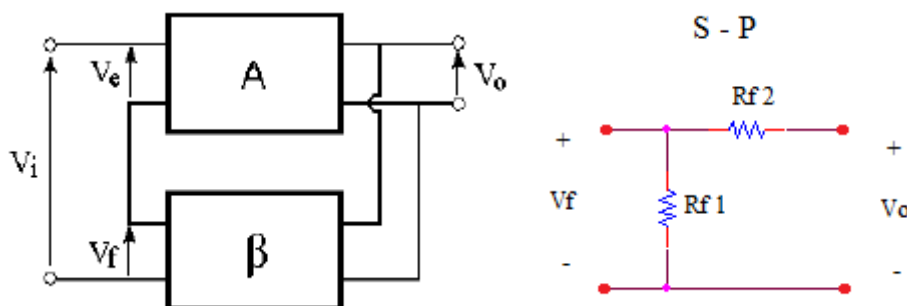
### PROBLEMA 33. Diseño amplificador retroalimentado S - P

#### Enunciado:

Tenemos un amplificador con las siguientes características:  $A_v = 10000$ ,  $Z_i = 10\text{ K}\Omega$ ,  $Z_o = 2\text{ K}\Omega$ ,  $BW = 2\text{ KHz}$  con  $F_L = 600\text{ Hz}$ . Se necesita aumentar el ancho de banda y la impedancia de entrada y disminuir la frecuencia de corte inferior y la impedancia de salida tal que:  $BW > 20\text{ KHz}$  con  $F_L < 20\text{ Hz}$ ,  $Z_i > 100\text{ K}\Omega$ ,  $Z_o < 50\Omega$ . Determinar el factor de realimentación necesario para que se cumplan las necesidades.

#### Solución analítica:

Necesitamos una retroalimentación serie-paralelo, ya que en serie aumentamos la impedancia y en paralelo la disminuimos:



$$\beta = \frac{V_F}{V_o} = \frac{R_{f1}}{R_{f1} + R_{f2}}$$

Vamos a aplicar las fórmulas con la retroalimentación ya aplicada:

$$F_{Lf} = \frac{F_L}{1 + Av \beta} ; 1 + Av \beta > \frac{F_L}{F_{Lf}} = \frac{600}{20} = 30$$

$$BW_f = BW(1 + Av \beta) ; 1 + Av \beta > \frac{BW_f}{BW} = \frac{20 \text{ KHz}}{2 \text{ KHz}} = 10$$

$$Z_{if} = Z_i(1 + Av \beta) ; 1 + Av \beta > \frac{Z_{if}}{Z_i} = \frac{100 \text{ K}\Omega}{10 \text{ K}\Omega} = 10$$

$$Z_{of} = Z_o \frac{1}{1 + Av \beta} = 1 + Av \beta > \frac{Z_o}{Z_{of}} = \frac{2 \text{ K}\Omega}{50 \Omega} = 40$$

Por lo tanto  $1 + Av \beta > 40$  , entonces vamos a asignarle un valor que cumpla es condición, por ejemplo  $1 + Av \beta = 50$  y despejamos  $\beta$ :

$$\beta = \frac{50 - 1}{Av} = \frac{49}{10000} = 4,9 \times 10^{-3}$$

### PROBLEMA 34. Diseño amplificador retroalimentado

#### **Enunciado:**

Se dispone de un amplificador de ganancia en tensión  $Av = 100\text{dB}$ , diseñado mediante transistores bipolares en varias etapas. El ancho de banda (BW) que proporciona es insuficiente y se necesita multiplicar su valor por 100, por lo que se aplica retroalimentación negativa al amplificador. Determinar:

- El factor de realimentación ( $\beta$ ).
- La ganancia del amplificador realimentado ( $Av_f$ ).
- La ganancia de lazo (T).
- El ancho de banda realimentado ( $BW_f$ ), si el amplificador es de acoplamiento directo y  $F_H = 100 \text{ Hz}$ .

**Solución analítica:**

Como nos dan la ganancia en dB, lo primer que vamos a hacer es pasarla a decimal:

$$A_{dB} = 100 \text{ dB} = 20 \log Av$$

$$A = 10^{100/20} = 10^5 = 100000$$

Nos dice que se necesita multiplicar el ancho de banda por 100, entonces vamos a calcular  $\beta$  siguiendo esta condición:

$$BW_f = BW (1 + A \beta) = BW 100 ;$$

$$1 + A \beta = 100 ; \beta = \frac{99}{100000} = 9,9 \times 10^{-4}$$

Para calcular la ganancia del amplificador realimentado, aplicamos la siguiente fórmula:

$$A_f = \frac{A}{1 + A \beta} = \frac{100000}{1 + 100000 \cdot 9,9 \times 10^{-4}} = 1000$$

La ganancia de lazo es el producto entre la ganancia del amplificador sin realimentar y el factor de realimentación:

$$T = A \beta = 100000 \cdot 9,9 \times 10^{-4} = 99$$

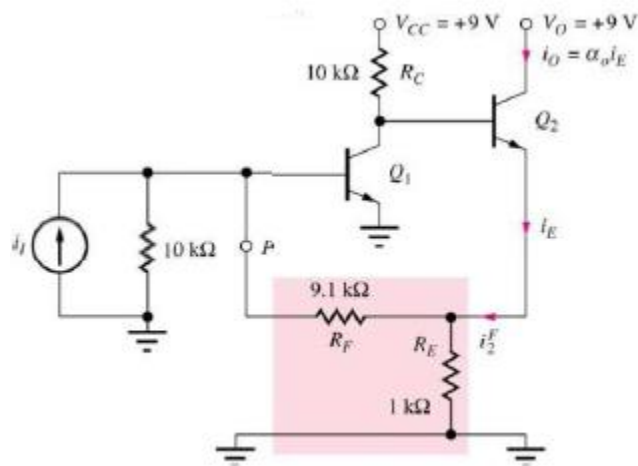
Ahora vamos a calcular el ancho de banda, como no nos dan la frecuencia de corte inferior suponemos que  $F_L = 0 \text{ Hz}$ :

$$BW = F_H - F_L = 100 \text{ Hz} - 0 \text{ Hz} = 100 \text{ Hz}$$

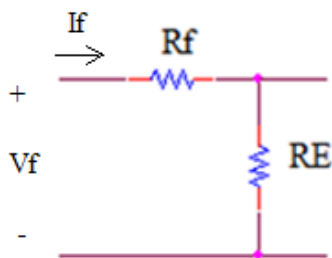
$$BW_f = BW (1 + A \beta) = 100 \text{ Hz} \cdot 100 = 10 \text{ KHz}$$

**PROBLEMA 35. Amplificador retroalimentado paralelo - serie****Enunciado:**

Del siguiente se conoce le punto de polarización de los transistores  $Q_1: V_{CE} = 2,3 V, I_C = 0,66 mA$  y  $Q_2: V_{CE} = 7,5 V, I_C = 1,6 mA$ . Se sabe también que  $\beta = 100, V_A = 100 V$ . Encontrar la ganancia (A), el factor de realimentación ( $\beta$ ), ganancia de lazo (T) y la impedancia de entrada ( $Z_i$ ) y de salida ( $Z_o$ ) del siguiente amplificador retroalimentado:

**Solución analítica:**

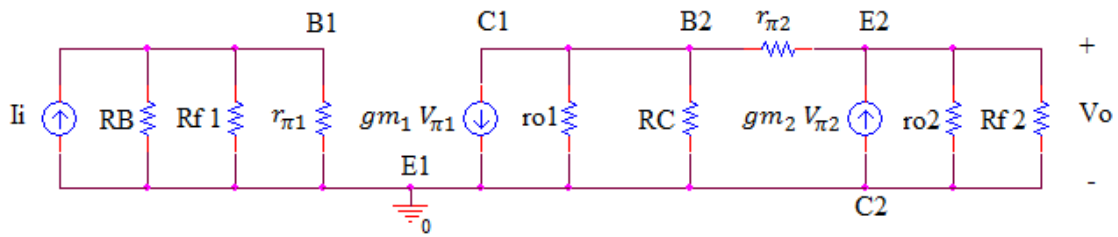
Se trata de un bloque de realimentación paralelo-serie, por tanto la ganancia y el factor de realimentación será:



$$A_I = \frac{I_o}{I_i}$$

$$\beta = \frac{I_F}{I_o} = \frac{R_E}{R_f}$$

Vamos a hacer el modelo equivalente en alterna para calcular la ganancia:



$$Rf_1 = \frac{V_F}{I_F}_{i_o=0} = R_f + R_E \quad ; \quad Rf_2 = \frac{V_o}{I_o}_{V_f=0} = R_f // R_E$$

$$r_\pi = \beta \frac{V_T}{I_C} \quad ; \quad gm = \frac{I_C}{V_T} \quad ; \quad r_o = \frac{V_A}{I_C}$$

	Transistor 1	Transistor 2
$r_\pi$	3,79 K $\Omega$	1,56 K $\Omega$
$gm$	26,4 ms	64ms
$r_o$	151,5 K $\Omega$	67,2 K $\Omega$
$R_f$	10,1 K $\Omega$	900 $\Omega$

$$Z_{i_{V_o=0}} = R_B // Rf_1 // r_{\pi 1} \approx 2,15 \Omega$$

$$A_{I1} = \frac{I_o}{I_i}$$

$$I_o = gm_2 V_{\pi 2} + \frac{V_{\pi 2}}{r_{\pi 2}} = V_{\pi 2} \left( gm_2 + \frac{1}{r_{\pi 2}} \right) = (V_{B2} - V_{E2}) \left( gm_2 + \frac{1}{r_{\pi 2}} \right) =$$

$$(I_{o1} R_C - I_o Rf_2) \left( gm_2 + \frac{1}{r_{\pi 2}} \right) = (-gm_1 V_{\pi 1} R_C - I_o Rf_2) \left( gm_2 + \frac{1}{r_{\pi 2}} \right) =$$

$$(-gm_1 Z_i I_i R_C - I_o Rf_2) \left( gm_2 + \frac{1}{r_{\pi 2}} \right);$$

$$I_o \left( 1 + Rf_2 \left( gm_2 + \frac{1}{r_{\pi 2}} \right) \right) = -I_i gm_1 Z_i R_C \left( gm_2 + \frac{1}{r_{\pi 2}} \right)$$

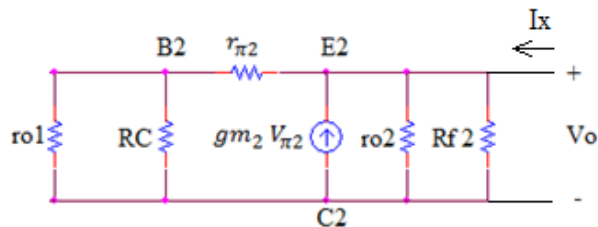


$$A_{I1} = \frac{I_o}{I_i} = \frac{-g_{m1} Z_i R_C \left( gm_2 + \frac{1}{r_{\pi 2}} \right)}{\left( 1 + R_{f2} \left( gm_2 + \frac{1}{r_{\pi 2}} \right) \right)} = -588$$

$$\beta = \frac{R_E}{R_f} = \frac{1 \text{ K}\Omega}{9,1 \text{ K}\Omega} = 0,11$$

$$T = A_I \beta = -588 \cdot 0,11 = -64,68$$

Para calcular la impedancia de salida tenemos que cortocircuitar la tensión de entrada, entonces nos quedaría el circuito así:



$$Z_o = \frac{V_o}{I_x \text{ } V_i=0}$$

$$I_x = -I_o \left( \frac{V_{\pi 2}}{r_{\pi 2}} + g_{m2} V_{\pi 2} \right) = -I_o V_{\pi 2} \left( \frac{1}{r_{\pi 2}} + g_{m2} \right) = -I_o I_{\pi 2} r_{\pi 2} \left( \frac{1}{r_{\pi 2}} + g_{m2} \right) =$$

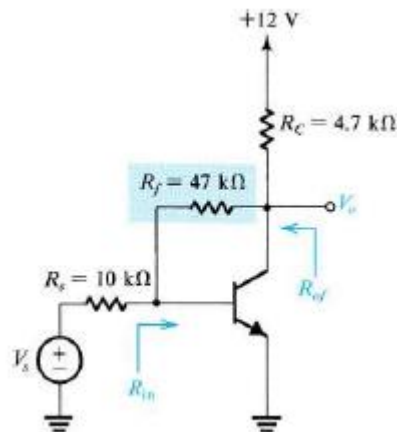
$$-I_o \frac{-V_o}{(r_{o1} // R_C) + r_{\pi 2}} r_{\pi 2} \left( \frac{1}{r_{\pi 2}} + g_{m2} \right) = \frac{V_o}{R_{f2}} + \frac{V_o}{(r_{o1} // R_C) + r_{\pi 2}} r_{\pi 2} \left( \frac{1}{r_{\pi 2}} + g_{m2} \right)$$

$$Z_o = \frac{1}{\frac{1}{R_{f2}} + \frac{1}{(r_{o1} // R_C) + r_{\pi 2}} r_{\pi 2} \left( \frac{1}{r_{\pi 2}} + g_{m2} \right)};$$

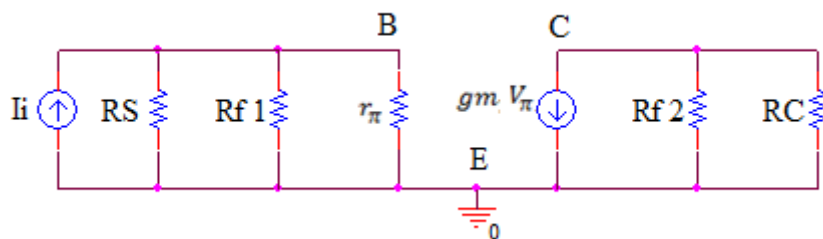
$$Z_o = \frac{R_{f2} ((r_{o1} // R_C) + r_{\pi 2})}{(r_{o1} // R_C) + r_{\pi 2} + R_{f2} (1 + g_{m2} r_{\pi 2})} = 96,82 \Omega$$

**PROBLEMA 36. Amplificador retroalimentado paralelo - paralelo****Enunciado:**

En el circuito de la figura obtener la transimpedancia, la ganancia en tensión y las impedancias de entrada y salida. Se sabe que  $\beta_{transistor} = 100$  y que el punto de polarización del transistor es  $Q_1: V_{CE} = 4,7 V, I_C = 1,5 mA$ .

**Solución anítica:**

Para calcular la transimpedancia, tenemos que pasar el circuito al modelo equivalente en alterna y obtener el equivalente Norton en  $V_s$ - $R_s$ :



$$r_{\pi} = \beta \frac{V_T}{I_C} = 100 \frac{25 \text{ mV}}{1,5 \text{ mA}} = 1666,66 \Omega$$

$$Z_{i \ V_o=0} = R_s // R_{f1} // r_{\pi} = 1,38 \text{ K}\Omega$$

$$Z_{o \ V_i=0} = R_{f2} // R_C = 4,3 \text{ K}\Omega$$

$$A_z = \frac{V_o}{I_i};$$

$$V_o = -gm V_\pi Z_o = -gm V_B Z_o = -gm I_i Z_i Z_o;$$

$$A_z = \frac{V_o}{I_i} = -gm Z_i Z_o = -0,06 \frac{1}{\Omega} \cdot 1,38 K\Omega \cdot 4,3 K\Omega = -356,04 K\Omega$$

Para calcular la ganancia en tensión vamos a hacerlo despejando de la fórmula de la transimpedancia:

$$A_z = \frac{V_o}{I_i} = \frac{V_o}{\frac{V_i}{Z_i}} ; \quad \frac{V_o}{V_i} = \frac{A_z}{Z_i} ;$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{A_z}{Z_i} = \frac{-356,04 K\Omega}{1,38 K\Omega} = -258$$

## NOMENCLATURA

**V<sub>o</sub>**: Tensión de salida (V).

**V<sub>i</sub>**: Tensión de entrada (V).

**V<sub>π</sub>**: Tensión parámetros π (V).

**V<sub>T</sub>**: Tensión térmica (25mV).

**I<sub>o</sub>**: Intensidad de salida (A).

**I<sub>i</sub>**: Intensidad de entrada (A).

**A<sub>v</sub>**: Ganancia en tensión.

**A<sub>i</sub>**: Ganancia en intensidad.

**A<sub>z</sub>**: Transimpedancia (Ω).

**Z<sub>i</sub>**: Impedancia de entrada (Ω).

**Z<sub>o</sub>**: Impedancia de salida (Ω).

**r<sub>π</sub>**: Resistencia parámetros π (Ω).

**g<sub>m</sub>**: Característica de la fuente de intensidad parámetros π (A/V).

**A<sub>vf</sub>**: Ganancia del amplificador realimentado.

**β**: Factor de realimentación.

**BW<sub>F</sub>**: Ancho de banda realimentado (Hz).

**Z<sub>IF</sub>**: Impedancia de entrada realimentada (Ω).

**Z<sub>OF</sub>**: Impedancia de salida realimentada (Ω).

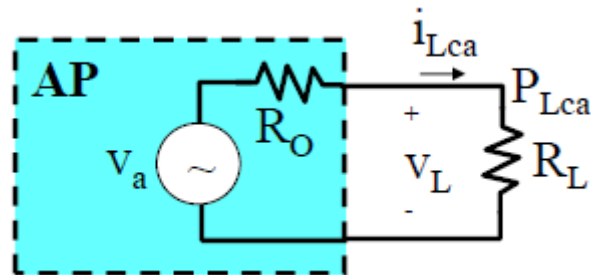
**T**: Ganancia de lazo.

### 3.6. TEMA 6. AMPLIFICADORES DE POTENCIA

#### PROBLEMA 37. Máxima transferencia de potencia

##### Enunciado:

Dado el circuito de la figura, calcular la potencia máxima entregada a la carga sabiendo que  $V_a = 50\text{ V}$  y  $R_L = 150\ \Omega$ :



##### Solución analítica:

La potencia entregada a la carga sería la siguiente:

$$P_{Lca} = V_L I_L = \frac{V_a R_L}{R_o + R_L} \frac{V_a}{R_o + R_L} = V_a^2 \frac{R_L}{(R_o + R_L)^2}$$

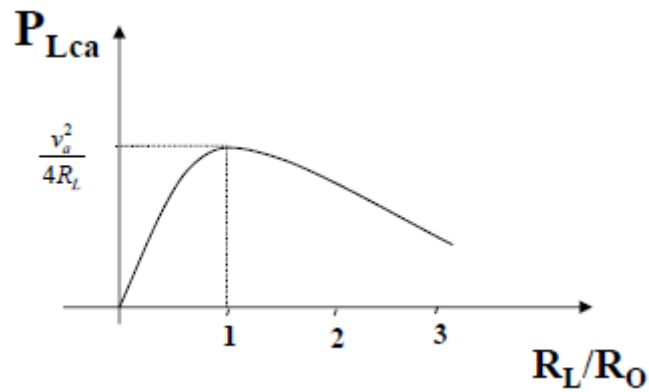
Para que ésta sea máxima, tenemos que hacer  $\frac{\partial P_{Lca}}{\partial R_L} = 0$ :

$$\frac{\partial P_{Lca}}{\partial R_L} = V_a^2 \frac{(R_o + R_L)^2 - 2 R_L (R_o + R_L)}{(R_o + R_L)^4} = 0$$

$$(R_o + R_L)^2 - 2 R_L (R_o + R_L) = 0; \quad R_L = R_o$$

Por tanto nos queda que la potencia máxima entregada a la carga es:

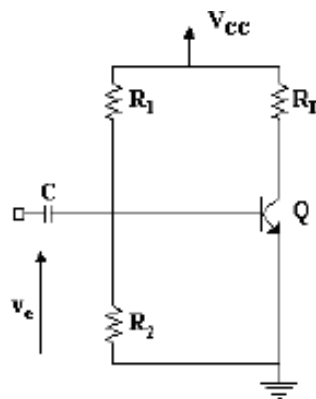
$$P_{Lca \text{ máx}} = \frac{V_a^2}{4 R_L} = \frac{(50\text{ V})^2}{4 \cdot 150\ \Omega} = 4,17\text{ W}$$



### PROBLEMA 38. Amplificador de potencia Clase A emisor común

#### Enunciado:

En el circuito de la figura, determinar la potencia máxima entregada a la carga, la eficiencia de conversión máxima  $\eta_{max}$  y el factor de mérito  $F_m$ . Se sabe que  $V_{CC} = 20\text{ V}$  y  $R_L = 100\ \Omega$ :



#### Solución analítica:

Tenemos un amplificador de potencia clase A, por tanto sabemos que el punto de funcionamiento Q está centrado en la recta de carga:

$$I_{CQ} = \frac{1}{2} I_{Cmax} = \frac{V_{CC}}{2 R_L} \quad V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{2}$$

La potencia máxima entregada a la carga será entonces:

$$P_{Lca} = I_{ef}^2 R_L = \left( \frac{I_{Cpico}}{\sqrt{2}} \right)^2 R_L$$

$$P_{Lca \text{ máx}} = \left( \frac{I_{Cmax}}{2\sqrt{2}} \right)^2 R_L = \frac{I_{Cmax}^2}{8} R_L = \frac{V_{CC}^2}{8 R_L} = \frac{20^2}{8 \cdot 100} = 0,5 \text{ W}$$

Para calcular la eficiencia de conversión máxima y el factor de mérito, necesitamos saber antes la potencia entregada por la fuente ( $P_{CC}$ ) y la disipada en el transistor ( $P_D$ ):

$$P_{CC} = V_{BB} I_{BQ} + V_{CC} I_{CQ} \approx V_{CC} I_{CQ} = \frac{V_{CC}^2}{2 R_L}$$

$$P_D = V_{CEQ} I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{2} \frac{I_{Cmax}}{2} = \frac{V_{CC}^2}{4 R_L}$$

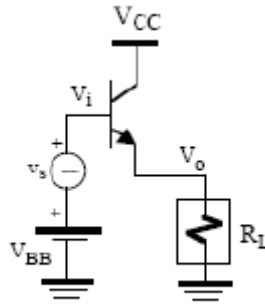
$$\eta_{max} = \frac{P_{Lca \text{ máx}}}{P_{CC}} = \frac{\frac{V_{CC}^2}{8 R_L}}{\frac{V_{CC}^2}{2 R_L}} = \frac{1}{4} = 25\%$$

$$F_m = \frac{P_D}{P_{Lca \text{ máx}}} = \frac{\frac{V_{CC}^2}{4 R_L}}{\frac{V_{CC}^2}{8 R_L}} = 2$$

### PROBLEMA 39. Amplificador de potencia Clase A seguidor de emisor

#### **Enunciado:**

En el circuito de la figura, determinar la potencia máxima entregada a la carga, la eficiencia de conversión máxima  $\eta_{max}$  y el factor de mérito  $F_m$ . Se sabe que  $V_{CC} = 20 \text{ V}$  y  $R_L = 150 \Omega$ :



### Solución analítica:

Tenemos un amplificador de potencia clase A, por tanto sabemos que el punto de funcionamiento Q está centrado en la recta de carga:

$$I_{CQ} = \frac{1}{2} I_{Cmax} = \frac{V_{CC}}{2 R_L} \quad V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{2}$$

La potencia máxima entregada a la carga será entonces:

$$P_{Lca} = I_{ef}^2 R_L; P_{Lca \text{ máx}} = \left( \frac{I_{Cmáx}}{2\sqrt{2}} \right)^2 R_L = \frac{I_{Cmáx}^2}{8} R_L = \frac{V_{CC}^2}{8 R_L} = 2,67 \text{ W}$$

Para calcular la eficiencia de conversión máxima y el factor de mérito, necesitamos saber antes la potencia entregada por la fuente ( $P_{CC}$ ) y la disipada en el transistor ( $P_D$ ):

$$P_{CC} = V_{BB} I_{BQ} + V_{CC} I_{CQ} \approx V_{CC} I_{CQ} = \frac{V_{CC}^2}{2 R_L}$$

$$P_D = V_{CEQ} I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{2} \frac{V_{CC}}{2 R_L} = \frac{V_{CC}^2}{4 R_L}$$

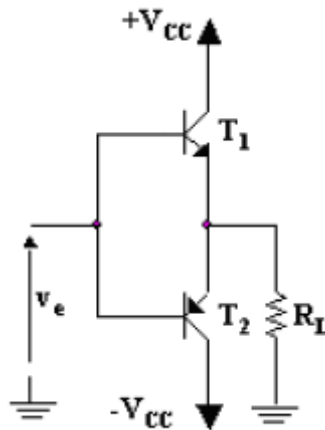
$$\eta_{max} = \frac{P_{Lca \text{ máx}}}{P_{CC}} = \frac{\frac{V_{CC}^2}{8 R_L}}{\frac{V_{CC}^2}{2 R_L}} = \frac{1}{4} = 25\%$$

$$F_m = \frac{P_D}{P_{Lca\ max}} = \frac{\frac{V_{CC}^2}{4 R_L}}{\frac{V_{CC}^2}{8 R_L}} = 2$$

### PROBLEMA 40. Amplificador de potencia Clase B

#### Enunciado:

En el circuito de la figura, determinar la potencia máxima entregada a la carga, la eficiencia de conversión máxima  $\eta_{max}$  y el factor de mérito  $F_m$ . Se sabe que  $V_{CC} = 15\ V$  y  $R_L = 150\ \Omega$ :



#### Solución analítica:

En los amplificadores de potencia de Clase B, la señal de salida circula durante un semiciclo de la señal de entrada:

$$I_{CQ} = 0 \quad V_{CEsat} = 0$$

Para calcular la eficiencia de conversión máxima y el factor de mérito, necesitamos saber antes la potencia entregada por la fuente ( $P_{CC}$ ) y la disipada en el transistor ( $P_D$ ):



$$P_{CC} = P_{CC1} + P_{CC2} = V_{CC1} \frac{I_{C1 \max}}{\pi} + V_{CC2} \frac{I_{C2 \max}}{\pi} = 2 \frac{I_{\max}}{\pi} V_{CC}$$

$$P_{D(T2)} = P_{CC} - P_{Lca} = \frac{2}{\pi} V_{CC} I_{\max} - \frac{I_{\max}^2 R_L}{2}$$

Para obtener  $I_{\max}$ , tenemos que hacer  $\frac{\partial P_D}{\partial I_{\max}} = 0$ :

$$\frac{\partial P_D}{\partial I_{\max}} = \frac{2}{\pi} V_{CC} - \frac{2 I_{\max} R_L}{2} = 0; \quad I_{\max} = \frac{2 V_{CC}}{\pi R_L}$$

Por tanto, si despejamos  $I_{\max}$  en las ecuaciones anteriores:

$$P_{Lca} = V_{ef} I_{ef} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}; \quad P_{Lca \max} = \frac{V_{CC}^2}{2 R_L} = 0,75 \text{ W}$$

$$P_{CC} = 2 \frac{V_{CC}^2}{\pi R_L}$$

$$P_{D(T2)\max} = \frac{V_{CC}^2}{2 R_L} \frac{4}{\pi^2} = 0,4 P_{Lca \max}$$

$$P_{D(T1)\max} = 0,2 P_{Lca \max}$$

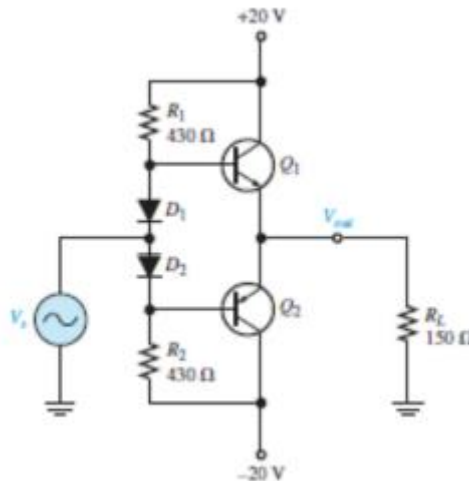
$$\eta_{\max} = \frac{P_{Lca \max}}{P_{CC}} = \frac{\frac{V_{CC}^2}{2 R_L}}{2 \frac{V_{CC}^2}{\pi R_L}} = \frac{\pi}{4} = 78,5\%$$

$$F_m = \frac{P_D}{P_{Lca \max}} = \frac{0,2 P_{Lca \max}}{P_{Lca \max}} = 0,2$$

## PROBLEMA 41. Amplificador de potencia Clase AB

### Enunciado:

En el circuito de la figura, determinar la máxima tensión de pico, la máxima corriente de pico en la salida y la máxima eficiencia de conversión:



### Solución analítica:

En los amplificadores de potencia de Clase AB, la señal de salida circula durante menos de un ciclo de la señal de entrada y más de un semiciclo de la señal de entrada, por tanto  $I_{CQ} \neq 0$  pero es muy pequeña.

Para obtener  $I_{m\acute{a}x}$ , tenemos que hacer  $\frac{\partial P_D}{\partial I_{m\acute{a}x}} = 0$ :

$$P_{D(T2)} = P_{CC} - P_{Lca} = \frac{2}{\pi} V_{CC} I_{m\acute{a}x} - \frac{I_{m\acute{a}x}^2 R_L}{2}$$

$$\frac{\partial P_D}{\partial I_{m\acute{a}x}} = \frac{2}{\pi} V_{CC} - \frac{2 I_{m\acute{a}x} R_L}{2} = 0; \quad I_{m\acute{a}x} = \frac{2 V_{CC}}{\pi R_L}$$

$$I_{m\acute{a}x} = \frac{2 \cdot 20V}{\pi \cdot 150 \Omega} = 84,88 \text{ mA}$$

Para obtener  $V_{m\acute{a}x}$  necesitamos calcular antes la potencia máxima suministrada a la carga:

$$P_{Lca} = V_{ef} I_{ef} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} \frac{I_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}}; \quad P_{Lca \text{ max}} = \frac{V_{CC}^2}{2 R_L} = \frac{(20 V)^2}{2 \cdot 150 \Omega} = 1,33 \text{ W}$$

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{2 P_{Lca \text{ max}}}{I_{m\acute{a}x}} = \frac{2 \cdot 1,33 \text{ W}}{84,88 \text{ mA}} = 31,43 \text{ V}$$

Para hallar la máxima eficiencia de conversión, vamos a calcular antes la potencia entregada por la fuente:

$$P_{CC} = P_{CC1} + P_{CC2} = V_{CC1} \frac{I_{C1 \max}}{\pi} + V_{CC2} \frac{I_{C2 \max}}{\pi} = 2 \frac{I_{\max}}{\pi} V_{CC}$$

$$P_{CC} = 2 \frac{V_{CC}^2}{\pi R_L} = 2 \frac{(20 \text{ V})^2}{\pi \cdot 150 \Omega} = 1,7 \text{ W}$$

$$\eta_{\max} = \frac{P_{Lca \max}}{P_{CC}} = \frac{1,33 \text{ W}}{1,7 \text{ W}} = 78,24\%$$

## NOMENCLATURA

**P<sub>Lca</sub>**: Potencia entregada a la carga (W).

**P<sub>CC</sub>**: Potencia entregada por la fuente (W).

**P<sub>D</sub>**: Potencia entregada por el transistor (W).

**η**: Eficiencia de conversión (%).

**F<sub>m</sub>**: Factor de mérito (%).

# 4. ANEXOS

## 4.1. LEYES Y TEOREMAS

Las leyes o teoremas más usados para la resolución de estos problemas han sido principalmente la ley de Ohm, las leyes de Kirchhoff, y el teorema de Norton y Thevenin:

### LEY DE OHM

[16] La ley de Ohm es una ley de la electricidad que establece que la diferencia de potencial  $V$  que aparece entre los extremos de un conductor determinado es proporcional a la intensidad de la corriente  $I$  que circula por el citado conductor. Ohm completó la ley introduciendo la noción de resistencia eléctrica  $R$ ; que es el factor de proporcionalidad que aparece en la relación entre  $V$  e  $I$ :

$$V = I \cdot R$$

### LEYES DE KIRCHHOFF

[17] Primera ley de Kirchhoff: Esta ley también es conocida como el método de los nudos. En cualquier nudo, la suma de las corrientes que entran en ese nudo es igual a la suma de las corrientes que salen. De forma equivalente, la suma de todas las corrientes que pasan por el nudo es igual a cero

$$\sum_{k=1}^n I_k = I_1 + I_2 + I_3 \dots + I_n = 0$$

Segunda ley de Kirchhoff: Esta ley también es conocida como el método de las mallas. En un lazo cerrado, la suma de todas las caídas de tensión es igual a la tensión total suministrada. De forma equivalente, la suma algebraica de las diferencias de potencial eléctrico en un lazo es igual a cero.

$$\sum_{k=1}^n V_k = V_1 + V_2 + V_3 \dots + V_n = 0$$

## TEOREMA DE THEVENIN

[18] El teorema de Thévenin establece que si una parte de un circuito lineal está comprendida entre dos terminales A y B, esta parte en cuestión puede sustituirse por un circuito equivalente que esté constituido únicamente por una fuente de tensión en serie con una resistencia, de forma que al conectar un elemento entre los dos terminales A y B, la tensión que cae en él y la intensidad que lo atraviesa son las mismas tanto en el circuito real como en el equivalente. Para calcular la tensión de Thevenin,  $V_{th}$ , se desconecta la carga (es decir, la resistencia de la carga) y se calcula  $V_{AB}$ . Al desconectar la carga, la intensidad que atraviesa  $R_{th}$  en el circuito equivalente es nula y por tanto la tensión de  $R_{th}$  también es nula, por lo que ahora  $V_{AB} = V_{th}$  por la segunda ley de Kirchhoff.

## TEOREMA DE NORTON

[19] El teorema de Norton es dual del teorema de Thevenin. Establece que cualquier circuito lineal se puede sustituir por una fuente equivalente de intensidad en paralelo con una impedancia equivalente.

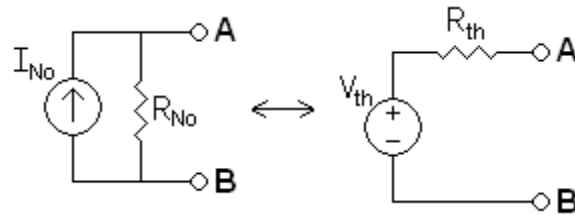
El circuito Norton equivalente consiste en una fuente de corriente  $I_{No}$  en paralelo con una resistencia  $R_{No}$ . Para calcularlo:

1. Se calcula la corriente de salida,  $I_{AB}$ , cuando se cortocircuita la salida, es decir, cuando se pone una carga (tensión) nula entre A y B. Al colocar un cortocircuito entre A y B toda la intensidad  $I_{No}$  circula por la rama AB, por lo que ahora  $I_{AB}$  es igual a  $I_{No}$ .
2. Se calcula la tensión de salida,  $V_{AB}$ , cuando no se conecta ninguna carga externa, es decir, cuando se pone una resistencia infinita entre A y B.  $R_{No}$  es ahora igual a  $V_{AB}$  dividido entre  $I_{No}$  porque toda la intensidad  $I_{No}$  ahora circula a través de  $R_{No}$  y las tensiones de ambas ramas tienen que coincidir ( $V_{AB} = I_{No} R_{No}$ ).

Para analizar la equivalencia entre un circuito Thevenin y un circuito Norton pueden utilizarse las siguientes ecuaciones:

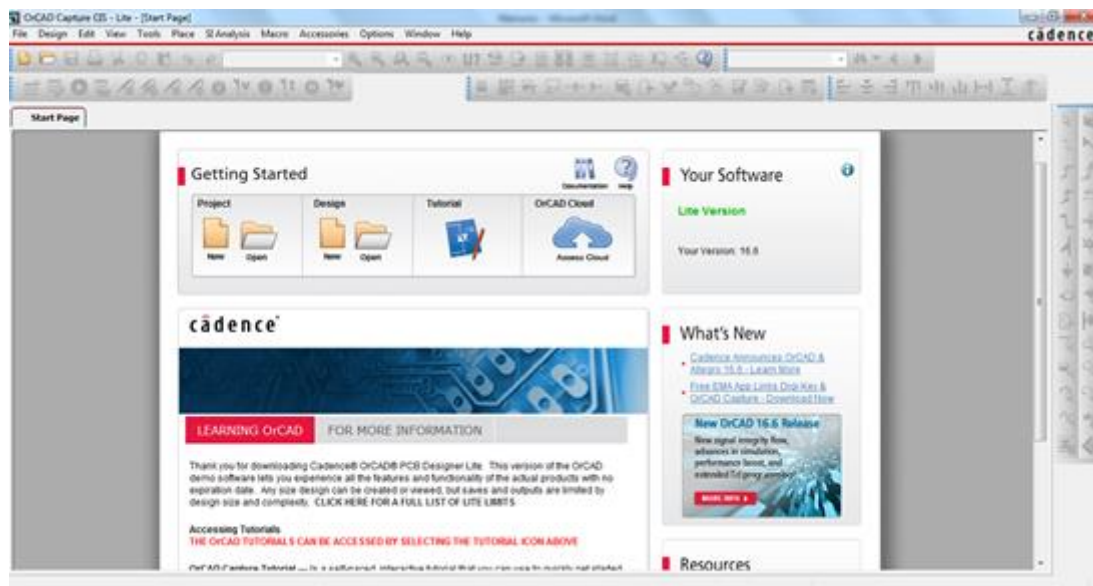
$$R_{Th} = R_{No}$$

$$V_{Th} = I_{No}R_{No}$$

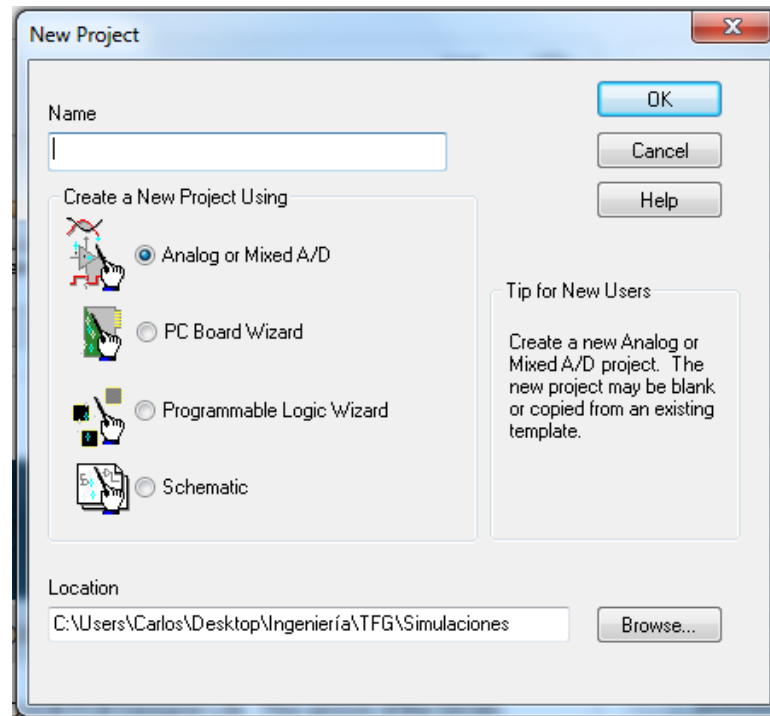


## 4.2. SIMULACIONES

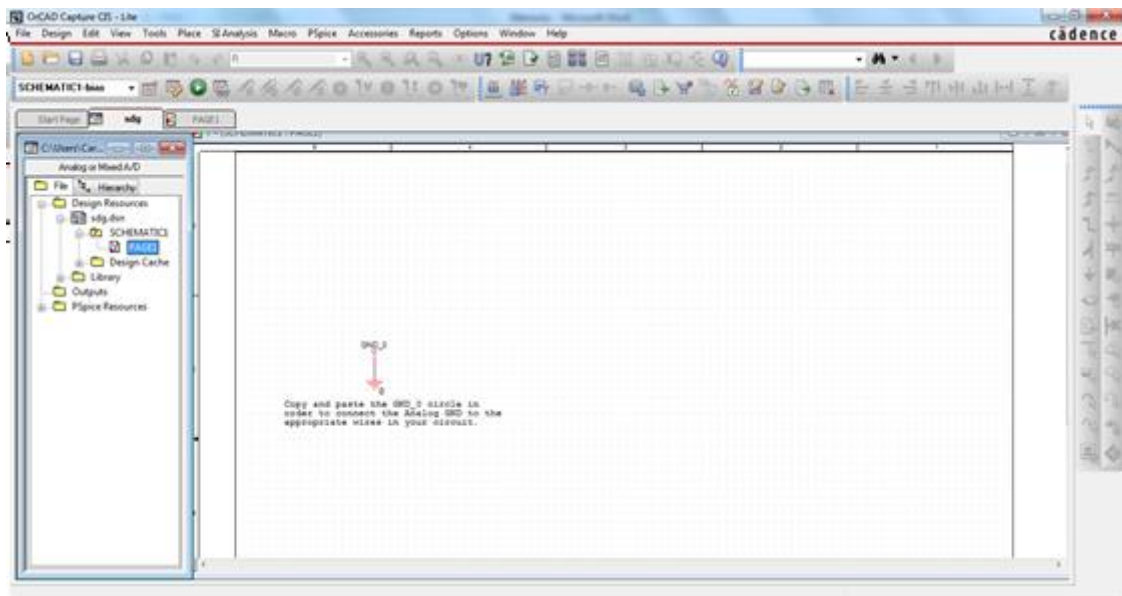
Para hacer las simulaciones de los distintos circuitos planteados en los problemas de este trabajo se ha usado el programa informático Orcad Pspice versión 16.6 CIS Lite. Lo primero que hay que hacer para poder simular un circuito es abrir el Orcad Capture CIS Lite y nos aparecerá esta ventana:



Para crear un nuevo proyecto le damos a new Project y señalamos la opción que pone Analog or Mixed A/D. Ponemos el nombre que queramos y a continuación OK.

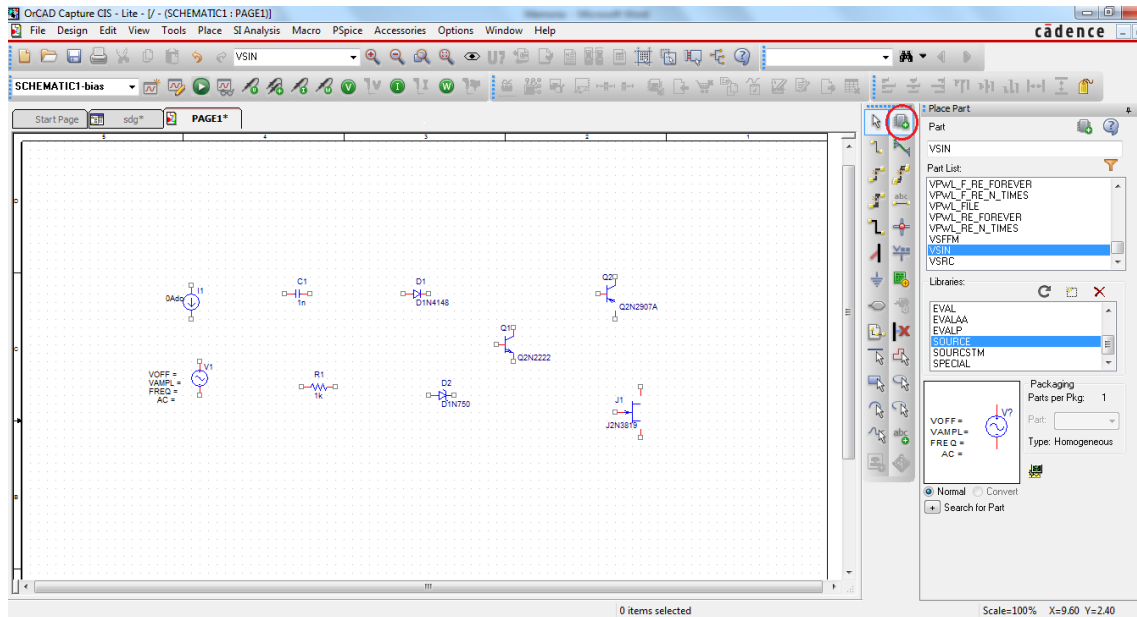


Dentro del proyecto hay que desplegar la carpeta que pone SCHEMATIC1. Ésta contiene un archivo llamado PAGE1 que hay que abrirlo para que se nos salga la ventana donde ya podremos montar nuestro circuito a simular:



Para insertar los elementos que componen el circuito que seleccionar el botón indicado en la siguiente imagen y se nos despliega un menú con las distintas librerías que dispone el programa en las que podremos buscar el elemento que necesitamos:

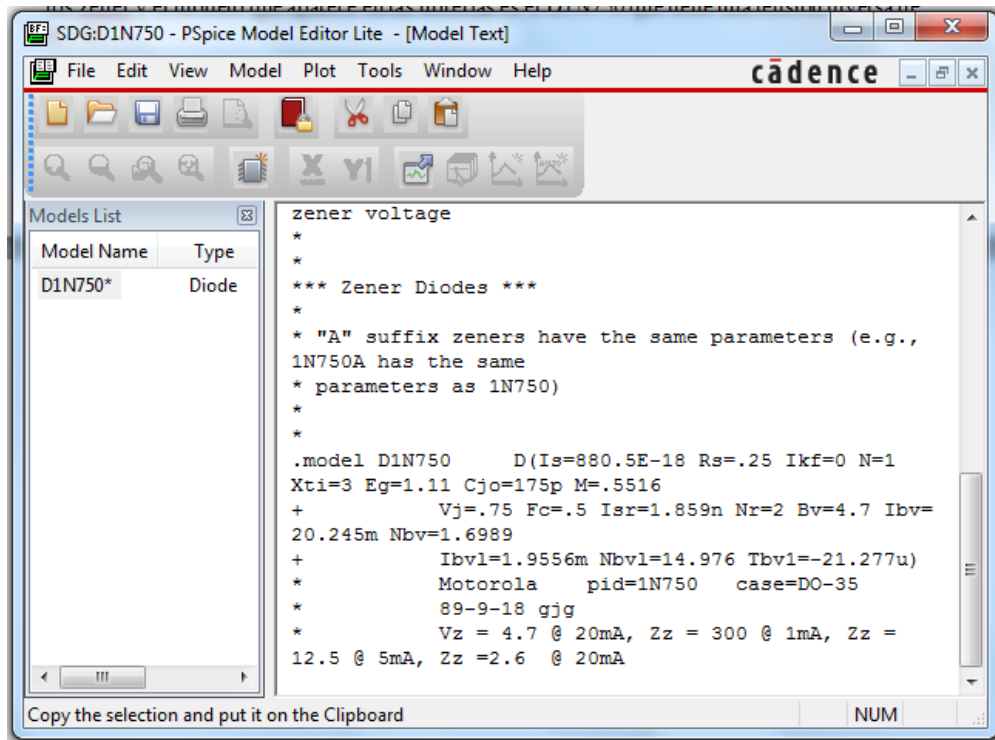




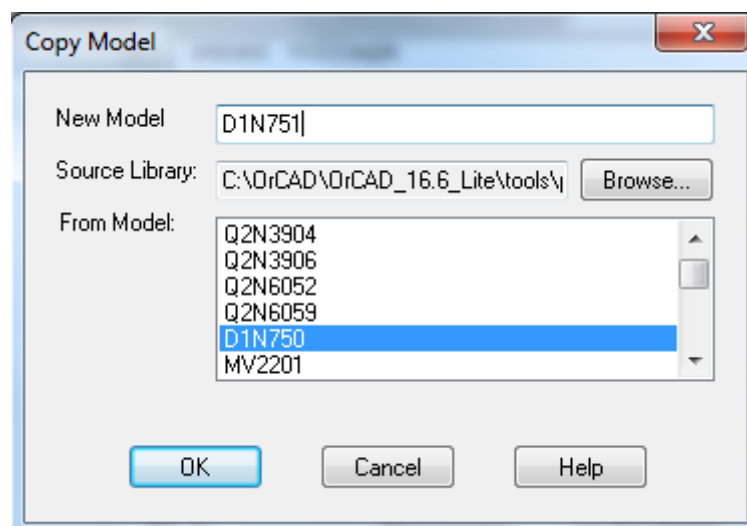
## SIMULACION DIODOS

Para las simulaciones con diodos zéner, he tenido que crear otros modelos a partir del que viene por defecto en el programa, ya que según el ejercicio variaba la tensión de inversa de los zéner y el modelo que aparece en las librerías es el D1N750 que tiene una tensión inversa de 4,7 V.

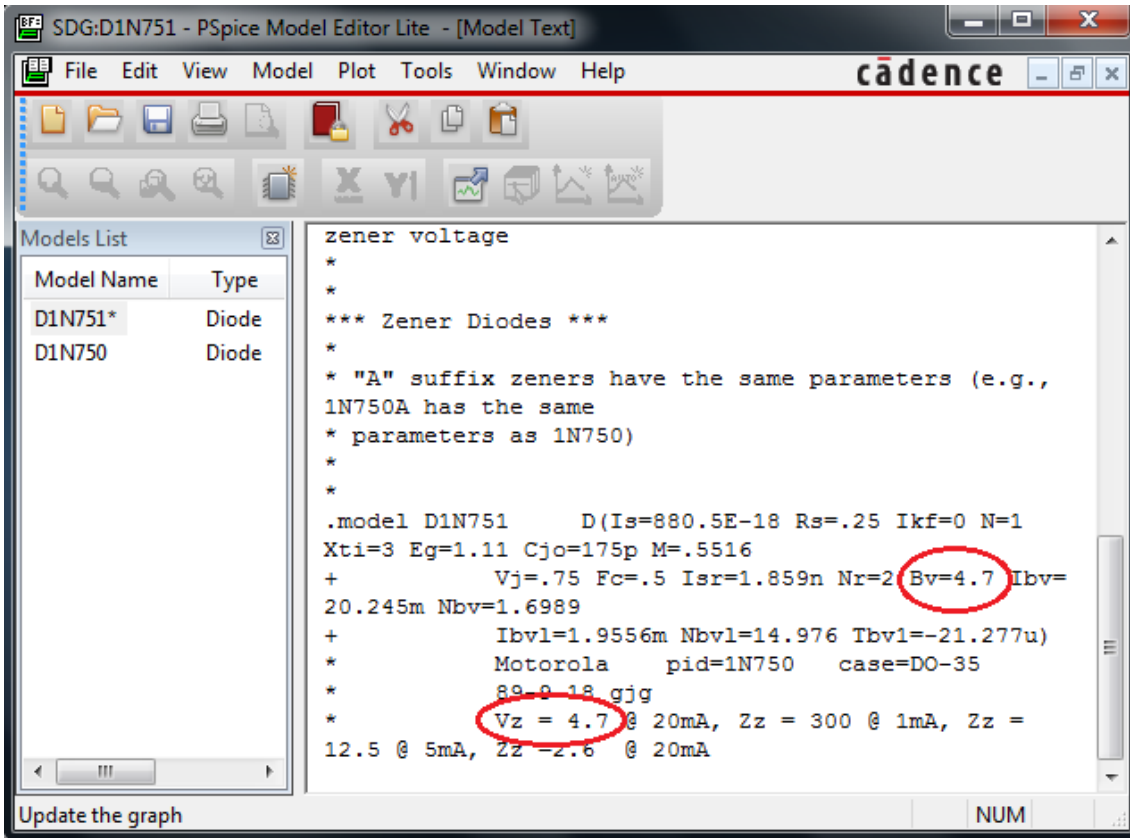
Para modificar este valor tenemos que pinchar con el botón derecho sobre nuestro diodo y seleccionar la opción Edit Pspice Model y se nos abrirá la siguiente ventana:



El siguiente paso será seleccionar la opción Model de la barra de herramientas, le damos a copy from y en la ventana que aparece buscamos el modelo que queremos modificar y ponemos el nombre de nuestro nuevo elemento:



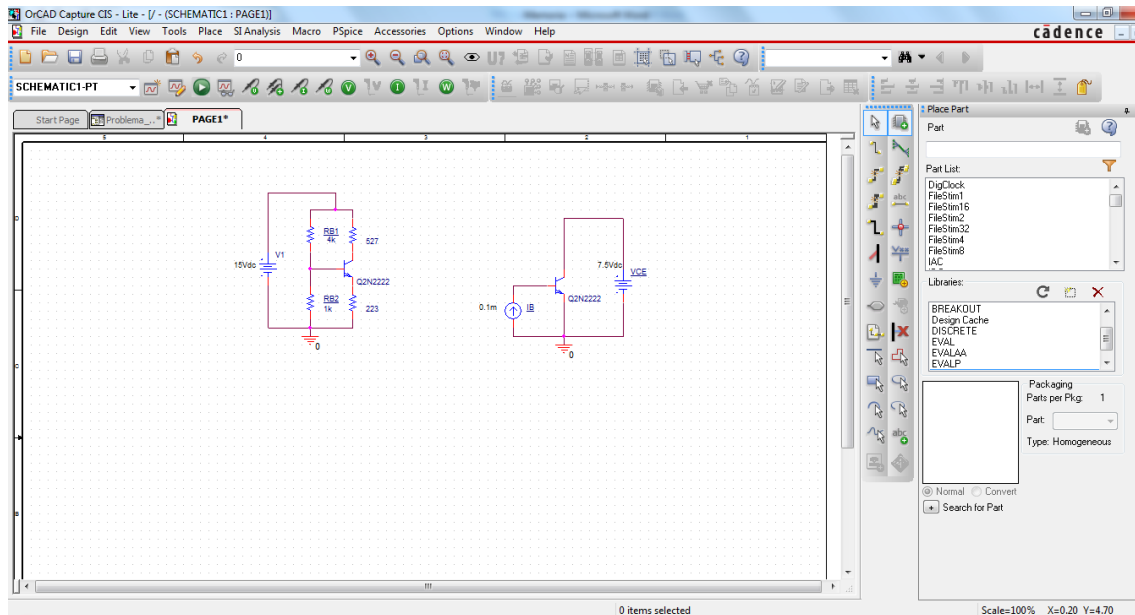
Y ahora sobre nuestro nuevo modelo solo tenemos que cambiar los parámetros que pone Bv y Vz que por defecto son 4,7. Una vez modificados estos valores le damos al botón de guardar y ya tenemos nuestro nuevo modelo listo para usarlo.



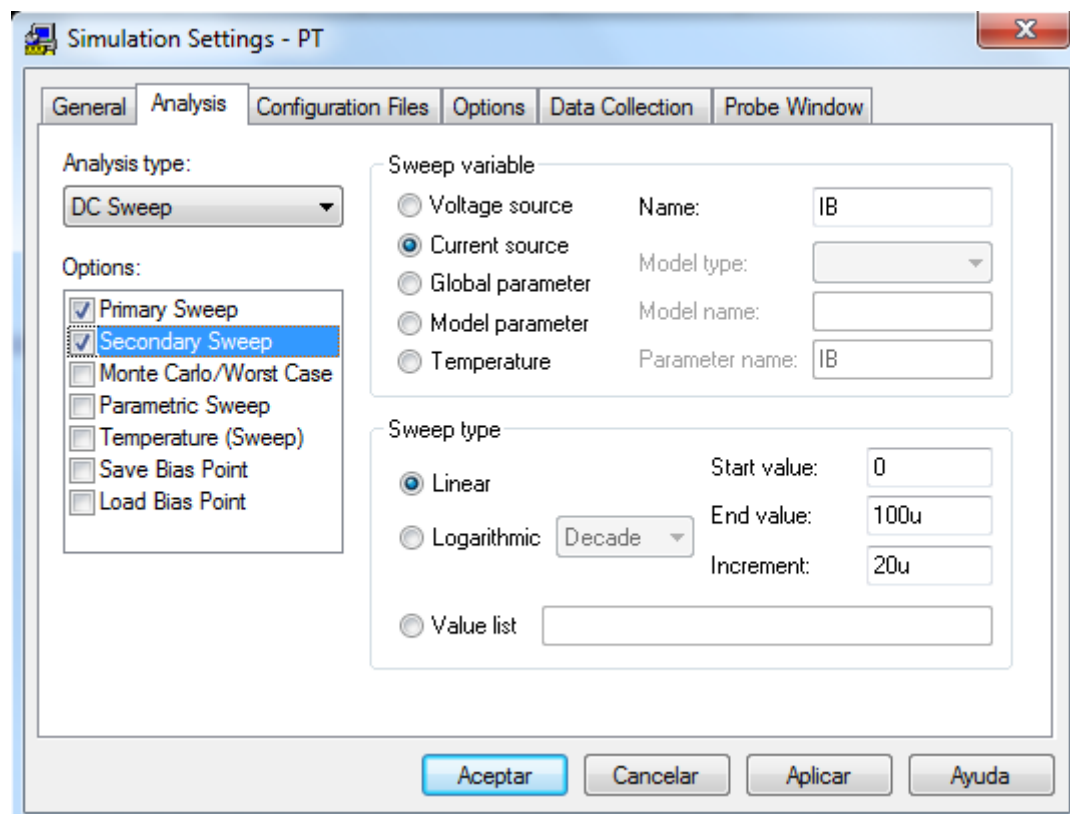
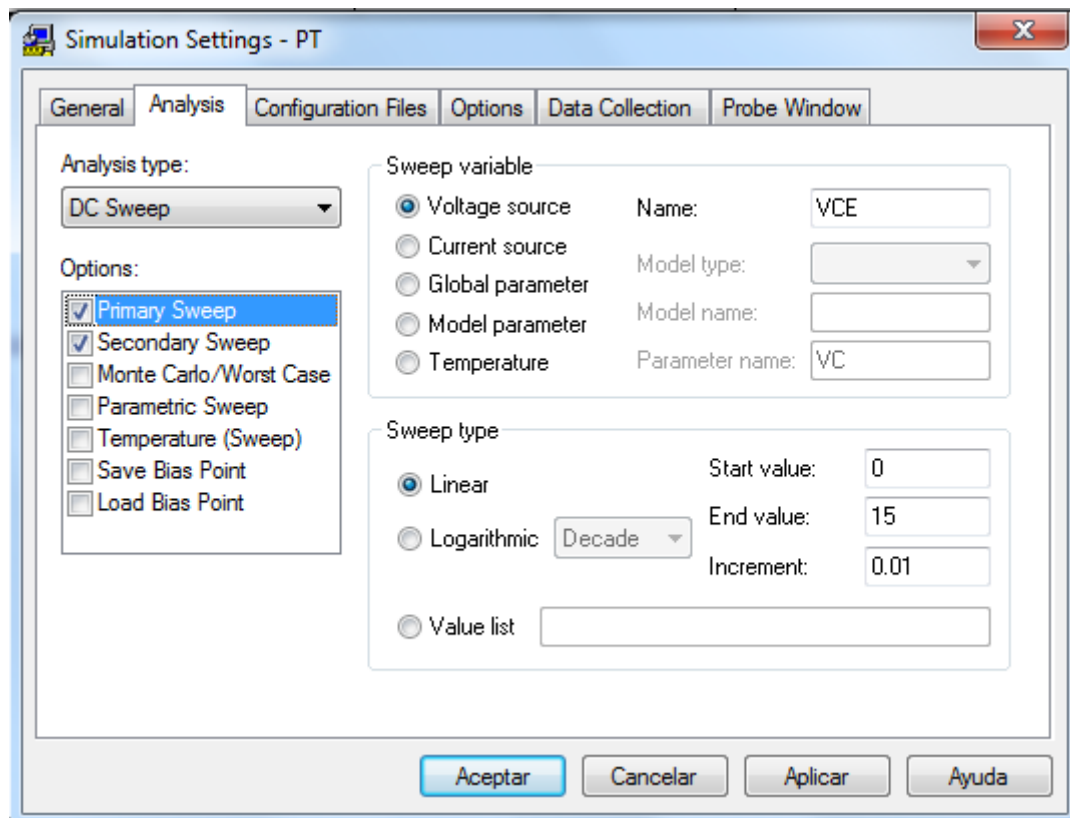
## SIMULACION TRANSISTORES

En los transistores, para obtener el punto de polarización sobre la gráfica de la recta de carga hay que hacerlo de la siguiente manera:

Una vez hallado el punto de polarización teóricamente, creamos un circuito alternativo que contenga solo el transistor con una fuente de intensidad conectada en la base con el valor calculado de  $I_b$  y una fuente de tensión entre el colector y el emisor con el valor de  $V_{ce}$ .

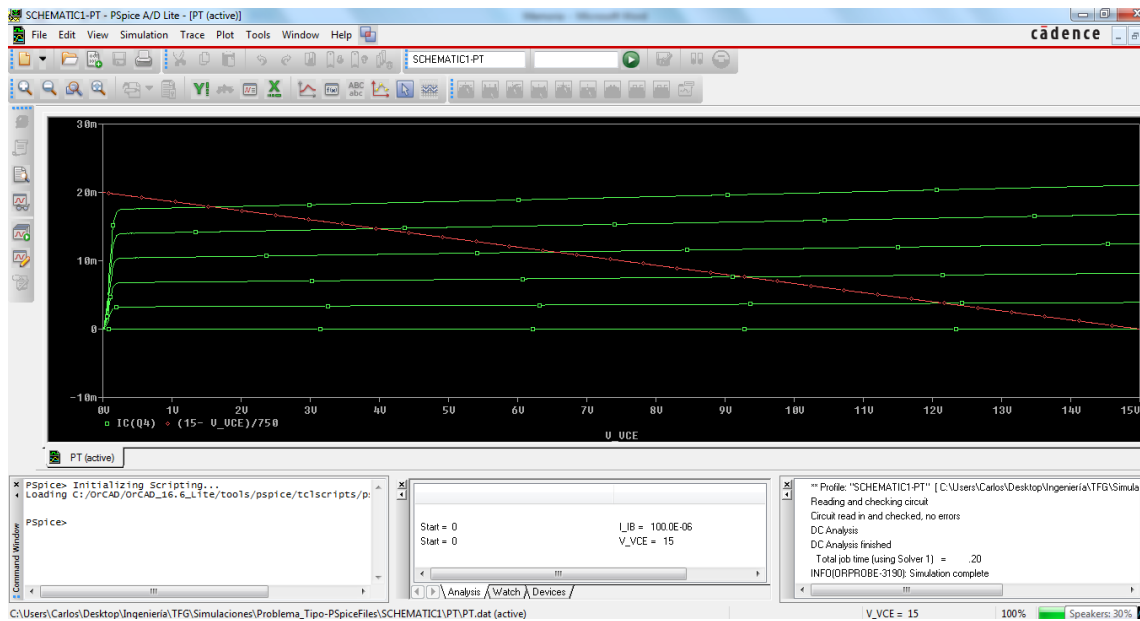


El siguiente paso es hacer un barrido en la intensidad de base. Para ello tenemos que modificar el perfil de simulación en el botón de Edit Simulation Profile. Donde pone Analysis type, seleccionamos Dc Sweep, a continuación en Primary Sweep ponemos la fuente de tensión VCE y en Secondary Sweep, la fuente de intensidad IB de la siguiente manera:



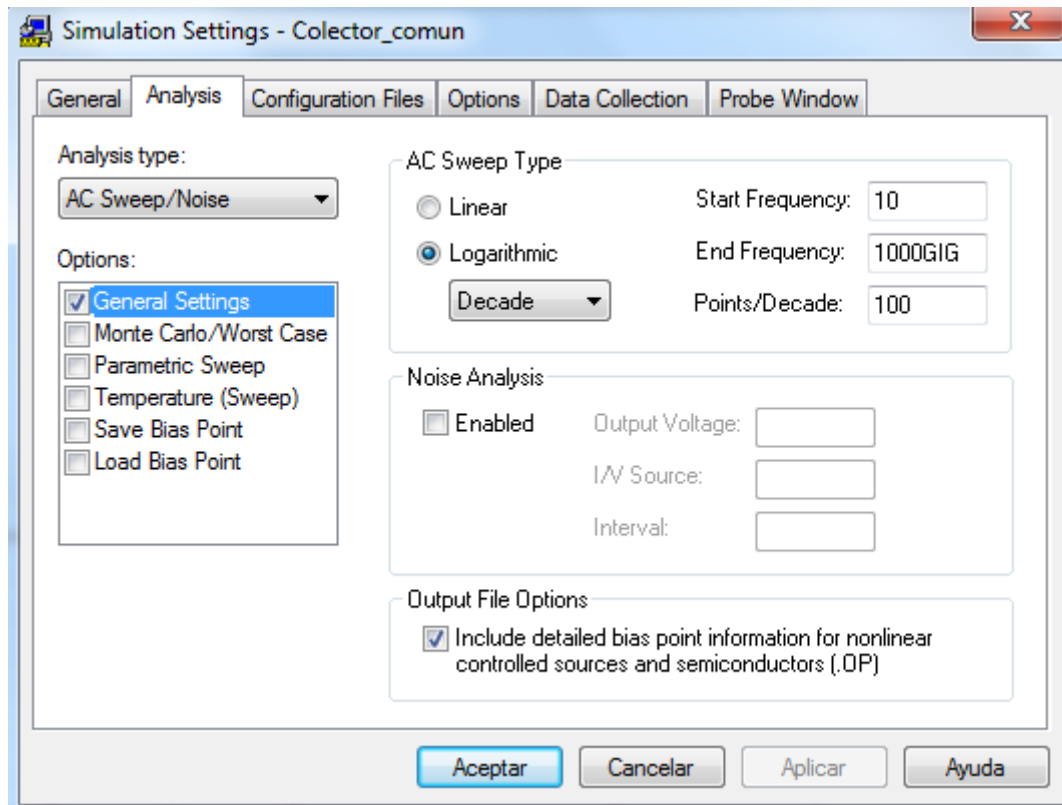
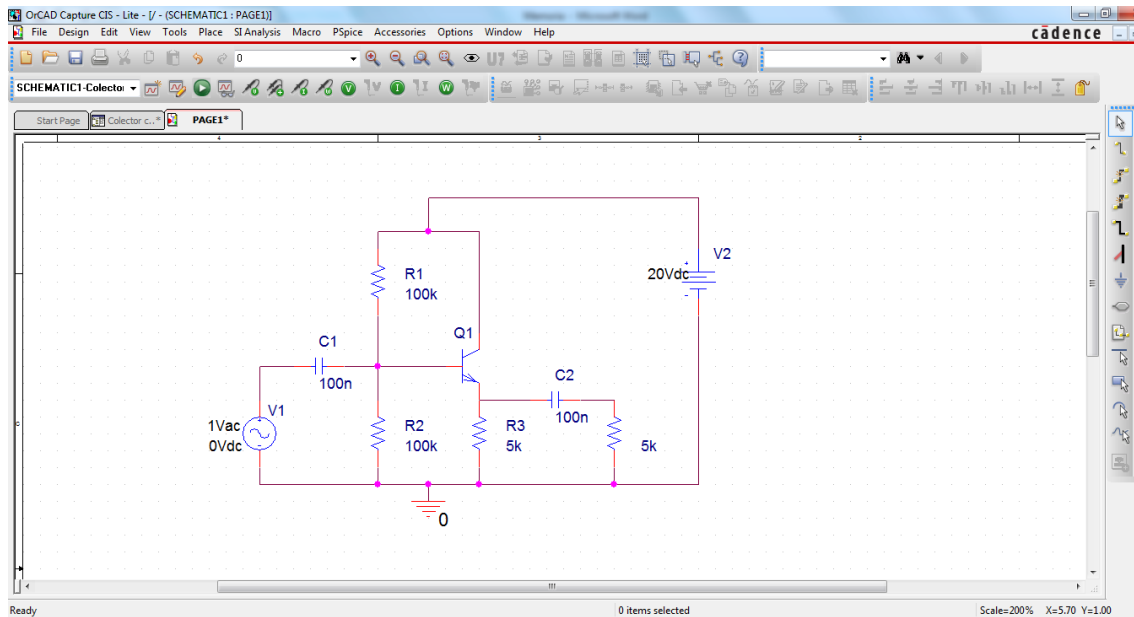
Una vez configurado el perfil, solo queda darle al botón de Run Pspice para simular el circuito y mostrar por un lado la intensidad de colector del transistor  $I_C$  y por otro lado la recta de carga que se obtiene metiendo la siguiente fórmula:

$$\frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_E + R_C}$$

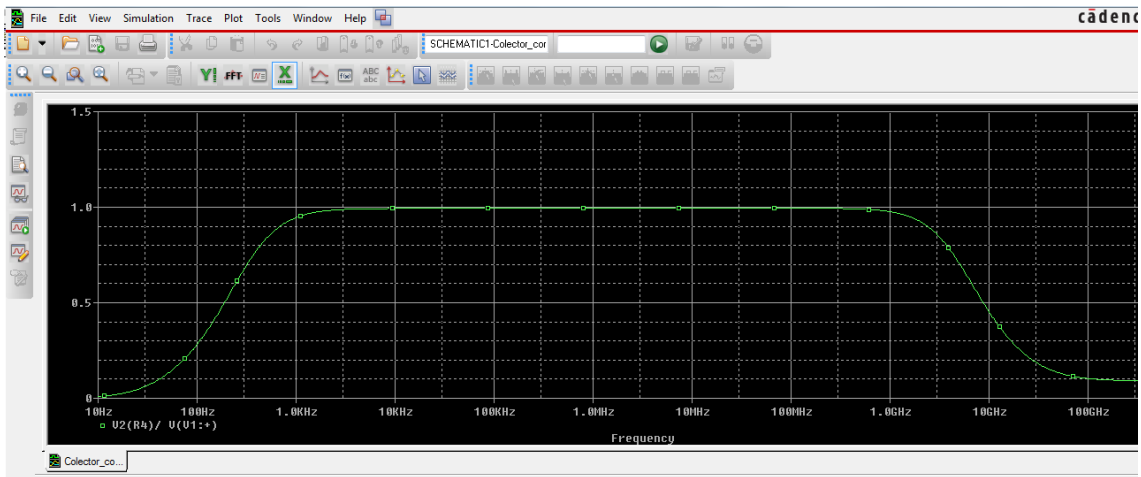


## SIMULACION AMPLIFICADORES

En los circuitos de amplificadores vamos a simular el circuito con el objetivo de obtener la ganancia de dicho amplificador. Para ello, primero montamos el circuito y después habrá que cambiar el perfil de simulación con las siguientes condiciones:

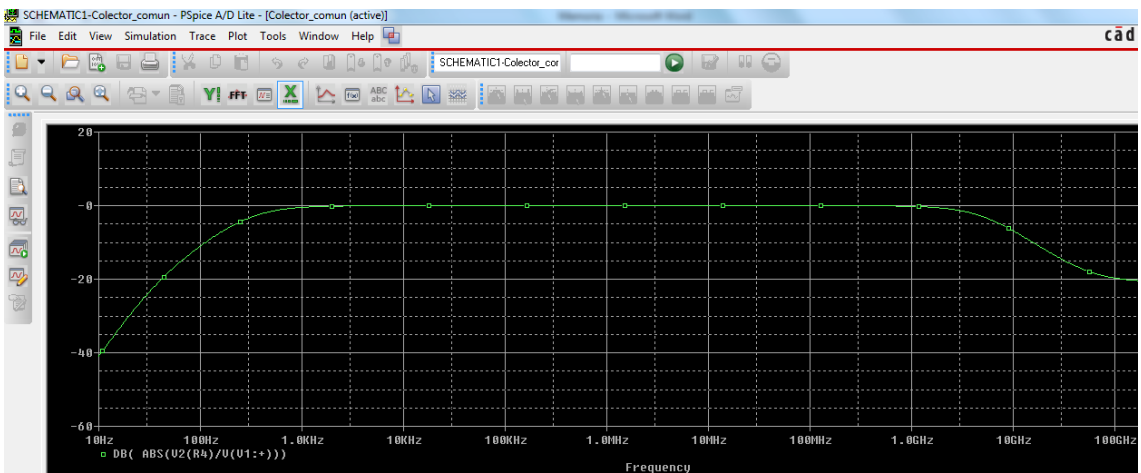


Una vez configurado el perfil, solo queda darle al botón de Run Pspice para simular el circuito y representar la tensión de salida dividida entre la señal de entrada para obtener la gráfica de la ganancia. En este caso la ganancia va a ser 1 porque el amplificador que hemos usado en el ejemplo se trata de un colector común.



En el análisis de las frecuencias, para obtener el diagrama de bode de un amplificador lo único que hay que hacer es simular el circuito amplificador con el mismo perfil de simulación y mostrar la gráfica obtenida metiendo la siguiente fórmula:

$$DB(ABS(V(OUTPUT)/V(INPUT)))$$



En este caso la ganancia en decibelios es 0 porque al tratarse de un amplificador colector común con ganancia 1, el logaritmo de 1 es 0.



# 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] A.S. Sedra, K.C. Smith. Circuitos Microelectrónicos (5ª ed.) McGraw-Hill, 2006
- [2] R.C. Jaeger, T.N. Blalock. Diseño de Circuitos Microelectrónicos (2ª ed.). McGraw-Hill, 2005
- [3] M.H. Rashid. Circuitos Microelectrónicos. Análisis y diseño. Thomson, 2002
- [4] Floyd, Thomas L. Dispositivos electrónicos. 9ª edición. Pearson Prentice Hall, 2008
- [5] J. Millman, A. Grabel. Microelectrónica (6ª ed.). Editorial Hispano Europea, 1993
- [6] Mark N. Horestein. Microelectrónica: Circuitos y Dispositivos (2ª.). Prentice Hall, 1996
- [7] A.R. Hambley. Electrónica. Prentice Hall, 2001
- [8] Norbert R. Malik. Circuitos Electrónicos. Análisis, simulación y Diseño. Prentice Hall, 1996
- [9] A.P. Malvino. Principios de Electrónica. Editorial Hispano Europea. 2001
- [10] Semiconductores: <http://mdgomez.webs.uvigo.es/DEI/Guias/tema3.pdf>
- [11] Diodo semiconductor: [http://www.unicrom.com/tut\\_diodo.asp](http://www.unicrom.com/tut_diodo.asp)
- [12] Diodo zener: [http://www.unicrom.com/Tut\\_diodozener\\_.asp](http://www.unicrom.com/Tut_diodozener_.asp)
- [13] Diodo LED: [http://www.unicrom.com/Tut\\_diodo\\_led.asp](http://www.unicrom.com/Tut_diodo_led.asp)
- [14] Transistor Bipolar: <http://juliodelgado.galeon.com/>
- [15] Transistor MOSFET: [http://www.ecured.cu/index.php/Transistor\\_MOSFET](http://www.ecured.cu/index.php/Transistor_MOSFET)
- [16] Ley de Ohm: [https://es.wikipedia.org/wiki/Ley\\_de\\_Ohm](https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Ohm)
- [17] Leyes de Kirchhoff: [https://es.wikipedia.org/wiki/Leyes\\_de\\_Kirchhoff](https://es.wikipedia.org/wiki/Leyes_de_Kirchhoff)
- [18] Teorema de Thevenin: [https://es.wikipedia.org/wiki/Teorema\\_de\\_Th%C3%A9venin](https://es.wikipedia.org/wiki/Teorema_de_Th%C3%A9venin)
- [19] Teorema de Norton: [https://es.wikipedia.org/wiki/Teorema\\_de\\_Norton](https://es.wikipedia.org/wiki/Teorema_de_Norton)