

Índice

<u>Índice</u>	9
<u>Presentación</u>	17
<u>Referencias y nomenclatura</u>	19
<u>Aplicación multimedia</u>	27
<u>Contenidos del CD-ROM</u>	29
<u>Capítulo 1: Teoría de circuitos – Fundamentos</u>	31
1.1 Conceptos básicos	32
1.1.1 Circuitos y componentes	32
1.1.2 Bloques y referencias de polaridad	37
1.2 Dipolos y cuadripolos	40
1.3 Dipolos	40
1.3.1 Característica	41
1.4 Cuadripolos	41
1.4.1 Características de entrada, salida y transferencia	42
1.4.2 Parámetros	43
1.4.2.1 Cuadripolos pasivos	43
1.4.2.2 Cuadripolos activos	45
1.5 Unidades del Sistema Internacional	48
1.6 Componentes lineales	50
1.6.1 Componentes Pasivos	50
1.6.1.1 Resistencia	50
1.6.1.2 Conductancia	52
1.6.1.3 Capacidad	53
1.6.1.4 Inductancia	56

1.6.1.5 Impedancia y admitancia (régimen senoidal).....	58
1.6.1.6 Transformador	59
1.6.2 Componentes Activos	60
1.6.2.1 Fuente independiente de tensión	60
1.6.2.2 Fuente independiente de corriente.....	64
1.6.2.3 Fuentes dependientes	67
1.6.3 Energía y potencia	67
1.7 Leyes y teoremas fundamentales.....	71
1.7.1 Leyes de Kirchhoff	71
1.7.1.1 Primera ley de Kirchhoff.....	71
1.7.1.2 Segunda ley de kirchhoff	72
1.7.2 Asociación de elementos pasivos	72
1.7.2.1 Asociación serie.....	72
1.7.2.2 Asociación paralelo	74
1.7.2.3 Asociaciones estrella y triángulo.....	77
1.7.3 Linealidad	78
1.7.4 Teoremas de Norton y Thévenin	81
1.7.5 Teorema de Millman	82
1.8 Formas de onda.....	84
1.8.1 Formas de onda básicas	84
1.8.1.1 Función impulso	85
1.8.1.2 Función escalón.....	85
1.8.1.3 Función rampa	86
1.8.1.4 Función senoidal.....	87
1.8.1.5 Función triangular	88
1.8.1.2 Función cuadrada	89
1.8.2 Formas de ondas electrónicas	89
PROBLEMAS PROPUESTOS	91
SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS PROPUESTOS	99
<u>Capítulo 2: Sistemas electrónicos</u>	125
2.1 Introducción histórica a la Electrónica.....	126
2.1.1 Orígenes	126

2.1.2 Era de la válvula de vacío	127
2.1.3 Era del transistor.....	128
2.1.4 Evolución de la Integración.....	134
2.1.5 Electrónica de potencia.....	135
2.2 Sistemas electrónicos	136
2.2.1 Señales	137
2.2.2 Sistemas.....	138
2.3 Bloques y componentes de los sistemas electrónicos	139
2.4 Características de entrada, salida y transferencia	139
2.5 Simulación de Sistemas Electrónicos	141
2.5.1 La simulación en la Ingeniería Electrónica	141
2.5.2 Simuladores digitales	141
2.5.3 Simuladores analógicos y mixtos.....	143
2.5.4 SPICE y sus derivados.....	143
2.5.5 Tipos de análisis.....	145
2.5.6 Simuladores mixtos.....	146
2.5.7 Prestaciones de un simulador de calidad.....	147
2.5.8 Simuladores de potencia.....	148
PROBLEMAS PROPUESTOS	149
SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS PROPUESTOS	154
<u>Capítulo 3: Diodos</u>	159
3.1 El diodo ideal.....	160
3.2 El diodo real	161
3.3 Modelos del diodo real	161
3.3.1 Modelo analítico	161
3.3.1.1 Solución mediante cálculo numérico	164
3.3.1.2 Solución gráfica.....	164
3.3.2 Modelos lineales	165
3.3.2.1 Modelo estático o de continua	165
3.3.2.2 Modelo dinámico de pequeña señal.....	166

3.3.3 <i>El diodo en conmutación. Tiempos de recuperación</i>	167
3.4 Diodo Zener	168
3.5 Análisis de circuitos que contienen diodos	170
3.6 Aplicaciones de los diodos	171
3.6.1 <i>Rectificación y filtrado</i>	171
3.6.2 <i>Regulación de tensión</i>	179
3.6.3 <i>Recortadores</i>	179
3.6.4 <i>Fijadores y cambiadores de nivel</i>	181
3.6.5 <i>Doblador de tensión</i>	183
PROBLEMAS PROPUESTOS	186
SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS PROPUESTOS	199
<u>Capítulo 4: Transistores bipolares</u>	243
4.1 Transistores	244
4.2 Transistores bipolares de unión (BJT)	244
4.3 Modelos del transistor BJT	247
4.3.1 <i>Modelos estáticos</i>	247
4.3.2.1 <i>Modelos aproximados</i>	247
4.3.2.1 <i>Modelo de Ebers-Moll</i>	253
4.3.2 <i>Modelos dinámicos</i>	256
4.3.2.1 <i>Modelos aproximados con control de carga</i>	256
4.3.2.1 <i>Modelos lineales de pequeña señal</i>	257
4.4 El BJT en conmutación	262
4.4.1 <i>Circuitos base de los Sistemas Digitales</i>	262
4.4.2 <i>Circuitos base de la Electrónica de Potencia</i>	262
4.5 Aplicaciones de los BJT	263
PROBLEMAS PROPUESTOS	266
SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS PROPUESTOS	275

Capítulo 5: Transistores de efecto campo.....	293
5.1 Transistores de efecto campo	294
5.2 Clasificación.....	294
5.3 Funcionamiento y mecanismos.....	295
5.4 Transistores MOSFET	295
5.4.1 MOSFET de vaciamiento o empobrecimiento	296
5.4.2 MOSFET de acumulación o enriquecimiento.....	297
5.5 Transistores JFET.....	300
5.6 Circuitos equivalentes	305
5.7 Aplicaciones de los FET.....	306
5.8 El MOSFET en conmutación.....	307
5.8.1 Circuitos base de los Sistemas Digitales	307
5.8.2 Circuitos base de la Electrónica de Potencia.....	308
PROBLEMAS PROPUESTOS	311
SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS PROPUESTOS	318
Capítulo 6: Circuitos amplificadores	333
6.1 Amplificadores	334
6.1.1 Amplificadores ideales	334
6.1.2 Amplificadores reales.....	335
6.2 Realimentación negativa.....	337
6.2.1 Amplificadores realimentados.....	338
6.3 Amplificadores discretos	338
6.3.1 Polarización	339
6.3.1.1 Polarización mediante resistencia de base	340
6.3.1.2 Polarización mediante divisor de tensión.....	341
6.3.2 Condensadores de paso y de acoplamiento	341
6.3.2.1 Línea de carga en corriente alterna	342
6.3.2.2 Excursión máxima en la salida	343
6.4 Amplificadores multietapas	344

6.5 Amplificador diferencial.....	345
6.6 Amplificadores de potencia	347
PROBLEMAS PROPUESTOS	350
SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS PROPUESTOS	361
<u>CAPÍTULO 7: Respuesta en frecuencia</u>	397
7.1 Introducción	398
7.1.1 Función de transferencia de un amplificador	398
7.1.2 Polos y ceros	399
7.1.3 Respuesta ante entradas sinusoidales	401
7.2 Diagramas de Bode	401
7.2.1 Representación de factores simples	402
7.2.1.1 Representación de la función $A_V(j\omega) = j\omega$	402
7.2.1.2 Representación de la función $A_V(j\omega) = 1/(1+j\omega T)$	403
7.2.1.3 Representación de polos complejos.....	406
7.2.2 Representación de Bode cuando hay varios factores....	411
7.3 Respuesta en frecuencia de componentes electrónicos. 412	
7.3.1 El transistor bipolar. Modelo de pequeña señal en alta frecuencia	412
7.3.2 El transistor FET. Modelo de pequeña señal en alta frecuencia	413
7.4 Respuesta en baja frecuencia de amplificadores.....	414
7.5 Respuesta en alta frecuencia de amplificadores	417
7.5.1 Teorema de Millar	417
7.5.2 Respuesta en alta frecuencia de un amplificador en emisor común	418
7.6 Efectos de la realimentación en la respuesta en frecuencia	422
7.6.1 Efecto sobre el ancho de banda	422
7.6.2 Estabilidad de un amplificador realimentado	424

7.7 Filtros activos.....	426
7.7.1 <i>Definiciones y ventajas.....</i>	426
7.7.2 <i>Respuesta ideal de un filtro. Tipos de filtro.....</i>	427
7.7.3 <i>Función de transferencia de un filtro y aproximaciones polinomiales.....</i>	427
7.7.4 <i>Especificaciones en un filtro real.....</i>	430
7.7.5 <i>Circuitos para filtros activos.....</i>	431
PROBLEMAS PROPUESTOS	433
SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS PROPUESTOS	440
<u>CAPITULO 8: Circuitos con amplificadores operacionales.</u>	461
8.1 Amplificadores operacionales	462
8.2 Modelo ideal del amplificador operacional	464
8.3 El amplificador operacional con realimentación negativa	466
8.4 Análisis de circuitos con AO utilizando el modelo ideal.	468
8.5 Modelo real de amplificador operacional.....	470
8.6 Aplicaciones del amplificador operacional.....	480
8.6.1 <i>Funciones lineales.....</i>	480
8.6.1.1 <i>Amplificador inversor.....</i>	482
8.6.1.2 <i>Amplificador no inversor.....</i>	482
8.6.1.3 <i>Amplificador sumador inversor.....</i>	484
8.6.1.4 <i>Seguidor de tensión.....</i>	485
8.6.1.5 <i>Integrador inversor.....</i>	486
8.6.1.6 <i>Derivador inversor.....</i>	489
8.6.2 <i>Funciones no lineales.....</i>	492
8.6.2.1 <i>Comparador.....</i>	492
8.6.2.2 <i>Trigger Schmitt.....</i>	494
8.6.2.3 <i>Rectificadores.....</i>	497
8.6.2.4 <i>Osciladores sinusoidales.....</i>	500
8.6.2.5 <i>Otras aplicaciones.....</i>	504
8.7 Respuesta en frecuencia de un amplificador operacional	507
8.8 Temporizador 555	511

PROBLEMAS PROPUESTOS	515
SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS PROPUESTOS	529
<u>Capítulo 9: Procesado de señales analógicas.....</u>	563
9.1 Diseño de Sistemas.....	564
9.1.1 <i>Concepto</i>	564
9.1.2 <i>Análisis</i>	565
9.1.3 <i>Diseño</i>	565
9.1.4 <i>Construcción</i>	567
9.1.5 <i>Pruebas</i>	567
9.2 Mediciones y sensores.....	568
9.2.1 <i>Mediciones</i>	569
9.2.2 <i>Sensores</i>	572
9.3 Procesado y acondicionamiento de señales	576
9.3.1 <i>Amplificación de la señal de medida</i>	577
9.3.2 <i>Filtrado</i>	577
9.4 Actuadores	580
PROBLEMAS PROPUESTOS	586
SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS PROPUESTOS	591
<u>Capítulo 10: Bibliografía</u>	599
10.1 Bibliografía básica	599
10.2 Bibliografía complementaria.....	599

6. Circuitos amplificadores

Objetivos: Dar a conocer los diferentes circuitos amplificadores, aprender a diseñarlos. Analizar sus analogías y sus diferencias y conocer sus aplicaciones.

Contenido: Se describe el funcionamiento de los circuitos amplificadores. Se expone el amplificador ideal y real, la realimentación, el amplificador multietapa, diferencial y el de potencia.

Problemas: Se incluyen una serie de problemas y cuestiones objetivas con la solución que ilustran claramente los temas analizados en el capítulo. Se muestran problemas de amplificadores con transistores BJT y FET variados para su análisis y diseño.

Simulación: En la aplicación electrónica que acompaña en el CD-ROM se describe la simulación de algunas partes expuestas en la teoría, así como de la mayor parte de los problemas que se incluyen en este capítulo.

6.1 Amplificadores

En electrónica, es común que se trabaje con señales pequeñas procedentes de un transductor que interactúe con el medio físico o **sensor**. El circuito electrónico se encarga de procesar adecuadamente esta información y de retornarla al mundo físico mediante un **actuador**. El segundo suele requerir una potencia mucho más elevada que el primero, por lo que es necesario elevar el nivel de la señal original. El circuito que se encarga de esta misión es el **amplificador**.

Así, por ejemplo, la aguja de un tocadiscos interactúa con el medio físico convirtiendo en vibraciones la información grabada en el microsurco de un disco de vinilo. Las bobinas de la cápsula magnética transforman estas vibraciones en señales eléctricas, constituyendo el conjunto aguja-cápsula un sensor. Un amplificador de audio es el encargado de elevar el nivel de estas señales, procurando deformar lo menos posible la onda; es decir procurando mantener la fidelidad. El resultado se aplica a uno o más altavoces, que transforman la señal en ondas de presión perceptibles por nuestros sentidos. El altavoz es un actuador.

En general, un amplificador electrónico es un dispositivo que eleva el nivel de una variable eléctrica (tensión o corriente), manteniendo su forma de onda. Esta definición no implica una ganancia de potencia, que es el producto de tensión y corriente. Debido a ello, es posible distinguir entre **amplificadores activos**, que aumentan la potencia de la señal de salida a costa de la energía proporcionada por un circuito externo; y **amplificadores pasivos**, que aumentan el nivel de una variable de salida manteniendo la potencia constante. Un transformador ideal es un amplificador pasivo, pues se aumenta una de las variables eléctricas a costa de una disminución proporcional en la otra, manteniéndose constante la potencia; tal y como se vio en el Capítulo 1.

6.1.1 Amplificadores ideales

La Figura 6.1 muestra los cuatro tipos posibles de amplificadores activos ideales: amplificador de tensión, de corriente, de transresistencia y de transconductancia. En los dos primeros la corriente de entrada es nula, mientras que en los dos últimos lo es la tensión de entrada. Debido a este hecho, la potencia de entrada es

nula y la ganancia de potencia infinita. Como todos los dispositivos ideales, son irrealizables.

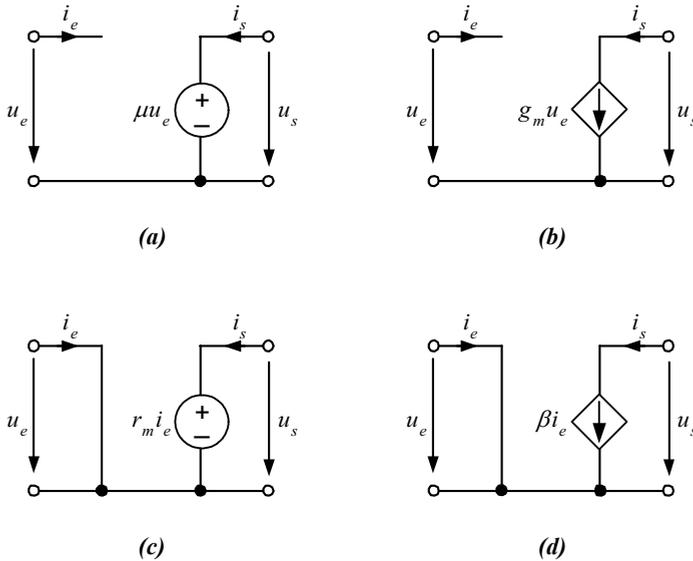


FIGURA 6.1. Amplificadores ideales: (a) amplificador de tensión, (b) amplificador de tranconductancia, (c) amplificador de transresistencia, (d) amplificador de corriente.

En la Figura 6.2 se muestra de forma gráfica el proceso de amplificación de una señal u_e en un amplificador ideal de tensión. La proyección de esta función sobre la característica de transferencia del amplificador, determina el valor en cada instante de la función de salida u_s . La curva de la función de salida mantiene el aspecto y la frecuencia de la de entrada, variando su amplitud según la pendiente μ de la característica de transferencia.

6.1.2 Amplificadores reales

Tal y como se ha dicho, los amplificadores ideales son irrealizables. Ello es debido a la imperfección de los dispositivos reales, con los que nunca se puede conseguir una impedancia de entrada y salida infinitas o nulas. La Figura 6.3 muestra un modelo de amplificador real de tensión que incluye estas impedancias donde μ es la ganancia de tensión en circuito abierto.

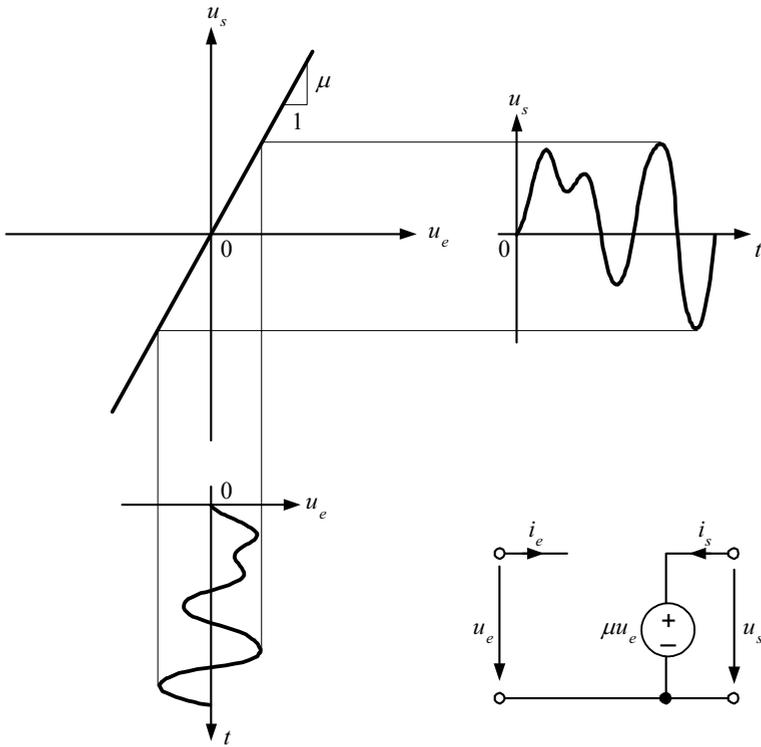


FIGURA 6.2. Funciones de entrada y salida proyectadas sobre la característica de transferencia de un amplificador ideal de tensión.

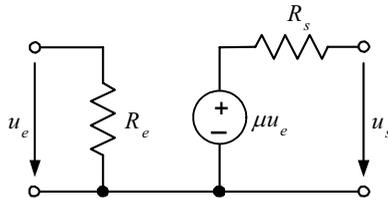


FIGURA 6.3. Modelo de amplificador real de tensión.

6.2 Realimentación negativa

En general, se dice que un sistema está **realimentado** cuando su entrada se ve afectada por las variaciones en la salida. La Figura 6.4 muestra el diagrama de bloques de un sistema genérico realimentado con realimentación negativa. Las funciones que intervienen son las Transformadas de Laplace de las funciones temporales del sistema físico, siendo $R(s)$ la función de entrada al sistema, $C(s)$ la de salida, $G(s)$ la función de transferencia y $H(s)$ la función de realimentación. A la función de entrada le es restada en el sumador \otimes la función de salida multiplicada por la función de transferencia de la realimentación, obteniéndose la función de error:

$$E(s) = R(s) - H(s)C(s) \quad [6.1]$$

y, por otro lado, se tiene que:

$$C(s) = G(s)E(s) \quad [6.2]$$

Sustituyendo la primera ecuación en la segunda, se obtiene la función de transferencia del sistema realimentado:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad [6.3]$$

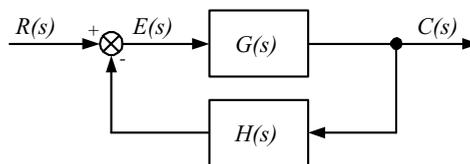


FIGURA 6.4. Diagrama de bloques de un sistema realimentado.

El interés de los sistemas realimentados negativamente reside en su estabilidad ante las perturbaciones. Si en el sistema de la figura anterior se introduce cualquier perturbación externa que tienda a modificar el valor en la salida, la vía de realimentación actuará de modo que este incremento modifique la función de error en sentido contrario. Un sistema realimentado bien diseñado será llevado a un

equilibrio en un punto cercano al que había sin perturbación, limitándose de esta forma sus efectos negativos.

6.2.1 Amplificadores realimentados

El diagrama de bloques del sistema realimentado mostrado en el punto anterior es genérico y utilizable con las Transformadas de Laplace de muchos tipos distintos de sistemas reales: mecánicos, eléctricos, electrónicos, biológicos, térmicos, etc. Los bloques y señales tienen un sentido abstracto, constituyendo una expresión gráfica de las ecuaciones diferenciales que definen el sistema. La Figura 6.5 muestra el diagrama de bloques de las posibles configuraciones de un circuito amplificador realimentado. Si se obtuvieran sus ecuaciones diferenciales y se calcularan las transformadas de Laplace, se podrían calcular las funciones de transferencia $G(s)$ y $H(s)$ que intervienen en el diagrama de la Figura 6.4.

La denominación dada a cada una de las configuraciones de realimentación se debe a la variable que se toma como referencia en la salida del circuito y a la variable que es modificada en la entrada. Por ejemplo, para el caso de realimentación en tensión con resta de tensión (Figura 6.5 (a)), la tensión de salida u_s es llevada al circuito de realimentación H donde controla la corriente que circula por él $i_h = h(u_s)$. Por tanto, la corriente de entrada al amplificador es:

$$i_a = i_e - i_h = i_e - h(u_s) \quad [6.4]$$

Si A es un amplificador de transresistencia, cualquier perturbación que afecte a la tensión de salida se verá compensada por una variación en la corriente de entrada al amplificador, minimizando sus efectos.

6.3 Amplificadores discretos

Una de las principales aplicaciones de los transistores es su uso en amplificadores. Si se observan los circuitos equivalentes de estos dispositivos vistos en los capítulos 4 y 5, se puede ver que directamente coinciden con algún modelo de amplificador real siendo, pues, este uso inmediato.

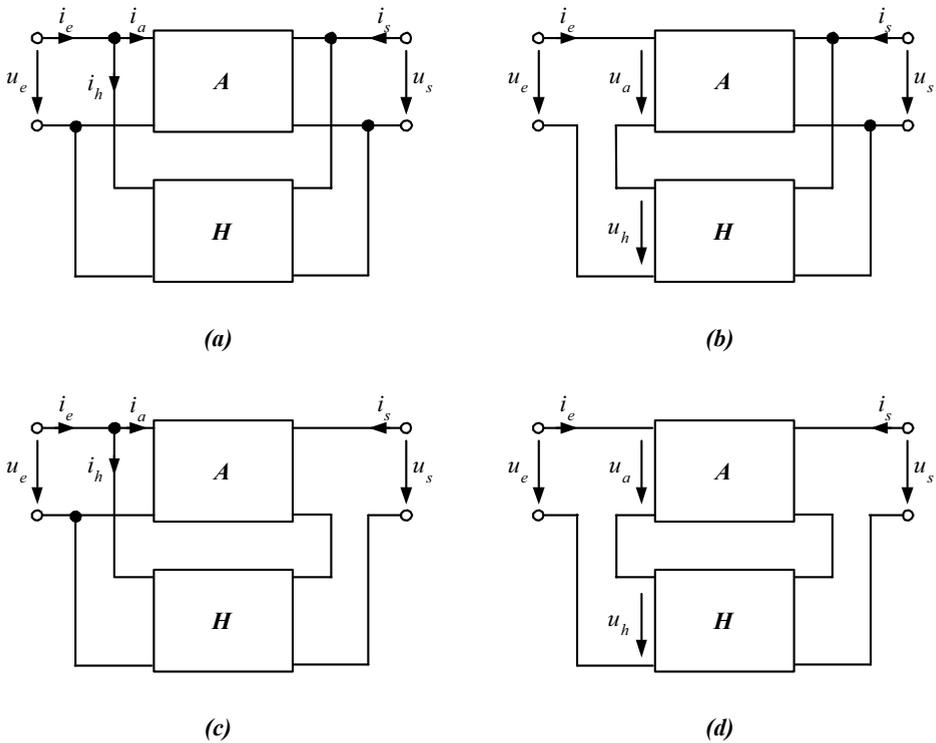


FIGURA 6.5. Posibles configuraciones para un amplificador realimentado:
 (a) realimentación en tensión, resta de corriente; (b) realimentación en corriente, resta de tensión; (c) realimentación en corriente, resta de corriente; (d) realimentación en corriente, resta de tensión.

6.3.1 Polarización

Para poder utilizar un transistor como amplificador, es necesario hacer que trabaje en el modo activo directo y que su punto de trabajo en reposo esté colocado en un lugar adecuado de la línea de carga del circuito externo. Además hay que superponer la señal a amplificar al nivel de continua proporcionado por las fuentes de polarización. La Figura 6.6 muestra la polarización básica de un amplificador con transistor BJT.

Este montaje no es práctico porque utiliza varias fuentes de tensión para la polarización y porque la corriente de polarización de base ha de

circular por la fuente de señales, lo que en muchos casos no es adecuado.

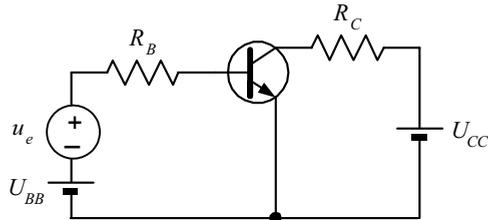


FIGURA 6.6. Amplificador con transistor NPN.

6.3.1.1 Polarización mediante resistencia de base

La Figura 6.7 muestra uno de los circuitos más sencillos de polarización que no presenta los inconvenientes señalados en el punto anterior. Existe una única fuente de alimentación U y la fuente de la señal de entrada u_e no es atravesada por la corriente de polarización.

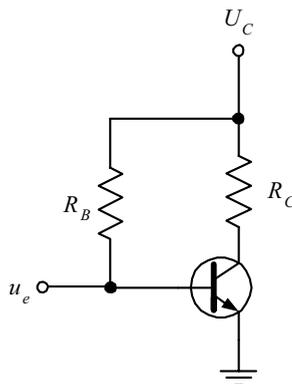


FIGURA 6.7. Amplificador NPN con polarización mediante resistencia de base.

6.3.1.2 Polarización mediante divisor de tensión

La Figura 6.8 muestra el circuito más utilizado para la polarización de un amplificador discreto.

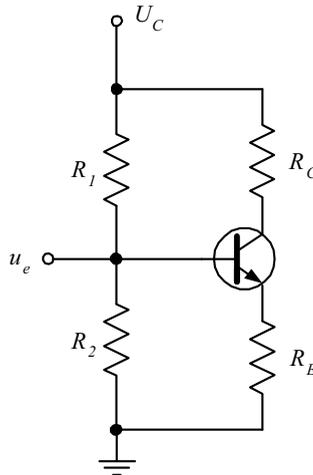


FIGURA 6.8. Amplificador NPN con polarización mediante divisor de tensión.

6.3.2 Condensadores de desacoplamiento y de acoplamiento

Un condensador de capacidad suficiente se comporta como un circuito abierto ante la corriente continua y como un cortocircuito ante la corriente alterna. Esta especial característica, se aprovecha para mejorar el funcionamiento de los amplificadores discretos de dos formas:

Condensadores de desacoplamiento. Se utilizan para poner en corto una resistencia frente a la señal, que tiene características de c.a. De esta forma, por ejemplo, se puede aumentar la ganancia al cortocircuitar la resistencia de emisor poniéndola en paralelo con un condensador de impedancia mucho menor que esta resistencia a la frecuencia característica de la señal.

Condensadores de acoplamiento. Son útiles para aislar entre sí las distintas etapas de un amplificador frente a la corriente continua, de forma que las corrientes de polarización de cada una no interfieran entre sí.

La Figura 6.9 muestra un amplificador con condensadores de paso y de acoplamiento. Los condensadores de acoplamiento C_a aíslan la etapa de las posibles interacciones con etapas adyacentes a la entrada y a la salida. El condensador de desacoplamiento C_d cortocircuita la resistencia R_e frente a las componentes alternas de la corriente.

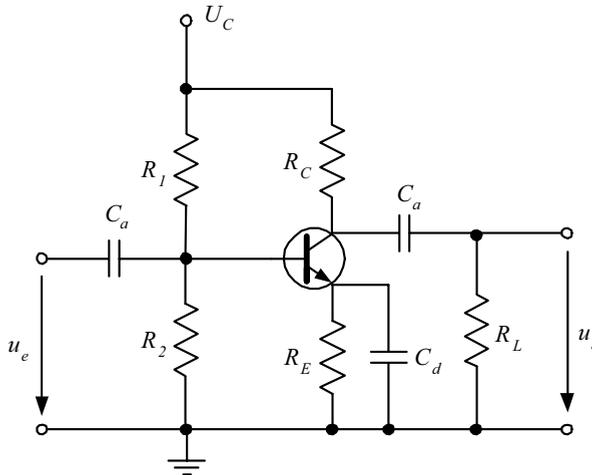


FIGURA 6.9. Amplificador NPN con condensadores de paso y de acoplamiento.

6.3.2.1 Línea de carga en corriente alterna

La existencia de condensadores de paso, determina que la línea de carga del circuito conectado al transistor de un amplificador sea distinta para la corriente de polarización y para la señal. Surge así la distinción entre la línea de carga en corriente continua y la línea de carga en corriente alterna.

La línea de carga en corriente continua para un amplificador bipolar NPN toma la expresión general:

$$i_c = -\frac{1}{R_{cc}} u_{cE} + \frac{U_{cc}}{R_{cc}} \quad [6.5]$$

donde R_{cc} es la resistencia total del lazo colector-emisor bajo condiciones c.c., es decir, considerando los condensadores como circuitos abiertos.

$$P_s = P_{ac} = U_{ef} I_{ef} = \left(\frac{U_c}{\sqrt{2}} \right)^2 \frac{1}{R_L} = \frac{U_c^2}{2R_L} = \frac{24^2}{2 \cdot 8} = 36 \text{ W};$$

donde $U_c/\sqrt{2}$ corresponde a la tensión eficaz de la señal de tensión alterna. Para la entrada se tiene:

$$P_e = P_{cc} = U_{cc} I_{cc} = \frac{2U_c^2}{\pi R_L} = \frac{2 \cdot 24^2}{3,1416 \cdot 8} = 45,83 \text{ W};$$

donde la intensidad de corriente media para una señal senoidal es:

$$I_{cc} = \frac{U_p}{\pi R_L}$$

Finalmente se puede calcular el rendimiento:

$$\eta\% = \frac{P_{carga}}{P_e} \cdot 100 = \frac{36}{45,83} = 78,55 \%$$

Por tanto, sí se puede utilizar este amplificador para la etapa de salida.

La línea de carga en corriente alterna tiene pendiente $-1/R_{ca}$ donde R_{ca} es la resistencia del lazo anterior en **condiciones c.a.**, es decir, **considerando nulas las fuentes de tensión continua y los condensadores cortocircuitos**. La entrada nula de c.a. coloca el punto de operación en Q, que será por tanto común a ambas rectas. Conocida la pendiente de una recta y un punto, se puede determinar su ecuación. Una vez ordenados los términos, resulta la ecuación general para la recta de carga c.a.:

$$i_c = -\frac{1}{R_{ca}}u_{ce} + \left(\frac{U_{CEQ}}{R_{ca}} + I_{CQ} \right) \quad [6.6]$$

En la Figura 6.10 se muestran ambas líneas de carga para los valores calculados.

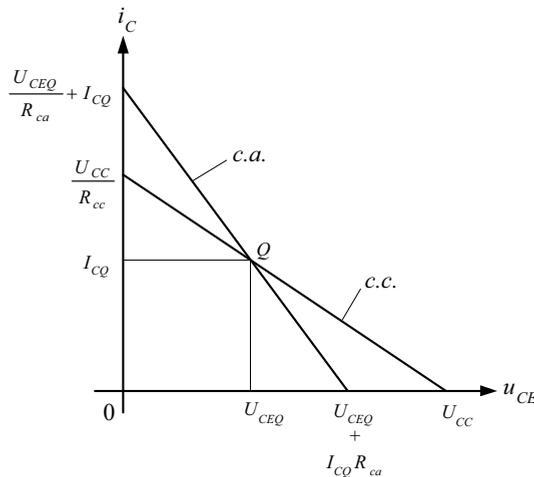


FIGURA 6.10. Líneas de carga de corriente alterna y de corriente continua.

6.3.2.2 Excursión máxima en la salida

Se obtiene la amplitud máxima en la curva de salida c.a. del amplificador si se diseña de forma que el punto de funcionamiento Q esté situado en el centro de la línea de carga c.a. En estas circunstancias se tiene que:

$$\frac{U_{CEQ}}{R_{ca}} + I_{CQ} = 2I_{CQ} \Rightarrow I_{CQ} = \frac{U_{CEQ}}{R_{ca}} \quad [6.7]$$

Sustituyendo esta expresión en la [6.5] se obtienen los valores de tensión y corriente en el punto de funcionamiento:

$$\begin{cases} U_{CEQ} = \frac{R_{ca}}{R_{ca} + R_{cc}} U_{CC} \\ I_{CQ} = \frac{U_{CC}}{R_{ca} + R_{cc}} \end{cases} \quad [6.8]$$

6.4 Amplificadores multietapas

La ganancia proporcionada por un amplificador no suele ser suficiente para los fines perseguidos por los circuitos electrónicos de amplificación. Los amplificadores de varias etapas conectan dos o más amplificadores uno detrás de otro, de forma que la salida de una etapa sirve de entrada a la siguiente. La Figura 6.11 muestra la forma en que se conecta un amplificador de dos etapas. La ganancia de voltaje total del amplificador es el producto de la ganancia de cada etapa. Igualmente ocurre para la ganancia de corriente.

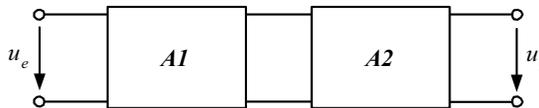


FIGURA 6.11. Amplificador de dos etapas.

Para evitar interacciones en la polarización de etapas sucesivas, las etapas se suelen aislar frente a los niveles de continua. Los métodos más comunes utilizados para el acoplamiento de etapas adyacentes son:

Acoplamiento directo. La salida del primer amplificador se conecta directamente a la entrada del siguiente. La salida c.a. de la primera etapa se superpondrá an el nivel estático c.c. de la segunda y el nivel de polarización c.c. de la primera se suma al de la segunda.

Tiene buena respuesta en frecuencia al no existir elementos almacenadores de energía.

Acoplamiento capacitivo. Mediante los condensadores de acoplamiento entre etapas que ya se han expuesto. Es la forma más sencilla y efectiva de desacoplar los niveles de c.c. entre etapas.

Acoplamiento por transformador. Este método es utilizado a menudo para acoplar etapas de amplificación de alta frecuencia. Eligiendo adecuadamente la relación de transformación, puede usarse, además, para aumentar la ganancia de tensión o de corriente.

Acoplamiento óptico: Se realiza mediante optoacopladores, componentes electrónicos que transmiten la señal eléctrica convirtiéndola previamente en una señal óptica. Se consigue, además, un aislamiento eléctrico entre etapas.

6.5 Amplificador diferencial

Los amplificadores diferenciales son un tipo especial de amplificador que en lugar de elevar el nivel de una única señal de entrada, lo hacen con la diferencia entre dos señales de entrada. La Figura 6.12 muestra su construcción elemental, utilizando transistores NPN, así como el símbolo que se utilizará en adelante para el circuito, considerado como bloque. En él, las entradas se señalan mediante los signos + y -. La entrada - se denomina **entrada inversora** y la + **entrada no inversora**. En el vértice del triángulo se sitúa la salida. Los otros dos bornes son para la polarización, que no se suele representar cuando se trabaja con el bloque como un elemento de otro circuito.

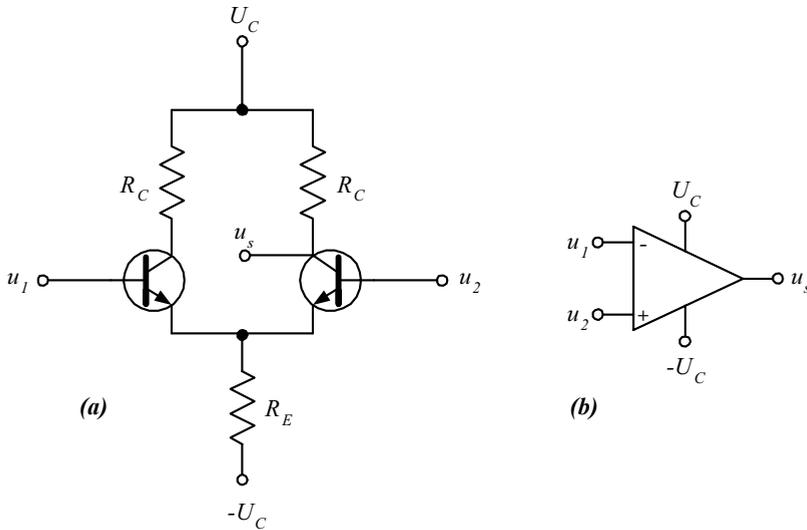


FIGURA 6.12. Amplificador diferencial (a) constitución elemental mediante elementos discretos, (b) símbolo simplificado.

La información codificada en las señales de entrada se describe mediante dos componentes: una **entrada en modo diferencial**,

$$u_d = u_+ - u_- \quad [6.9]$$

y una **entrada en modo común**, definida por:

$$u_c = \frac{u_+ + u_-}{2} \quad [6.10]$$

Los voltajes de entrada se pueden expresar como:

$$u_+ = \frac{u_d}{2} + u_c \quad \text{y} \quad u_- = u_c - \frac{u_d}{2} \quad [6.11]$$

Si se igualan los voltajes de entrada, se obtiene:

$$u_c = u_1 = u_2 \quad \text{y} \quad u_d = 0 \quad [6.12]$$