

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, COMPUTACIÓN Y
CONTROL

Laboratorio N°1: Amplificadores Discretos

Estudiante:
Fajardo Carla
C.I.:27571576

8 de junio de 2025

Índice

1. Resumen

En este laboratorio se estudió el amplificador discreto, compuesto por transistores, resistencias y condensadores, analizando sus tres etapas clave: diferencial (encargada de amplificar la diferencia entre señales de entrada), impulsora (que provee la corriente necesaria para excitar la etapa final) y de potencia (que entrega la señal amplificada a la carga). El propósito fue comparar los valores teóricos y experimentales de los puntos de operación, ganancia e impedancias (en modos diferencial y común), así como evaluar su respuesta en frecuencia (ancho de banda y ganancia) y el efecto de la realimentación negativa (estabilización de la ganancia) y positiva (aumento de ganancia con riesgo de inestabilidad). Los resultados demostraron la importancia del diseño individual de cada etapa y su interacción en el sistema, validando los principios teóricos de un amplificador discreto y realimentación.

2. Introducción

Los amplificadores discretos, implementados con componentes individuales, constituyen un elemento fundamental en electrónica para comprender los principios básicos de amplificación de señales. Este estudio experimental caracteriza el comportamiento de un amplificador discreto, analizando tanto el funcionamiento independiente como acoplado de sus tres etapas principales: la etapa diferencial (encargada del procesamiento inicial de la señal), la etapa impulsora (que condiciona la señal para su amplificación final) y la etapa de potencia (responsable de entregar la energía a la carga).

A través de mediciones precisas de ganancia, impedancias y respuesta en frecuencia, la investigación establece una conexión entre los fundamentos teóricos y su manifestación práctica, con especial énfasis en los efectos de la realimentación negativa (para estabilidad) y positiva (para incremento de ganancia).

Los resultados obtenidos no solo validan los modelos teóricos, sino que además revelan las relaciones críticas entre las diferentes etapas del amplificador. Estas conclusiones proporcionan directrices valiosas para el diseño y optimización de circuitos amplificadores, remarcando la importancia de considerar tanto el comportamiento individual de cada componente como su interacción dentro del sistema completo.

3. Marco Teórico

3.1. Constitución interna de un BJT

El transistor es un dispositivo semiconductor de tres terminales (emisor, base y colector), equivalente a dos diodos PN unidos en sentido opuesto. Existen dos tipos principales según la configuración de sus uniones: NPN y PNP.

Funcionamiento básico:

Polarización: la unión base-emisor se polariza en directa, mientras que la unión base-colector se polariza en inversa. Esto permite que circule una corriente inversa por la unión base-colector.

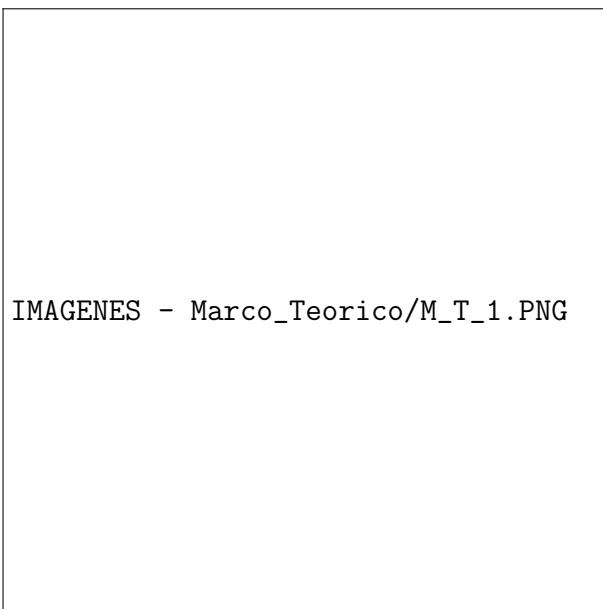


Ilustración 1: Transistores BJT

3.2. El transistor NPN

El transistor bipolar NPN es un dispositivo semiconductor compuesto por tres regiones dopadas: una capa delgada de material tipo P (base) intercalada entre dos capas de material tipo N (emisor y colector), fabricadas en un mismo cristal de silicio o germanio. Estas zonas corresponden a los terminales del transistor: emisor (E), base (B) y colector (C).

3.2.1. Flujo de portadores

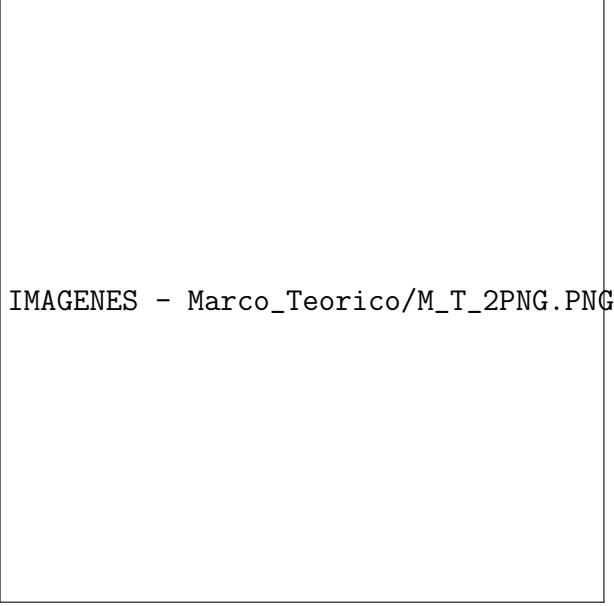
El emisor (altamente dopado) inyecta portadores de carga (electrones) hacia la base.

La base (delgada y poco dopada, ≈ 100 veces menos que el emisor/colector) controla el flujo de estos portadores.

El colector (de mayor espesor, ≈ 2 veces el del emisor) recoge los portadores que no son recombinados en la base.

3.2.2. Uniones PN

- Unión emisor-base (P-N): Polarizada en directa para permitir la inyección de electrones.
- Unión base-colector (N-P): Polarizada en inversa para facilitar la captura de electrones por el colector.



IMAGENES - Marco_Teorico/M_T_2PNG.PNG

Ilustración 2: Transistores NPN

3.3. Transistor Bipolar PNP

El transistor bipolar PNP es un dispositivo semiconductor con tres regiones (P-N-P), donde una capa delgada N (base) se encuentra entre dos capas P (emisor y colector).

3.3.1. Polarización:

- Emisor-Base: Polarizada en directa (tensión negativa en emisor respecto a base).
- Base-Colector: Polarizada en inversa (tensión negativa en base respecto a colector).

3.3.2. Flujo de corriente:

- El emisor inyecta huecos hacia la base.
- La base (delgada y poco dopada) controla el flujo; los huecos no recombinados llegan al colector.

Comparación con NPN:

Mismo principio, pero con polaridades y portadores invertidos (huecos en lugar de electrones). [1]

3.4. Amplificadores - Amplificación

Los amplificadores son circuitos que se utilizan para aumentar (amplificar) el valor de la señal de entrada, generalmente muy pequeña, y así obtener una señal a la salida con una amplitud mucho mayor a la señal original.

Los amplificadores pueden implementarse con:

- Transistores bipolares
- Amplificadores operacionales
- Tubos o válvulas electrónicas
- FETs

[2]

3.5. Clasificación de los amplificadores

Los amplificadores se clasifican según las frecuencias con las que trabajan:

- **Amplificadores de Audiofrecuencia (A.F.) o Baja Frecuencia (B.F.):** Trabajan dentro de la banda audible
- **Amplificadores de Radiofrecuencia (R.F.):** Trabajan con altas frecuencias

Dentro de estas categorías, se clasifican según su forma de trabajo:

1. **Amplificadores de tensión:** Proporcionan mayor tensión en la salida que en la entrada
2. **Amplificadores de potencia:** Proporcionan mayor tensión y corriente (amplificación de potencia)

3.6. Clases de amplificadores de potencia

Los amplificadores de potencia (para B.F. o R.F.) se clasifican según cuánta señal entregan:

3.6.1. Amplificador Clase A

- Alta fidelidad de audio
- Mayor costo y tamaño
- Alta disipación de potencia
- Eficiencia típica: 20-30 %

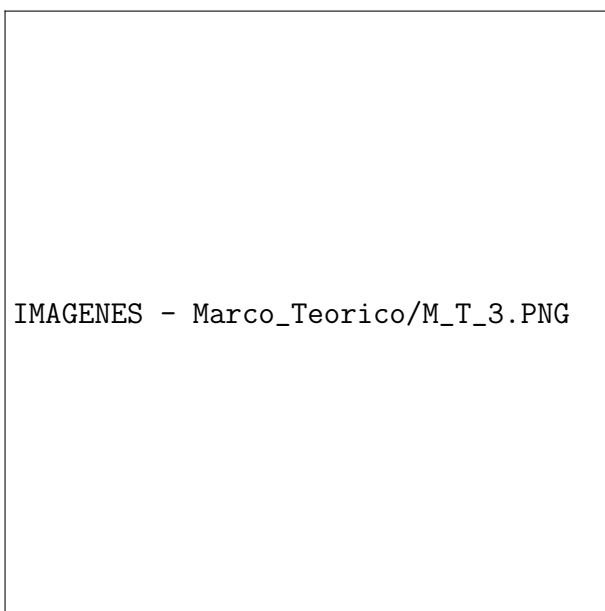


Ilustración 3: Amplificador Clase A

3.6.2. Amplificador Clase B

- Reposo en corte (sin consumo en ausencia de señal)
- Eficiencia típica: 70 %
- Distorsión de cruce por cero

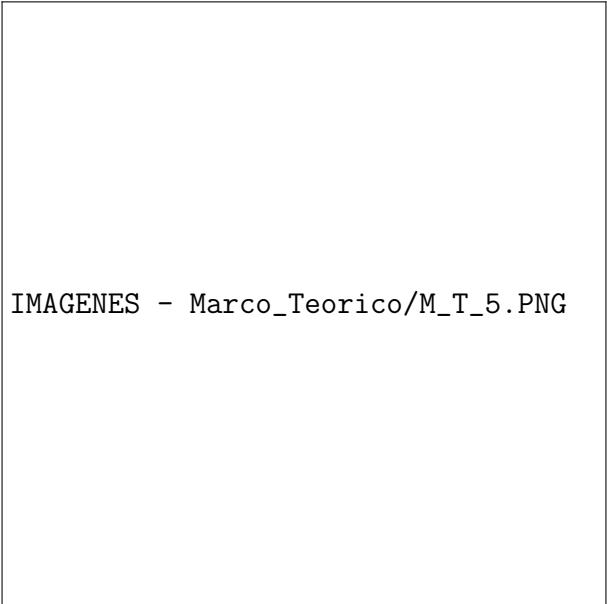


IMAGENES - Marco_Teorico/M_T_4.PNG

Ilustración 4: Amplificador Clase B

3.6.3. Amplificador Clase AB

- Combina características de Clase A y B
- Menor distorsión que Clase B
- Mayor eficiencia que Clase A (50-60 %)



IMAGENES - Marco_Teorico/M_T_5.PNG

Ilustración 5: Amplificador Clase AB

3.6.4. Amplificador Clase C

- Uso exclusivo en R.F.
- Alta eficiencia (70-85 %)
- Circuito resonante (tanque LC) en colector
- Ecuación de frecuencia de resonancia:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

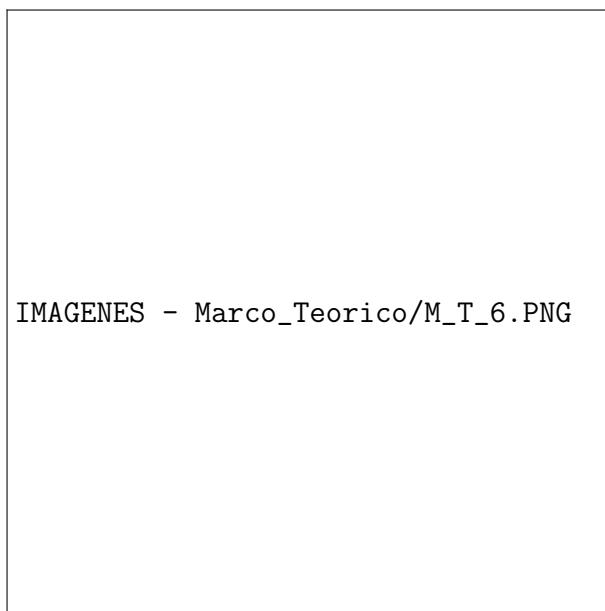


Ilustración 6: Amplificador Clase C

3.6.5. Amplificador Clase D

- Amplificadores digitales (conversión PWM)
- Eficiencia mayor del 90 %
- Baja disipación térmica
- Ecuación de modulación PWM:

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (2)$$

donde D es el ciclo de trabajo

[3]

3.7. Amplificadores Diferenciales

Los amplificadores diferenciales son circuitos electrónicos especializados en amplificar exclusivamente la diferencia entre dos señales de entrada (V_1 y V_2), mientras rechazan eficientemente cualquier señal común a ambas entradas. La relación fundamental que describe su operación está dada por:

$$V_{out} = A_d(V_1 - V_2) \quad (3)$$

donde A_d representa la ganancia diferencial del amplificador. Una de sus características más importantes es el *Common-Mode Rejection Ratio* (CMRR), que se expresa como:

$$\text{CMRR} = 20\log_{10}\left(\frac{A_d}{A_{cm}}\right) \quad [\text{dB}] \quad (4)$$

siendo A_{cm} la ganancia en modo común. Estos circuitos típicamente emplean:

- Un par de transistores cuidadosamente apareados (BJT o MOSFET)
- Una fuente de corriente constante para polarización
- Resistencias de carga precisas

3.7.1. Aplicaciones Principales

Gracias a su capacidad para minimizar ruido e interferencias, estos amplificadores son componentes esenciales en:

- La etapa de entrada de amplificadores operacionales
- Sistemas de conversión analógico-digital (ADC)
- Equipos de audio profesional de alta fidelidad
- Instrumentación médica y equipos de diagnóstico

Su diseño versátil y alto rendimiento los hace indispensables en aplicaciones donde se requiere precisión y rechazo de señales parásitas. [4]

3.8. Respuesta en Frecuencia

La respuesta en frecuencia es un concepto fundamental en la ingeniería electrónica y se refiere a la manera en que un sistema electrónico responde a diferentes frecuencias de señal. En particular, en el caso de un amplificador, la respuesta en frecuencia se refiere a cómo el amplificador afecta la amplitud y la fase de la señal de entrada a diferentes frecuencias.

La respuesta en frecuencia de un amplificador se puede representar mediante una curva de respuesta en frecuencia, que muestra la amplitud de la señal de salida en función de la frecuencia de la señal de entrada. Esta curva puede mostrar las frecuencias en las que el amplificador tiene una ganancia máxima, así como las frecuencias en las que la ganancia es menor.

Es importante comprender la respuesta en frecuencia de un amplificador porque puede afectar la calidad de la señal que se está amplificando. Si un amplificador tiene una respuesta en frecuencia deficiente, puede introducir distorsión en la señal de salida, lo que puede hacer que la señal sea difícil de interpretar o incluso inútil.

Por lo tanto, es importante diseñar amplificadores con una respuesta en frecuencia adecuada y medir la respuesta en frecuencia de un amplificador existente para asegurarse de que está funcionando correctamente.

En el caso de un amplificador, la respuesta en frecuencia puede afectar la calidad de la señal amplificada y es importante diseñar y medir la respuesta en frecuencia de un amplificador para asegurarse de que está funcionando correctamente.[5]

3.9. Sistemas Realimentados

En un sistema realimentado, se toma una muestra de la señal de salida y se aplica a la entrada a través de una red adecuada. En la ilustración ?? se muestra un amplificador cuya ganancia sin realimentación es $A\angle\alpha$ y una red (generalmente pasiva) con relación de transferencia $B\angle\beta$ que retorna parte de la señal de salida a la entrada. Ambos parámetros dependen de la frecuencia.

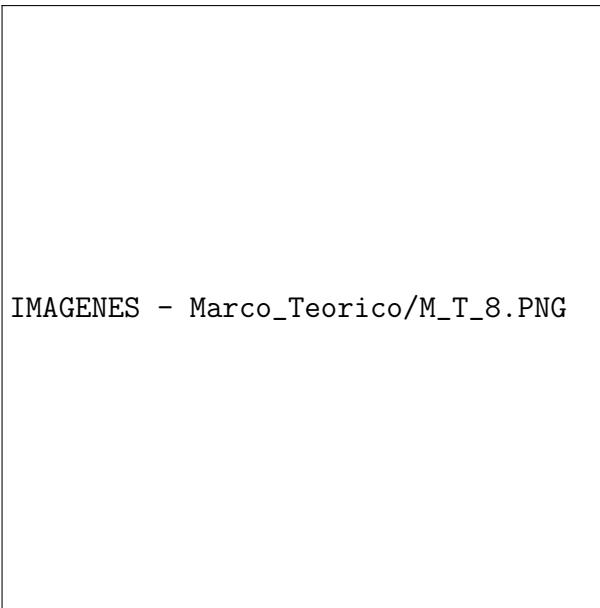


Ilustración 7: Sistemas Realimentados

$$s_0 = s_c \cdot A \angle \alpha = (s_1 + s_r) A \angle \alpha \quad (5)$$

3.9.1. Casos Notables de Realimentación

1. Realimentación Positiva:

Cuando $\alpha + \beta = 0^\circ$, la señal realimentada está en fase con la señal de entrada.

En este caso:

- $|A_r| > |A|$
- Si $A \cdot B = 1$, la amplificación tiende a infinito y el circuito oscila

2. Realimentación Negativa:

Cuando $\alpha + \beta = 180^\circ$, la señal realimentada está en oposición de fase:

- $|A_r| < |A|$
- La ganancia con realimentación viene dada por:

$$A_r = \frac{s_o}{s_i} = \frac{A}{1 + A \cdot B} \quad (6)$$

[6]

¹La ecuación (??) es válida cuando se cumple la condición de fase $\alpha + \beta = 180^\circ$

4. Objetivos

4.1. Objetivos Generales

- Analizar el comportamiento de un Amplificador de Potencia.
- Analizar el comportamiento de un Amplificador Diferencial.
- Analizar un Amplificador de múltiples etapas, acoplado capacitivamente.
- Analizar el comportamiento en función de la frecuencia de un amplificador multietapas.
- Analizar el efecto de la realimentación en el comportamiento de un amplificador.

4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar, en dinámico, etapas amplificadoras de potencia B y AB.
- Calcular y medir la polarización de los Amplificadores de potencia B y AB.
- Determinar las impedancias de entrada y salida de las distintas etapas.
- Reconocer las distorsiones generadas por las etapas de simetría complementaria.
- Modelar circuitualmente etapas amplificadoras diferenciales, en dinámico y en términos de cada modo, común y diferencial.
- Determinar la polarización de un Amplificador diferencial y verificarla experimentalmente.
- Distinguir entre una señal de entrada modo común y modo diferencial.
- Analizar un amplificador de múltiples etapas, acoplado capacitivamente de acuerdo a: Ganancia del amplificador, Impedancia de entrada y salida. Tensión de alimentación.
- Construir el amplificador con los transistores existentes comercialmente y con las especificaciones y curvas suministradas por el fabricante.
- Caracterizar el amplificador multietapas con los valores obtenidos experimental y teóricamente.
- Definir el modelo de banda ancha para amplificadores.

- Analizar los efectos de las reactancias en la respuesta en frecuencia de un amplificador y discriminar aquellas que actúan en la región de bajas frecuencias de la que actúan en altas frecuencias.
- Reconocer que la realimentación negativa reduce la ganancia y a cambio ofrece:
 - Mayor independencia de la ganancia del valor de la ganancia del amplificador base.
 - Disminución de la impedancia de salida.
 - Aumento de la impedancia de entrada.
 - Aumento del ancho de banda.
 - Mejoramiento de la linealidad del amplificador.

5. Equipos e Instrumentos

Tabla 1: Equipos e instrumentos

Equipo	Marca	Modelo
Osciloscopio	UNI-T	UTD2102CEX+
Generador de Onda	UNI-T	UTG932E
Fuente de alimentacion DC	UNI-T	UTP3305-II
Protoboard	Miyako	EIC-108

6. Componentes y materiales

Tabla 2: Componentes y materiales de la etapa de potencia

Referecia	Descripcion	Especificaciones
R17,R12	Resistencia de película de carbón	22kΩ,1/4 W
R13,R14	Resistencia de película de carbón	10 Ω,1/4 W
Q4	BJT de tipo NPN	2N2222
Q5	BJT de tipo NPN	BC238
Q6	BJT de tipo PNP	BC238
CS	Capacitor de Poliéster	470nF, 100V
U1	Amplificador operacional	MC1741CP1

Tabla 3: Componentes y materiales de la etapa diferencial

Referecia	Descripcion	Especificaciones
R1,R2,R8,R9	Resistencia de película de carbón	100kΩ,1/4 W
R3,R6	Resistencia de película de carbón	4,7KΩ,1/4 W
R4,R7	Resistencia de película de carbón	15KΩ,1/4 W
R5	Resistencia de película de carbón	1,5KΩ,1/4 W
Q1	BJT de tipo NPN	2N2222
Q2	BJT de tipo NPN	2N2222
C1, C3	Capacitor Electrolítico	10μF

Tabla 4: Componentes y materiales de la etapa impulsora

Referencia	Descripción	Especificaciones
R10	Resistencia de película de carbón	220kΩ, 1/4 W
R11	Resistencia de película de carbón	680Ω, 1/4 W
R16	Resistencia de película de carbón	6,8KΩ, 1/4 W
R15	Resistencia de película de carbón	33KΩ, 1/4 W
Q3	BJT de tipo PNP	BC307
C2	Capacitor Electrolítico	1μF
C4	Capacitor de Poliéster	22pF
C6	Capacitor Electrolítico	100μF

7. Metodología



IMAGENES - PRE1/amplificador base.png

Figura 1: Amplificador Base

7.1. Trabajo de Preparación

7.1.1. Amplificador de Potencia

1. Identifique la etapa de Potencia (EP) en el amplificador base (anexo), si es necesario consulte a su instructor.



IMAGENES - PRE1/EP.PNG

Figura 2: Etapa de Potencia del amplificador base

2. Determinar los puntos de reposo de todos los transistores en la EP.

Para determinar los puntos de operación de los transistores en la etapa de potencia, se realizó un análisis en DC, sin considerar los condensadores C5 y C7.

Se comenzó por estudiar al transistor Q4. Este transistor para el caso de la etapa de potencia cumple la función de generar el voltaje necesario para que los transistores Q5 y Q6 conduzcan, asumiendo que la corriente que pasa por la base del transistor Q5 es muy pequeña, se puede decir por LCK:

$$I_{R17} = I_{RV1} + I_{CQ4} \quad (7)$$

Donde:

- I_{CQ4} : Corriente de colector en el transistor Q4.
- I_{RV1} : Corriente en el potenciómetro RV1.
- I_{R17} : Corriente en la resistencia R17.

Si se asume que la corriente en la base de Q4 se puede despreciar por ser muy pequeña, se tiene que la corriente que pasa por el potenciómetro es:

$$I_{RV1} = \frac{V_{BE}}{X(RV1)} \quad (8)$$

Donde:

- I_{RV1} : Corriente en el potenciómetro.
- V_{BEQ4} : Tensión base-emisor del transistor Q4.
- $RV1$: Potenciómetro.

Por LVK se tiene que:

$$V_{CEQ4} = I_{RV1}(RV1) \quad (9)$$

Sustituyendo la Ec. ?? en la Ec. ?? se tiene que:

$$V_{CE} = \frac{V_{BE}}{X(RV1)}(RV1) \quad (10)$$

Simplificando:

$$V_{CEQ4} = \frac{V_{BE}}{X} \quad (11)$$

Como X solo puede adquirir valores entre 0 y 1 para que los transistores Q5 y Q6 conduzcan es necesario que el voltaje Colector – Emisor sea 2 veces el voltaje Base – Emisor por lo que se puede decir que X debería ser 0,5.

Para calcular la corriente que pasa por el transistor Q4 se despreciaron las corrientes de base de Q5 y Q6 y usando LVK se tiene:

$$20 - (R_{17} + R_{12})I_{R17} - 2V_{BE} = 0 \quad (12)$$

Despejando la corriente que pasa por R17:

$$I_{R17} = \frac{20 - 2V_{BE}}{R_{17} + R_{12}} \quad (13)$$

Reemplazando la Ec.?? y la Ec. ?? en la Ec. ?? se despeja la corriente de colector de Q4:

$$V_{CQ4} = \frac{20 - 2V_{BE}}{R_{17} + R_{12}} - \frac{V_{BE}}{X} \quad (14)$$

Usando:

- $X = 0,5$
- $V_{BE} = 0,62V.$
- $RV1 = 10K\Omega.$
- $R_{12} = R_{17} = 22K\Omega.$

Se tiene que:

$$I_{CQ4} = 302,36\mu A$$

Para calcular el punto de operaciones de Q5 y Q6 se usó la LVK en la malla que tiene los 3 transistores sin tomar en cuenta las corrientes de base por ser muy pequeñas:

$$V_{BEQ5} + 10I_{EQ5} + 10I_{EQ6} - V_{EBQ6} + V_{CEQ4} = 0 \quad (15)$$

Donde se tomó en consideración que: $I_{EQ5} \approx I_{EQ6}; V_{CEQ4} = 2V_{BEQ4}$

Despejando I_E

$$I_E = \frac{V_{CEQ4} - V_{BEQ5} - V_{BEQ6}}{R_{13} + R_{14}} \quad (16)$$

Sabiendo que $V_{BEQ5} = 0,62V$ y $V_{BEQ6} = 0,614V$, se obtiene:

$$\therefore I_E = 0,3mA$$

Por lo tanto, la corriente de colector para los transistores Q5 y Q6 se obtendrá de la siguiente relación:

$$I_C = I_E \left(\frac{\beta}{1+\beta} \right) \quad (17)$$

Para Q5 se tiene un $\beta_{Q5} = 210$.

Para Q6 se tiene un $\beta_{Q6} = 240$.

$$I_{CQ5} = 298,57\mu A$$

$$I_{CQ6} = 298,75 \mu\text{A}$$

Se asume que $V_{CEQ5} \approx -V_{CEQ6} = V_{CE}$, aplicando LVK tenemos:

$$2V_{CE} + I_C(R_{13} + R_{14}) - 20 = 0$$

Despejando V_{CE} :

$$V_{CE} = \frac{20 - I_C(R_{13} + R_{14})}{2}$$

$$\therefore V_{CE} = 10 \text{ V}$$

Tabla 5: Puntos estáticos de operación del amplificador de potencia

Transistor	I_C	V_{CE}
Q4	302,36 μA	1,24 V
Q5	298,57 μA	9,99 V
Q6	298,75 μA	-9,99 V

3. Determine el modelo dinámico a pequeña señal y a frecuencias medias de la EP, ganancia e impedancias de entrada y salida.

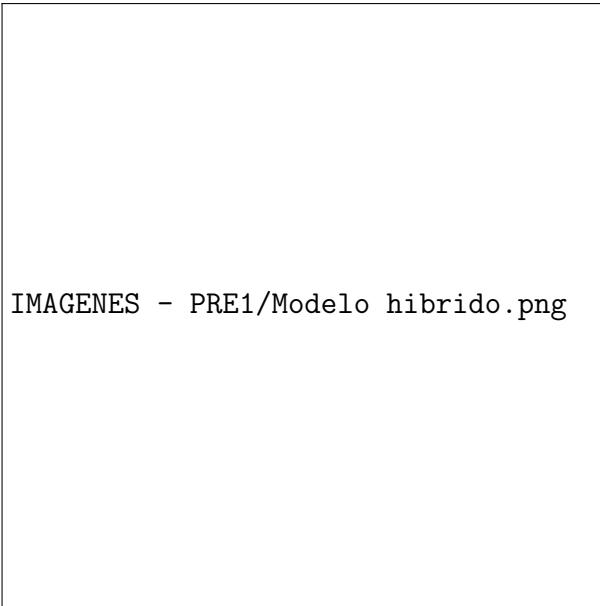


Figura 3: Modelo híbrido

Las ecuaciones a usar para obtener los parámetros serán los siguientes:

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad (18)$$

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} \quad (19)$$

Donde V_T es el voltaje térmico que a temperatura ambiente se tomó de 25,86mV aproximadamente, β será la ganancia de corriente DC del transistor y $R_o = \infty$.

$$h_{fe} = \beta \quad (20)$$

$$h_{ie} = r_\pi \quad (21)$$

Así se obtuvo que:

Tabla 6: Parámetros híbridos de los transistores en la etapa de potencia

Transistor	h_{fe}	g_m	r_π
Q4	210	11,69 mS	17,96 kΩ
Q5	210	11,54 mS	18,19 kΩ
Q6	240	11,55 mS	20,77 kΩ

Ganancia

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{(R_L + R_{13})(1 + g_{m5}r_{\pi5})}{r_{\pi5} + (R_L + R_{13})(1 + g_{m5}r_{\pi5})} \quad (22)$$

Al sustituir los valores se tiene que:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 0,96 \approx 1$$

Impedancia de entrada

$$Z_{in} = R_{17} || R_{12} || [r_\pi + (1 + g_m r_\pi)(R_L + R_{13})] \quad (23)$$

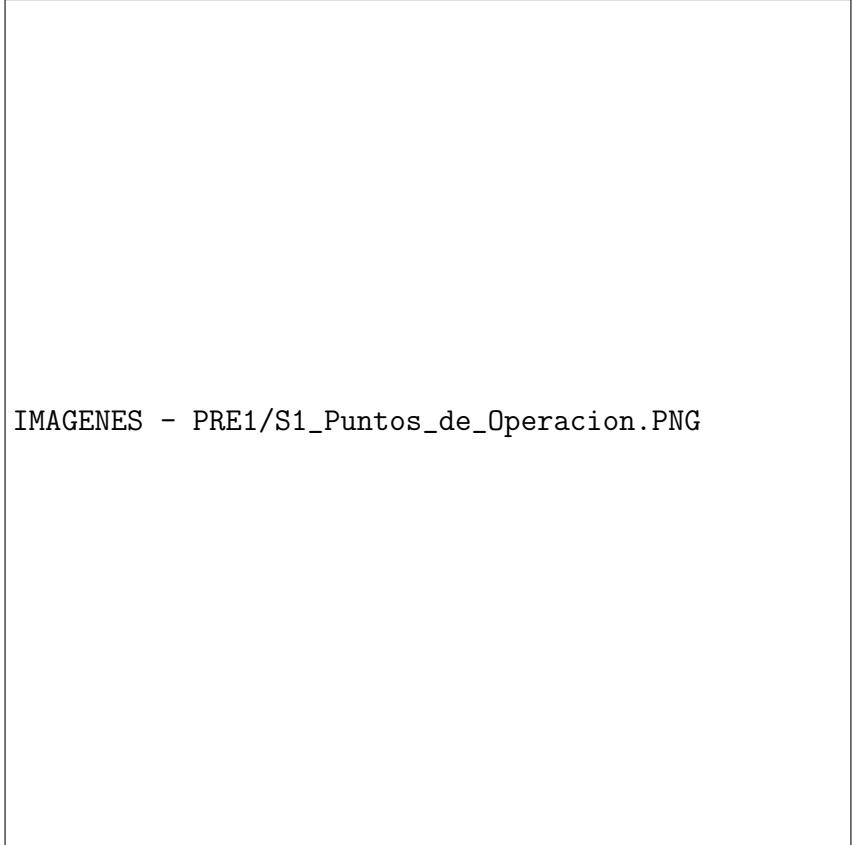
$$Z_{in} = 10,75 \text{ k}\Omega \approx 10 \text{ k}\Omega$$

Impedancia de salida

$$Z_o = R_{13} + \frac{r_\pi + R_{17} || R_{12}}{(1 + g_m r_\pi)} \quad (24)$$

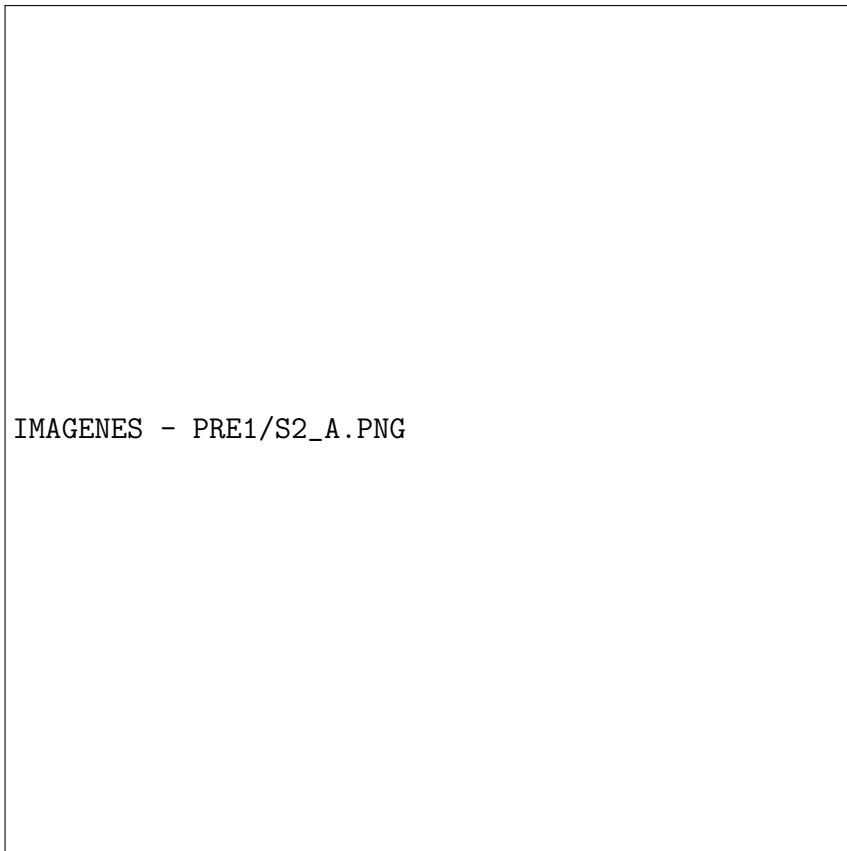
$$Z_o \approx R_{13} \approx 10 \Omega$$

4. Realice la simulación de la etapa con el fin de verificar tanto los puntos de operación, como el modelo circuital a pequeña señal. Explique cualquier diferencia respecto a sus cálculos, si la hay.



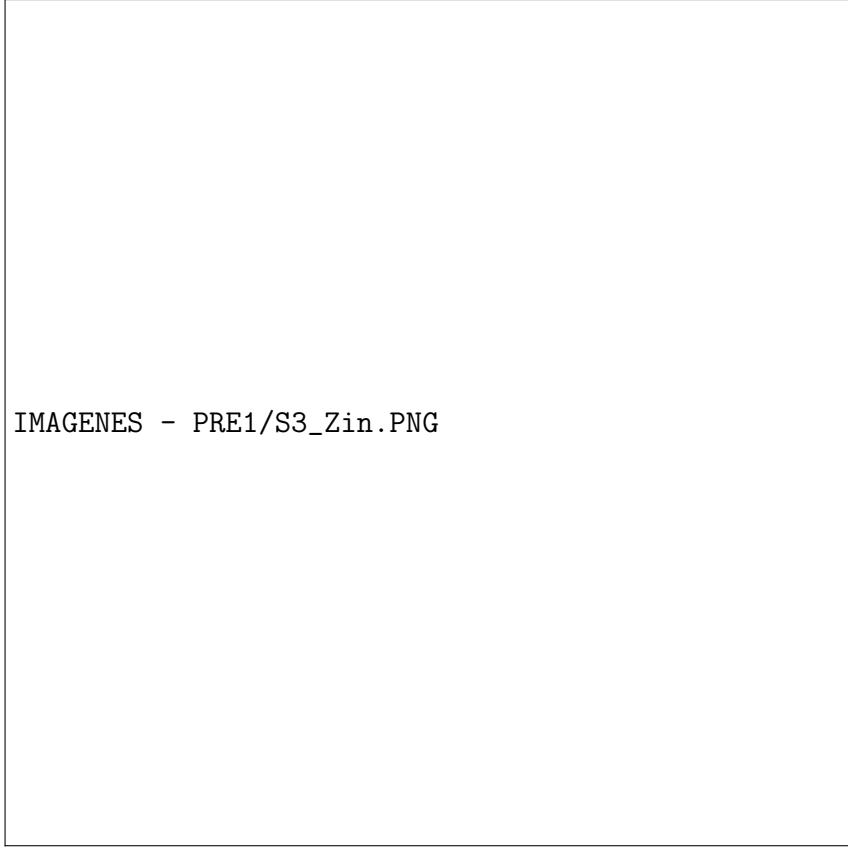
IMAGENES - PRE1/S1_Puntos_de_Operacion.PNG

Ilustración 8: Caption



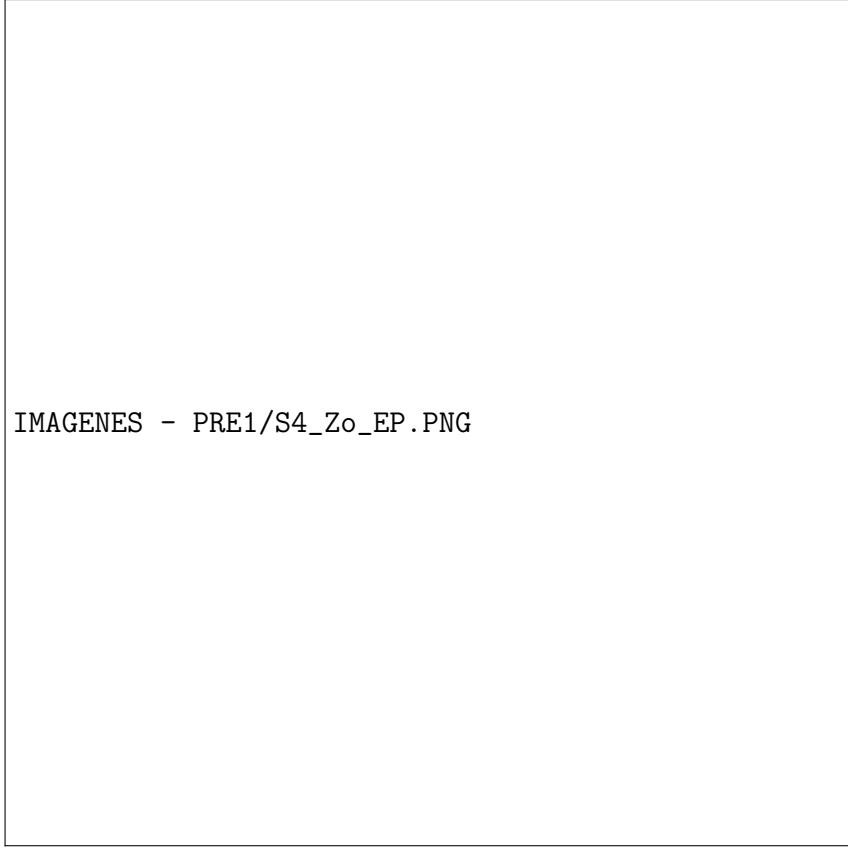
IMAGENES - PRE1/S2_A.PNG

Ilustración 9: Ganancia en la etapa de potencia



IMAGENES - PRE1/S3_Zin.PNG

Ilustración 10: Impedancia de entrada en la etapa de potencia



IMAGENES - PRE1/S4_Zo_EP.PNG

Ilustración 11: Impedancia de salida en la etapa de potencia

8. Presentación de Resultados

8.1. Parte 1. Amplificador de Potencia

Se midieron los puntos de operación de todos los elementos activos

Tabla 7: Mediciones para hallar los puntos estáticos de operación

Transistor	VC [V]	AVC [V]	VE [V]	AVB [V]	VE [V]	AVE [V]	VCE [V]	IC [A]
Q4	7.00e-01	1.00e-01	-1.00e-01	1.00e-02	-6.00e-01	4.00e-02	1.30	0.000329
Q5	10	2.00	4.00e-01	4.00e-02	-1.00e-01	2.00e-02	10	0.000500
Q6	-10	2.00	-6.00e-01	4.00e-02	-1.10e-01	1.00e-02	-9.89	0.000500

Referencias

- [1] Madrid, G. V., & Izquierdo, M. A. Z. "TRANSISTORES DE UNION BIPOLAR (BJT)", [En línea]. Disponible: <https://www.academia.edu/download/53490536/BJT.pdf>. [Accedido: 25-05-2025].
- [2] Unicrom. (2023). Amplificadores & Amplificación, [En línea]. Disponible: <https://unicrom.com/amplificadores-amplificacion/>. [Accedido: 26-05-2025].
- [3] Amplificadores de Potencia, Amplificadores.info, [En línea]. Disponible: <https://amplificadores.info/amplificadores-de-potencia>. [Accedido: 4-06-2025].
- [4] Amplificadores diferenciales, Electricity-Magnetism.org, [En línea]. Disponible: <https://www.electricity-magnetism.org/es/amplificadores-diferenciales/>. [Accedido: 15-05-2025].
- [5] "¿Qué es la respuesta en frecuencia de un amplificador?", PCHardwarePro.com, [En línea]. Disponible: <https://www.pchardwarepro.com/que-es-la-respuesta-en-frecuencia-de-un-amplificador/>. [Accedido: 1-06-2025].
- [6] F. Ubiría y P. Castro, "9. Realimentación", Universidad Tecnológica del Uruguay (UTU), 2024. [En línea]. Disponible: https://its.utu.edu.uy/wp-content/uploads/sites/33/2024/04/cap_9.pdf. [Accedido: 05-06-2025]