

Laboratorio de Comunicaciones

Mezcladores con elementos activos

Fernando D. Quesada Pereira¹

¹Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Universidad Politécnica de Cartagena

5 de marzo de 2010

- 1 Introducción
- 2 Generadores de Corriente
- 3 Amplificador diferencial como modulador de AM
- 4 Doble amplificador diferencial en contrafase

Características generales

Amplificador diferencial

- Para realizar las modulaciones AM, DBL y BLU, se suelen utilizar **mezcladores con elementos activos**, además de las realizadas con diodos (elementos pasivos).

Características

- La **calidad** de los mezcladores es **mayor** con elementos activos como transistores.
- Los mezcladores que utilizan elementos activos están basados en el **amplificador diferencial** (mezcladores equilibrados).
- $V_1 - V_2 = V_{BE_1} - V_{BE_2}$ (ya que existe una referencia común).
- Si los transistores están en **activa** la **corriente de colector** I_c y **emisor** I_e son casi **las mismas**.

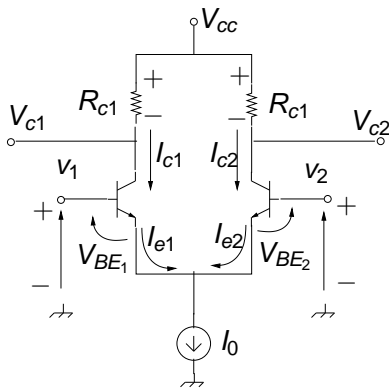


Figura: Amplificador diferencial

Amplificador diferencial

Análisis del circuito I

- El **generador de corriente** impone $I_0 = I_{E_1} + I_{E_2}$
- En el **camino cerrado** (lazo) entre las 2 entradas se cumple la ley de las tensiones de Kirchoff.

$$V_1 - V_2 = V_{BE_1} - V_{BE_2}$$

$$V_{BE_1} = V_1 - V_2 - V_{BE_2}$$

- El diodo **base-emisor** está polarizado **en directo**, y su respuesta (I-V) es:

$$I_{E_1} = I_{E_S} e^{\frac{qV_{BE_1}}{kT}} \simeq I_{C_1}$$

$$I_{E_2} = I_{E_S} e^{\frac{qV_{BE_2}}{kT}} \simeq I_{C_2}$$

Definición de constantes y variables

- I_{E_S} es la **corriente inversa de los diodos** (valor pequeño próximo a cero). Si los transistores son iguales la corriente es la misma en los dos.
- $k = 1,3806530 \cdot 10^{-23}$ (J/K) es la constante de Boltzmann.
- $T = 290 K^0$ es la temperatura ambiente.
- $q = -1,602564 \cdot 10^{-19}$ (C) es la carga del electrón.

Amplificador diferencial

Análisis del circuito II

- La **corriente de colector** es prácticamente la **misma** que la de **emisor** ($I_{C_1} \simeq I_{E_1}$), $I_{C_2} \simeq I_{E_2}$.

$$V_{BE_1} = V_1 - V_2 + V_{BE_2}$$

$$I_{E_1} = I_{E_S} e^{\frac{q}{kT} V_{BE_2}} e^{\frac{q}{kT} (V_1 - V_2)}$$

$$I_{E_1} = I_{E_2} e^{\frac{q}{kT} (V_1 - V_2)}$$

- Por otra parte, la **corriente de la fuente** es $I_0 = I_{E_1} + I_{E_2}$,
 $I_0 = I_{E_2} \left(1 + e^{\frac{q}{kT} (V_1 - V_2)} \right)$. Despejando para los dos transistores, tenemos las relaciones:

$$I_{E_2} = \frac{I_0}{1 + e^{\frac{q}{kT} (V_1 - V_2)}} \simeq I_{C_2}$$

$$I_{E_1} = \frac{I_0}{1 + e^{-\frac{q}{kT} (V_1 - V_2)}} \simeq I_{C_1}$$

Amplificador diferencial

Análisis del circuito III

- Los **voltajes de salida** se toman en los **colectores** (V_{C_1} y V_{C_2}).
- Por el **lema de las tensiones** de Kirchoff (lazos) se tiene para las dos salidas:

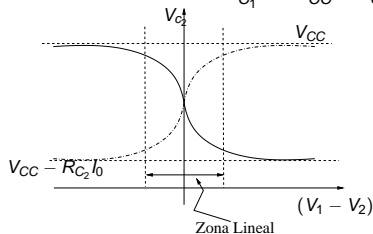
$$V_{CC} = I_{C_1} R_{C_1} + V_{C_1}$$

$$V_{CC} = I_{C_2} R_{C_2} + V_{C_2}$$

- La señales de tensión de **salida** son:

$$V_{C_2} = V_{CC} - I_{C_2} R_{C_2} = V_{CC} - \frac{R_{C_2} I_0}{1 + e^{\frac{q}{kT}(V_1 - V_2)}}$$

$$V_{C_1} = V_{CC} - I_{C_1} R_{C_1} = V_{CC} - \frac{R_{C_1} I_0}{1 + e^{-\frac{q}{kT}(V_1 - V_2)}}$$



Valores asintóticos

- Si $-(V_1 - V_2) \uparrow\uparrow$, $e \rightarrow \infty$, $V_{C_2} = V_{CC}$.
- Si $(V_1 - V_2) \uparrow\uparrow$, $e \rightarrow 0$,
 $V_{C_2} = V_{CC} - R_{C_2} \cdot I_0$.

Figura: Curvas $(V_1 - V_2)$ - (V_{C_2}, V_{C_1})

Ganancia en la zona lineal del amplificador diferencial

Cálculo

- Para $(V_1 - V_2)$ pequeño el amplificador es lineal, y su ganancia se puede obtener hallando la pendiente (derivada) en la zona lineal.

$$g = \frac{dV_{C_2}}{d(V_1 - V_2)} = R_{C_2} I_0 \frac{\frac{q}{kT} e^{\frac{q}{kT}(V_1 - V_2)}}{\left(1 + e^{\frac{q}{kT}(V_1 - V_2)}\right)^2} \quad g \text{ genérica (cualquier } V_1 - V_2)$$

- En la zona lineal, al ser $(V_1 - V_2)$ pequeño, la exponencial se puede aproximar por la unidad (primer término de su desarrollo de Taylor, $e^x \simeq 1 + x + \dots$), resultando la ganancia:

$$g \simeq \frac{dV_{C_2}}{d(V_1 - V_2)} \simeq R_{C_2} I_0 \frac{\frac{q}{kT}}{4} = \frac{q I_0 R_{C_2}}{4kT} \quad g \text{ lineal (} V_1 - V_2 \text{ pequeño)}$$

Variación con la corriente de fuente

- Si se aumenta el valor de I_0 (corriente de fuente) crece la ganancia.
- En el límite, si $I_0 \uparrow\uparrow, I_{C_1} \uparrow\uparrow$, la caída de tensión en $R_{C_1} \uparrow\uparrow$, y el colector deja de ser positivo respecto a la base. La tensión en bc (base-colector) deja de estar en inversa y el transistor no está en la zona activa.

Ejercicio Propuesto

Consideramos el amplificador diferencial de la figura, que es la base de los moduladores activos de amplitud. Se pide:

- 1 Obtenga la curva de transferencia que da la dependencia de la tensión de salida V_{C2} , en función de la diferencia de las tensiones de entrada ($V_1 - V_2$). Dibuje aproximadamente la curva de transferencia.
- 2 Encuentre el valor del generador de corriente I_0 para que cuando: $V_1 = V_2 = 5V$, los transistores entren en saturación (suponer que cuando la unión base-emisor está en directa, su tensión es de 0.7 V). ¿Cuánto vale la tensión de salida V_{C2} en este caso?

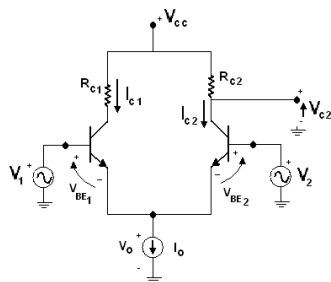


Figura: Amplificador Diferencial.

Seguidor de emisor (*Emitter Follower*)

Primer tipo de fuente de corriente

Análisis del circuito

- Se puede diseñar un **generador de corriente** con un transistor en **seguidor de emisor**.
- En la **mall**a se tiene por el lema de Kirchoff de tensiones:
 $V_S = I_B R_B + V_{BE} + V_0$.
- Por otra parte, se tiene que $V_0 = I_E R_E$. Si el transistor está en **activa**: $I_C \simeq I_E = \beta I_B$, $V_0 = \beta I_B R_E$,
 $I_B = \frac{V_0}{\beta R_E}$.

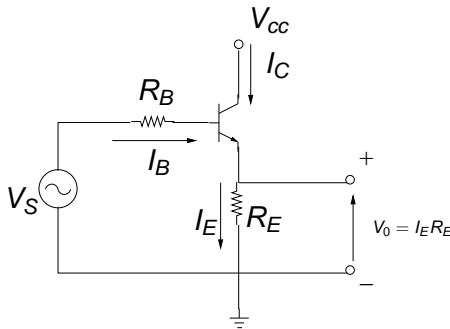


Figura: Seguidor de Emisor

Si se sustituye en la expresión de V_S , se tiene:

$$V_S = R_B \frac{V_0}{\beta R_E} + V_{BE} + V_0 ; V_S = \left(\frac{R_B}{\beta R_E} + 1 \right) V_0 + V_{BE} ; V_S - V_{BE} = \frac{R_B + \beta R_E}{\beta R_E} V_0 ; V_0 = (V_S - V_{BE}) \frac{\beta R_E}{R_B + \beta R_E}$$

Se tiene que $V_0 < V_S$. Además, si $V_S \gg V_{BE}$ y $\beta R_E \gg R_B$, entonces $V_0 \simeq V_S$, por lo que la tensión de salida sigue a la de entrada (**seguidor de tensión**) ($\frac{\beta R_E}{R_B + \beta R_E} < 1$). Para V_S fijo, V_0 es fijo, y la corriente $I_E = V_0 / R_E \simeq I_0 \simeq V_S / R_E$.



Espejo de corriente

Segundo tipo de fuente de corriente

Análisis de la fuente

- Otra forma de realizar una fuente de corriente es mediante un **espejo de corriente**.
- Se tiene que $V_{CC} = I_1 R_1 + V_{BE}$, $I_1 = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_1}$.
- Si $V_{CC} \gg V_{BE}$, $I_1 \simeq V_{CC}/R_1 \simeq Cte$.
- En el nodo A se tiene $I_1 = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2}$, $I_1 = I_{C1} + 2I_B$.
- Si los **transistores son iguales** se tiene (ley exponencial): $I_{B1} = I_{B2} = I_B$, $I_{C1} = I_{C2} = I_C$, al ser las tensiones V_{BE} iguales por circuito.
- Además, si los transistores están en **activa**:
 $I_2 = I_{C2} = \beta I_B$, $I_{C1} = I_{C2} = \beta I_B$.

Sustituyendo se tiene :

$$I_1 = I_{C2} + 2 \frac{I_{C2}}{\beta} ; I_1 = I_{C2} \frac{\beta + 2}{\beta} ; I_{C2} = \frac{\beta}{\beta + 2} I_1 = I_2$$

Si $\beta \gg 2$, $I_{C2} \simeq I_1$ es constante, luego se implementa un **generador de corriente**.

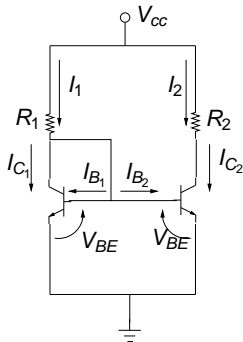


Figura: Espejo de corriente

Generalización del espejo de corriente

La ventaja la configuración de espejo de corriente es que se pueden implementar **varios generadores de corriente** a la vez.

Análisis del espejo de corriente generalizado

- Se tiene que:

$$I_2 = \dots = I_N = \frac{\beta}{\beta + N} I_1$$

- Si $\beta \gg N$, $I_N \simeq I_1$

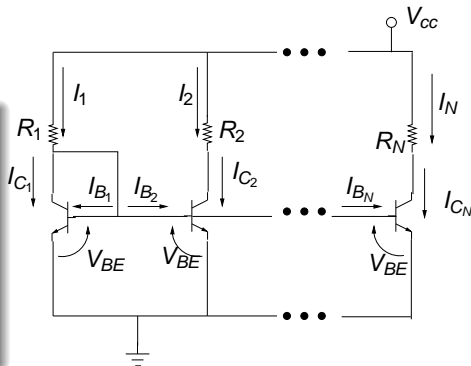


Figura: Espejo de corriente general

Ejercicio Propuesto

Dado el espejo de corriente de la figura adjunta, se pide:

- 1 Calcule el valor de la resistencia R_1 para que el espejo fije una corriente de valor 1 mA.
- 2 Calcule el valor de la resistencia R_2 para obtener un valor de $V_{CE_2} = 14$ Voltios.
- 3 Calcule el valor de las corrientes de base sabiendo que la ganancia en corriente de cualquiera de los dos transistores es: $\beta = 100$.
- 4 Calcule la corriente de colector del transistor Q_1 . ¿Cuánto vale V_{CE_1} en Q_1 ?
- 5 Diseñe un generador de corriente equivalente al anterior pero en configuración seguidor de emisor.

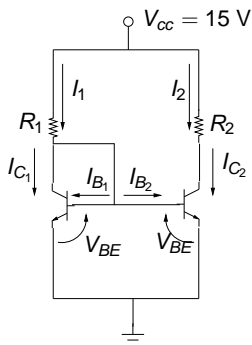


Figura: Generador de corriente en espejo de corriente.

Modulador de AM con amplificador diferencial

Análisis del circuito I

- Se puede utilizar un **amplificador diferencial como modulador** (mezclador).
- En la **zona lineal** se sabe que la **ganancia** es $g = \frac{V_{C_2}}{(V_1 - V_2)} = \frac{qI_0 R_{C_2}}{4kT}$.
- La tensión de **salida en la zona lineal** es
 $V_{C_2} = g(V_1 - V_2) = \frac{qI_0 R_{C_2}}{4kT} (V_1 - V_2)$.
- La corriente I_0 es de un generador de corriente. Si se consigue que la **señal moduladora sea del tipo $I_0 = K_0 V_m$** (caso de las fuentes, V_m moduladora) se tiene:

$$V_{C_2} = \frac{qR_{C_2}}{4kT} K_0 V_m (V_1)$$

- La fuente V_{dc} sirve **para polarizar** el transistor.

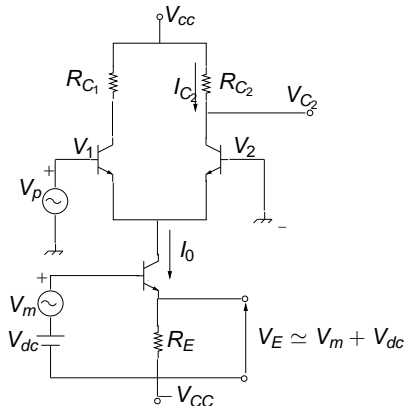


Figura: Modulador de AM con amplificador diferencial.

($V_2 = 0, V_1 = V_p, (V_1 - V_2 = V_p)$ (portadora).

Modulador de AM con amplificador diferencial

Análisis del circuito II

- La corriente I_0 es proporcional a la señal moduladora.

$$I_0 = \frac{V_m + V_{dc}}{R_E} = \frac{V_{dc}}{R_E} + \frac{V_m}{R_E}$$

$$V_{C_2} = \frac{qR_{C_2}}{4kT} V_p \left(\frac{V_{dc}}{R_E} + \frac{V_m}{R_E} \right) =$$

$$\frac{qR_{C_2}}{4kT} \frac{V_{dc}}{R_E} \left(1 + \frac{V_m}{V_{dc}} \right) V_p$$

- Si $V_m = AX_m$, siendo $\max[X_m] = 1$, se tiene:

$$V_{C_2} = \frac{qR_{C_2}}{4kT} \frac{V_{dc}}{R_E} \left(1 + \frac{A}{V_{dc}} X_m \right) V_p$$

- El índice de modulación es $m = A/V_{dc}$ (amplitud de la moduladora-tensión de polarización).

- Además de la señal de AM aparecen o tras componentes superpuestas como consecuencia de la polarización del amplificador diferencial (común en los mezcladores).
- Si $V_p = 0$, entonces $I_{C_2} = I_0/2$ (las dos ramas iguales).

$$V_{CC} = I_{C_2} R_{C_2} + V_0$$

$$V_0 = V_{CC} - \frac{I_0}{2} R_{C_2}$$

$$V_0 = V_{CC} - \frac{R_{C_2}}{2} \left(\frac{V_{dc}}{R_E} + \frac{V_m}{R_E} \right)$$

$$V_0 = V_{CC} - \frac{R_{C_2}}{2} \frac{V_{dc}}{R_E} - \frac{R_{C_2}}{2R_E} V_m$$

- Aparece una componente espúrea continua y otra a la frecuencia de la moduladora.

Ejercicio Propuesto

Considere el circuito modular de AM mediante amplificador diferencial de la figura. Se pide:

- 1 Describa cuáles son las partes principales del circuito y qué función realizan.
- 2 Obtenga la intensidad de colector I_0 . Encuentre la expresión rigurosa de dicha corriente, para posterior simplificar ésta mediante las aproximaciones pertinentes. Finalmente encuentre el valor numérico.
- 3 ¿Qué sucede si aumenta indefinidamente la corriente I_0 ? (Justifique la respuesta)
- 4 Calcule la señal de salida del circuito para $V_p = 0$ antes del condensador.
- 5 Calcule la expresión de señal total de salida del circuito antes del condensador C. ¿Qué función realiza el condensador C?
- 6 Dibuje el espectro de la señal de salida antes y después del condensador C.
- 7 Encuentre la expresión de la modulación AM de salida en la resistencia de carga R_L . ¿Cuál es el índice de modulación m ? En vista de dicho índice de modulación, determine de que tipo de modulación AM se trata y cuál sería el demodulador más sencillo para detectar la información de la citada modulación.
- 8 Sustituya el espejo de corriente por una fuente de alimentación de tipo seguidor de emisor que entregue la misma corriente I_0 . Justifique el resultado.

Ejercicio Propuesto

Figuras

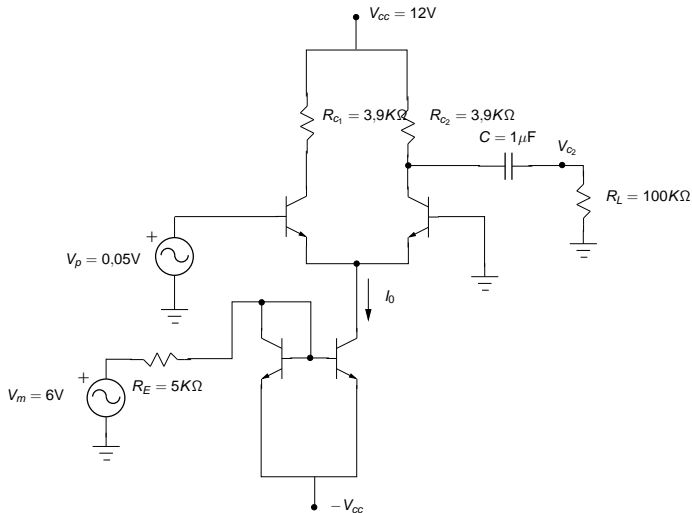


Figura: Modulador AM con amplificador diferencial y espejo de corriente.

Eliminación de las componentes indeseadas

Mezclador de AM con mezclador equilibrado con amplificador diferencial

Componentes espúreas

- Aparecen siempre estas componentes superpuestas aunque no haya portadora.
- Es necesario **filtrar** para limpiar la señal AM (método I).
- Existe una técnica para eliminar los términos indeseados, basada en la utilización de **dos amplificadores diferenciales con fase cambiada** (método II).
- La componente V_m sin modular aparece en cada par diferencial cambiada de signo y se anula, con lo que **sólo queda la señal modulada** (método II).

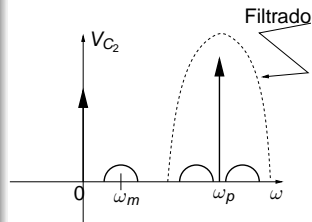


Figura: Modulación AM y componentes indeseadas

Ejercicio Propuesto

- 1 Calcule la ganancia en modo diferencial del amplificador de la figura, y encuentre el valor aproximado de ésta en la zona lineal. ¿Qué sucede si aumenta el valor de I_0 ? ¿Se puede incrementar indefinidamente dicho valor? (Razone la respuesta). ¿Cómo calcularía la ganancia en modo común del mismo amplificador?. Diga como ha de ser idealmente esta última ganancia.
- 2 Para modelar la fuente de corriente I_0 se utiliza el circuito de la segunda figura. Diga como se denomina dicho circuito y describa su principio de funcionamiento. Por último, calcule la corriente entregada a través del colector del transistor.
- 3 Mediante la unión de los circuitos de las figuras es posible implementar un modulador AM.
 - Dibuje el esquema conjunto que forma el modulador AM.
 - Calcule la tensión de salida del circuito V_0 , si $V_1 = V_p$, $V_2 = 0$ y $V_m = A X_m$ (siendo $\max[|X_m|] = 1$). ¿Cual es el índice de modulación m ?
 - Si $V_1 = 0$ y $V_2 = 0$, ¿qué señal V_0 se tiene a la salida del circuito?. ¿Es conveniente la aparición de dicha señal?. ¿De qué forma la puede evitar?.

Ejercicio Propuesto

Figuras

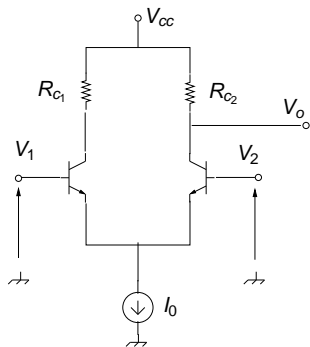


Figura: Esquema de un amplificador diferencial.

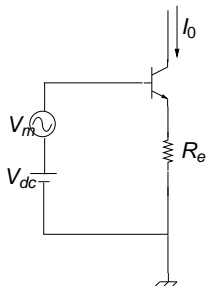


Figura: Circuito fuente de corriente I_0 .

Doble amplificador diferencial en contrafase

Mezclador doblemente equilibrado. Análisis del circuito I.

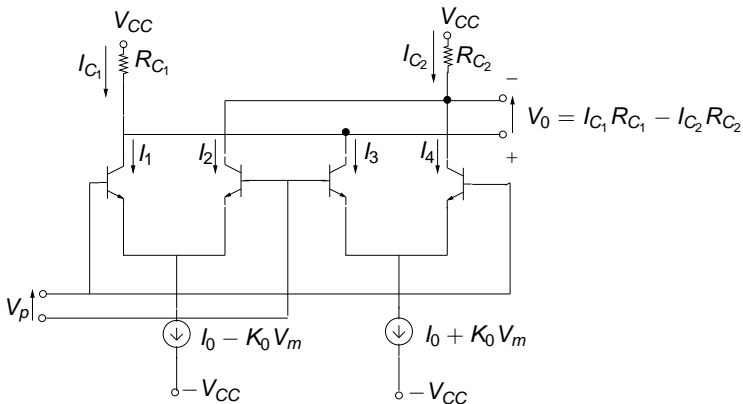


Figura: Doble Amplificador Diferencial en contrafase

Si $V_p = 0$ se tiene: $I_{C1} = I_1 + I_3 = \frac{I_0}{2} - K_0 \frac{V_m}{2} + \frac{I_0}{2} + K_0 \frac{V_m}{2} = I_0$ y

$I_{C2} = I_2 + I_4 = \frac{I_0}{2} - K_0 \frac{V_m}{2} + \frac{I_0}{2} + K_0 \frac{V_m}{2} = I_0$.

Doble amplificador diferencial en contrafase

Análisis del circuito II.

$$V_0 = I_{C_1} R_{C_1} - I_{C_2} R_{C_2} \quad ; \quad \text{Si } (R_{C_1} = R_{C_2}) \rightarrow V_0 = R_C (I_{C_1} - I_{C_2})$$

Si $V_0 = 0$, **desaparecen todas las componentes de continua y a la frecuencia de la moduladora**. En cuanto a la modulación

$$V_{C_1} = V_{CC} - I_{C_1} R_{C_1} = V_{CC} - I_{C_1} R_C \quad ; \quad V_{C_2} = V_{CC} - I_{C_2} R_{C_2} = V_{CC} - I_{C_2} R_C$$

$$V_0 = (I_{C_1} - I_{C_2}) R_C$$

Se escriben las **corrientes de colector para los cuatro transistores** ($V_1 - V_2 = V_p$):

$$I_1 = \frac{I_0 - K_0 V_m}{1 + e^{-\frac{q}{kT} V_p}} \quad ; \quad I_2 = \frac{I_0 - K_0 V_m}{1 + e^{+\frac{q}{kT} V_p}} \quad ; \quad I_3 = \frac{I_0 + K_0 V_m}{1 + e^{+\frac{q}{kT} V_p}} \quad ; \quad I_4 = \frac{I_0 + K_0 V_m}{1 + e^{-\frac{q}{kT} V_p}}$$

Se tiene para las **corrientes de la salida V_0** :

$$I_{C_1} = I_1 + I_3 = \frac{I_0 - K_0 V_m}{1 + e^{-\frac{q}{kT} V_p}} + \frac{I_0 + K_0 V_m}{1 + e^{+\frac{q}{kT} V_p}} \quad ; \quad I_{C_2} = I_2 + I_4 = \frac{I_0 - K_0 V_m}{1 + e^{+\frac{q}{kT} V_p}} + \frac{I_0 + K_0 V_m}{1 + e^{-\frac{q}{kT} V_p}}$$

Finalmente, la **tensión de salida**:

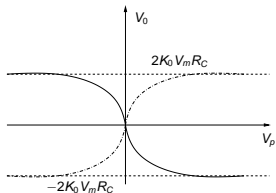
$$V_0 = \left(\frac{I_0 - K_0 V_m}{1 + e^{-\frac{q}{kT} V_p}} + \frac{I_0 + K_0 V_m}{1 + e^{+\frac{q}{kT} V_p}} - \frac{I_0 - K_0 V_m}{1 + e^{+\frac{q}{kT} V_p}} - \frac{I_0 + K_0 V_m}{1 + e^{-\frac{q}{kT} V_p}} \right)$$

Doble amplificador diferencial en contrafase

Agrupando términos:

$$V_0 = R_C \left(\frac{-2K_0 V_m}{1 + e^{\frac{-q}{kT} V_p}} + \frac{2K_0 V_m}{1 + e^{\frac{q}{kT} V_p}} \right) ; \quad V_0 = 2K_0 V_m R_C \left(\frac{1}{1 + e^{\frac{-q}{kT} V_p}} + \frac{1}{1 + e^{\frac{q}{kT} V_p}} \right)$$

Se representa la **respuesta de la tensión de salida** V_0 en **función de la tensión diferencial** (V_p).



Comportamiento asintótico

- $V_p \uparrow\uparrow, e^+ \rightarrow \infty, e^- \rightarrow 0.$
- $-V_p \uparrow\uparrow, e^+ \rightarrow 0, e^- \rightarrow \infty.$

Figura: Relación entrada V_0 , salida V_p

Se evalúa la pendiente de la curva para calcular la ganancia

$$g = \frac{dV_0}{dV_p} = 2K_0 V_m R_C \left[\frac{\frac{-q}{kT} e^{\frac{q}{kT} V_p}}{\left(1 + e^{\frac{q}{kT} V_p}\right)^2} - \frac{\frac{q}{kT} e^{\frac{-q}{kT} V_p}}{\left(1 + e^{\frac{-q}{kT} V_p}\right)^2} \right]$$

g genérica (cualquier V_p)

Doble amplificador diferencial en contrafase

Ganancia en zona lineal. Mezcla ideal

Salida del circuito en zona lineal

Si $V_p \simeq 0$ (pequeña), $e^x \rightarrow 1$, por lo que:

$$g = \frac{dV_0}{dV_p} = 2K_0 V_m R_C \left(\frac{-q}{4kT} - \frac{-q}{4kT} \right) = -2K_0 V_m R_C \frac{2q}{4kT} = \frac{K_0 V_m R_C q}{kT}$$

En la **zona lineal** la **ganancia** se escribe como:

$$g = \frac{V_0}{V_p} = \frac{K_0 R_C q}{kT} V_m \quad \text{g lineal (} V_p \text{ pequeña)}$$

La **tensión de salida en la zona lineal** será:

$$V_0 = \frac{K_0 R_C q}{kT} V_m V_p \quad \text{Modulación DBL ideal}$$

Una vez más resulta el **producto de dos señales** (mezcla ideal), desaparece incluso la portadora, por lo que resulta mejor para modular una **doble banda lateral (DBL)**.

Generadores de corriente para este tipo de moduladores

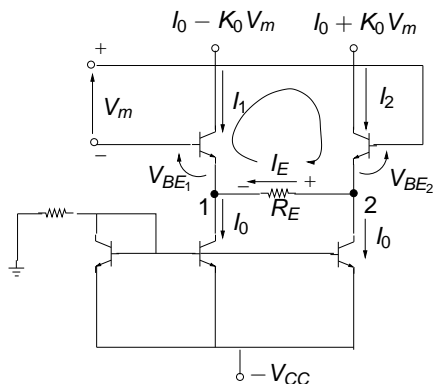


Figura: Fuente de corriente para el doble amplificador diferencial (mezclador doblemente equilibrado).

- Por el **lema de las tensiones** Kirchoff se cumple $V_m = V_{BE_2} + I_E R_E - V_{BE_1}$.
- I_0 es una **corriente constante** impuesta por el espejo de corriente.
- Si los transistores son iguales $V_{BE_1} = V_{BE_2}$, y entonces $I_E = V_m / R_E$
- Al final, por el **lema de corriente** de Kirchoff se tiene:

nodo 1	nodo 2
$I_1 + I_E = I_0$	$I_2 = I_0 + I_E$
$I_1 = I_0 - \frac{V_m}{R_E}$	$I_2 = I_0 + \frac{V_m}{R_E}$

- Se ve que $K_0 = 1/R_E$, y por tanto la salida es $(V_0 = \frac{q}{kT} \left(\frac{R_C}{R_E}\right) V_m V_p \simeq 40 \left(\frac{R_C}{R_E}\right) V_m V_p)$. R_C y R_E controlan la **ganancia de la modulación**.

Ejercicio Propuesto

- 1 Considere el circuito de la primera figura.
 - Diga que denominación recibe el circuito anterior y describa su principio de funcionamiento.
 - Se tienen los valores siguientes para los componentes del circuito: $R_1 = 6,8k\Omega$, $R_2 = 50\Omega$ y $V_{cc} = 8V$. Para todos los transistores utilice $\beta = 50$ y $V_{BE} = 0,65V$. En base a los datos anteriores, calcule de forma precisa y justificada la intensidad de corriente I_0 .
 - Si $V_m = 1V$ calcule el valor de la resistencia R_e para que se cumpla la relación $I_2/I_1 = 1,1$.
- 2 El circuito de la primera figura se conecta al representado en la segunda figura.
 - Discuta la función y posibles aplicaciones del circuito conjunto.
 - Calcule de forma justificada el valor de R_c para que la ganancia $g = dV_0/dV_p$ en la zona lineal del anterior esquema sea igual a 100. Para llevar a cabo el cometido anterior, tenga en cuenta los resultados obtenidos en la primera parte del ejercicio y los valores de las constantes $q = 1,602e - 19C$, $k = 1,38e - 23J/K$, $T = 293K$.

Ejercicio Propuesto

Vamos a considerar uno de los osciladores montados en el laboratorio, tal y como muestra la figura. Se pide:

- 1 Indique las condiciones matemáticas que tiene que cumplir el circuito para que entre en oscilación. Justifique la respuesta.
- 2 Obtenga la ganancia en lazo abierto del circuito, en función de la frecuencia.
- 3 Suponiendo en primera aproximación que la celda de defasaje unidad mostrada en la figura no se ve afectada por el resto del circuito, calcule el valor de R para que el circuito oscile a 5 KHz (tomar $C = 18 \text{ nF}$). Razone la respuesta.

