

Bitácora. Laboratorio De Circuitos de RF

Elaborado por:

Joan Sebastian Ligarreto Código: 261720
David Ricardo Martínez Hernández Código: 261931
Oscar Andres Urbano Vallejo Código: 261683

Circuitos de Radio Frecuencia

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Bogotá
2013

Índice

1. Laboratorio 1: Amplificador Banda ancha	3
1.1. Prelaboratorio	3
1.1.1. Simulación	4
1.2. Laboratorio	4
1.2.1. Prelaboratorio 2	4
1.2.2. Simulación	5
1.2.3. Resultados Obtenidos	6
1.3. Conclusiones	7
2. Laboratorio 2: Amplificador selectivo en frecuencia	8
2.1. Prelaboratorio	8
2.1.1. Simulación	9
2.2. Laboratorio	9
2.2.1. Resultados Obtenidos - Parte 1	9
2.2.2. Resultados Obtenidos - Parte 2	10
2.3. Conclusiones	11
3. Laboratorio 3: Acoplador de impedancias	11
3.1. Prelaboratorio	11
3.1.1. Simulación	11
3.2. Laboratorio	12
4. Laboratorio 4: Oscilador	12
4.1. Prelaboratorio	12
4.2. Resultados Obtenidos	14
4.3. Problemas encontrados en la implementación	14
5. Laboratorio 5: Modulación AM	14
6. Proyecto Final: Transmisión de audio por medio de la red eléctrica	15
6.1. Parte 1: Acoplador	15
6.2. Parte 2: Envío de audio	16

Índice de cuadros

1. Medidas obtenidas para la práctica 1	6
2. Tabla de Ganancia en función de la frecuencia para la práctica 1	6
3. Valores obtenidos en la práctica	9
4. Valores obtenidos para la Práctica 3	11

Índice de figuras

1. Circuito sugerido para la práctica 1	3
2. Circuito simulado para la práctica 1	4
3. Gráfica de Ganancia en función de la frecuencia para la práctica 1	4
4. R_E_2 en función de R_E_1	5
5. Circuito simulado para la práctica 1	5
6. Gráfica de Ganancia en función de la frecuencia para la práctica 1	6

7.	Resultado de la ganancia del circuito de la Figura 5	7
8.	Circuito sugerido para la práctica 2	8
9.	Circuito simulado para la práctica 2	9
10.	Gráfica de Ganancia en función de la frecuencia para la práctica 2.	9
11.	Salida del analizador de espectros para la práctica 2.	10
12.	Circuito simulado para la práctica 3.	11
13.	Gráfica de Ganancia en función de la frecuencia para la práctica 3.	12
14.	Oscilador de Colpits, circuito simulado para la práctica 4.	13
15.	Simulacion oscilador de Colpits para la práctica 4.	13
16.	Modulador AM simulado para la práctica 4.	14
17.	Simulación Modulador AM, mensaje $10KHz$ portadora $350KHz$	15
18.	Acoplador para la red eléctrica.	15
19.	Función de transferencia acoplador.	16

1. Laboratorio 1: Amplificador Banda ancha

1.1. Prelaboratorio

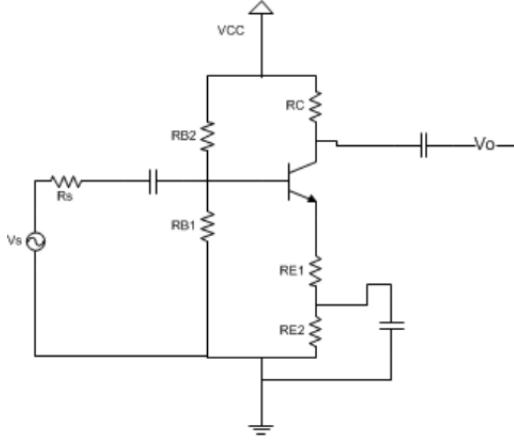


Figura 1: Circuito sugerido para la práctica 1

La polarización del amplificador con emisor degenerado se inicia bajo la consideración: ***El voltaje en la resistencia R_{B_1} debe ser $\frac{1}{10}$ del voltaje V_{CC}*** :

$$V_{R_{B_1}} = 0,1 * 12V \quad (1)$$

Por tanto el divisor de tensiones debe ser:

$$\frac{R_{B_1}}{R_{B_1} + R_{B_2}} = 0,1 \quad (2)$$

De donde $R_{B_2} = 9 * R_{B_1}$.

Se establece $R_{B_2} = 68k\Omega$ por tanto $R_{B_1} = 7,5k\Omega$ (valores normalizados).

Se fija el punto de polarización en $I_C = 2 mA$ y $V_{CE} = 6 V$, para obtener esto se despeja la resistencia de emisor en DC del lazo V_{CC} -base emisor-tierra:

$$V_{TH} - 0,7 = I_C \frac{R_{TH}}{\beta} + \alpha I_E R_E \quad (3)$$

$$V_{TH} = 1,1921V, \quad R_{TH} = 6,755k\Omega \quad (4)$$

$$\beta = 300, \quad \alpha = \frac{301}{300} \quad (5)$$

Al despejar se obtiene:

$$R_E = 0,222k\Omega \quad (6)$$

Se espera tener un $V_{CE} = 6V$ por tanto haciendo el lazo de V_{CC} -colector-emisor-tierra:

$$12 - R_C * I_C - V_{CE} - R_E * I_E = 0 \quad (7)$$

$$R_E + R_C = 3k\Omega \quad (8)$$

de donde R_C normalizado $R_C = 2,7k\Omega$.

Ahora se sabe que $R_E = R_{E_1} + R_{E_2}$ y se utiliza la consideración de la ganancia aproximada para el emisor degenerado en este caso $A_V = -\frac{R_C}{R_{E_1}}$ de donde se obtiene R_{E_1} normalizado $R_{E_1} = 120\Omega$ por tanto $R_{E_2} = 100\Omega$.

Con las resistencias normalizadas el nuevo punto de operación es:

$$I_C = 2,023mA \quad V_{CE} = 6,0914V$$

La ganancia:

$$A_V = \frac{V_0}{V_B} = -\frac{(\beta r_0 - R_E) R'_L}{r_\pi (R'_L + R_E + r_0) + R_E (R'_L (\beta + 1) r_0)} \quad (9)$$

$$A_V = -20,19.$$

1.1.1. Simulación

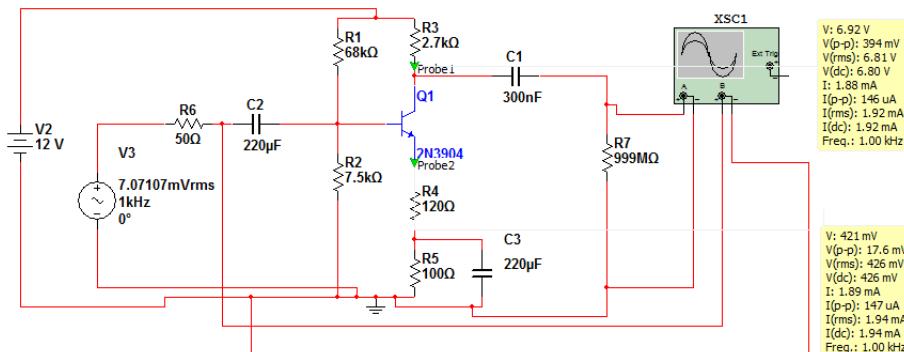


Figura 2: Circuito simulado para la práctica 1.

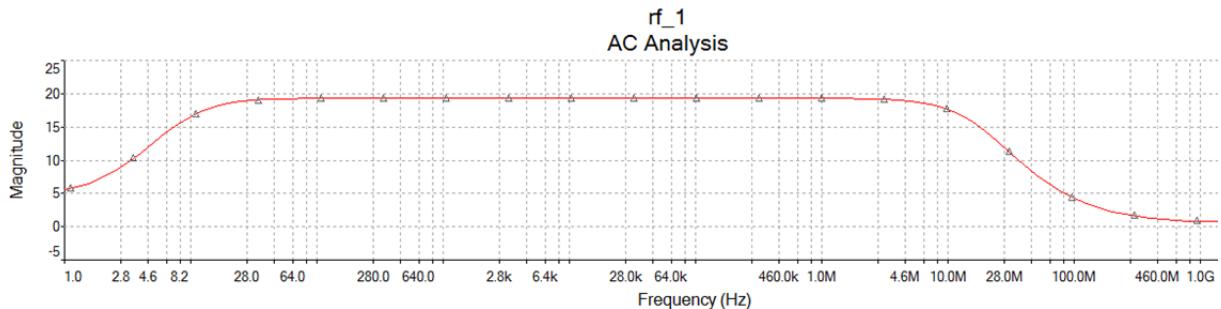


Figura 3: Gráfica de Ganancia en función de la frecuencia para la práctica 1.

1.2. Laboratorio

Como el prelaboratorio (ver 1.1) no funcionó se realizó un nuevo punto de polarización (ver 1.2.1).

1.2.1. Prelaboratorio 2

Se tomó nuevamente el circuito sugerido por el profesor Figura 1, utilizando el mismo criterio descrito en el prelaboratorio anterior (ver 1.1).

De acuerdo a las ecuaciones (1) y (2) se determinaron los valores de $R_{B_2} = 68k\Omega$ y $R_{B_1} = 7,5k\Omega$ (valores normalizados).

Se fijó el punto de polarización en $I_C = 7mA$ y $V_{CE} = 5V$.

Con la ecuación (3) se determinó el valor de $R_E = 47,62\Omega$.

Para obtener el punto de polarización de $V_{CE} = 5V$ se utilizó la ecuación (7) y se encontró el valor de $R_C = 0,9524k\Omega$ que normalizada es $R_C = 1k\Omega$.

de donde R_C normalizado $R_C = 2,7k\Omega$.

Ahora se sabe que $R_E = R_{E_1} + R_{E_2}$ y se utiliza la consideración de la ganancia aproximada para el emisor degenerado en este caso $A_V = -\frac{R_C}{R_{E_1}}$ de donde se obtiene $R_{E_1} = 43\Omega$ y $R_{E_2} = 6,2\Omega$.

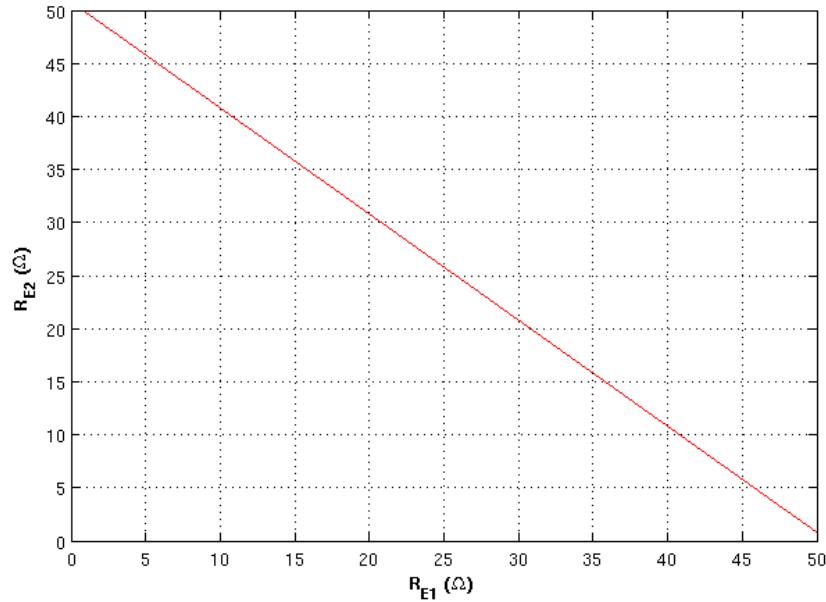


Figura 4: R_{E2} en función de R_{E1} .

Con las resistencias normalizadas el nuevo punto de operación es:

$$I_C = 6,8454mA \quad V_{CE} = 4,8167V$$

La ganancia:

$$A_V = \frac{V_0}{V_B} = -\frac{(\beta r_0 - R_E) R'_L}{r_\pi (R'_L + R_E + r_0) + R_E (R'_L (\beta + 1) r_0)} \quad (10)$$

$$A_V = -21,2147.$$

1.2.2. Simulación

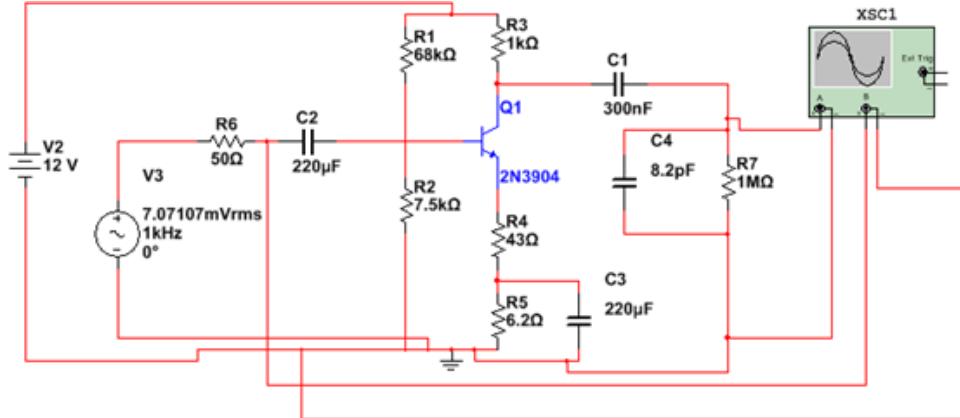


Figura 5: Circuito simulado para la práctica 1.

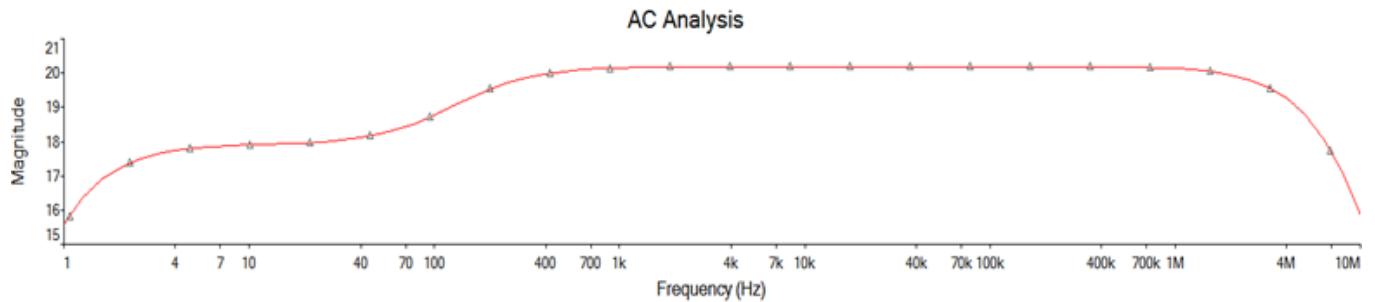


Figura 6: Gráfica de Ganancia en función de la frecuencia para la práctica 1.

1.2.3. Resultados Obtenidos

Se realizó el montaje de la Figura 5 y se obtuvieron los siguientes resultados.
Para la polarización se obtuvo:

Elemento	Medición
V_{CC}	5,58V
V_{R_C}	6,5V
V_{CE}	5,58V
R_C	0,983kΩ
R_{E_1}	0,983kΩ
R_{E_2}	0,983kΩ
R_1	0kΩ
R_2	0kΩ
I_C	6,6124mA

Cuadro 1: Medidas obtenidas para la práctica 1.

Medidas obtenidas de ganancia a una frecuencia determinada:

Frecuencia (Hz)	Ganancia
100	9,19
230	14,67
250	15
300	15,64
1k	17,9
10k	18,095
100k	18,3
200k	19,61
800k	19,25
1M	19,03
2M	19,07
3M	18,24
4M	17,5
5M	16
6M	14,6
6,8M	14,26
7M	13,3

Cuadro 2: Tabla de Ganancia en función de la frecuencia para la práctica 1.

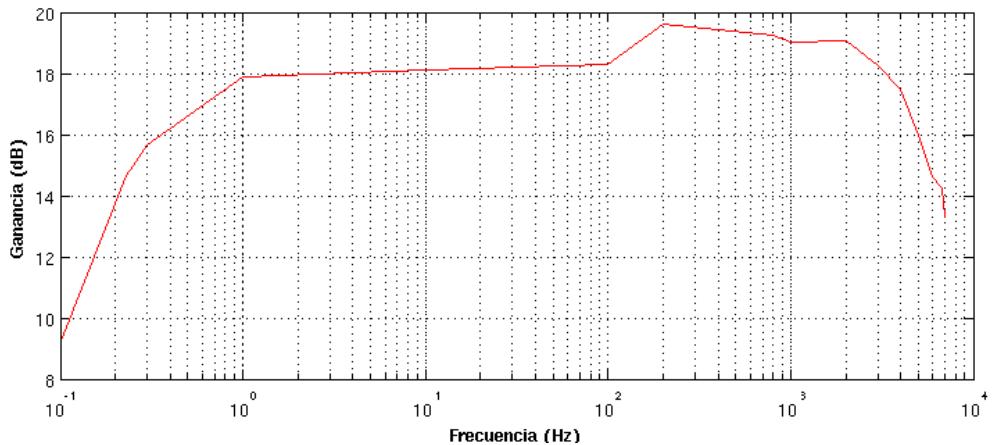


Figura 7: Resultado de la ganancia del circuito de la Figura 5.

Los valores son muy similares a los obtenidos en el script de matlab *amplificador_banda.m*.

¿Explique los efectos de las sondas sobre la respuesta en frecuencia?

Las sondas limitan la frecuencia de corte superior F_{H3} de un amplificador de banda ancha, debido al efecto capacitivo asociado al estar atenuadas, de $17pF$ aproximadamente, además se tiene un efecto resistivo que varía con la frecuencia que se maneje. ¿Explique como el factor de calidad de los elementos del circuito afecta la respuesta en frecuencia de todo el sistema?

El factor de calidad de cada uno de los componentes empleados para un montaje de radiofrecuencia determina que tan bueno será su funcionamiento en la frecuencia de trabajo y que tanto pueden llegar a disipar o almacenar energía como se espera, de manera que no se agreguen efectos no deseados, puesto que esto compromete la respuesta en frecuencia, ya que se afectan las consideraciones iniciales.

1.3. Conclusiones

- Incluyendo una resistencia de degeneración de un valor bajo para un amplificador BJT de emisor común, es posible obtener un eficiente manejo del ancho de banda y un buen control de la ganancia.
- El diseño de circuitos en radiofrecuencia requiere tener en consideración los efectos inductivos y capacitivos de cada componente, con el objetivo de trabajar sobre modelos confiables que incluyan todas las variables que se ven involucradas en los análisis de estos circuitos.
- Los circuitos en comunicaciones se manejan en alta frecuencia, así que es importante determinar el ancho de banda de un amplificador en RF, considerando siempre que la ganancia obtenida va a estar en relación inversa con el ancho de banda.

2. Laboratorio 2: Amplificador selectivo en frecuencia

2.1. Prelaboratorio

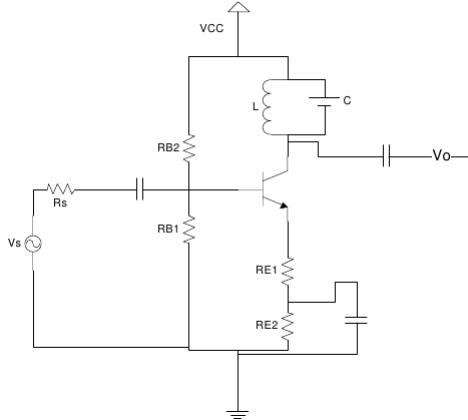


Figura 8: Circuito sugerido para la práctica 2

La polarización del amplificador con emisor degenerado se inicia bajo la consideración: **El voltaje en la resistencia R_{B_1} deber ser $\frac{1}{10}$ del voltaje V_{CC}** . De acuerdo a las ecuaciones (1) y (2) se determinaron los valores de $R_{B_2} = 68k\Omega$ y $R_{B_1} = 7,5k\Omega$ (valores normalizados).

La frecuencia de resonancia seleccionada para el grupo es de $4,4Mhz$ con esto se calculan los valores de C y L por medio de la ecuación de para la resonancia de un circuito en paralelo:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (11)$$

Utilizando la ecuación anterior se determinó un valor de L tal que tuviera un capacitor comercial, los valores seleccionados fueron $L = 22\mu H$ y $C = 59pF$.

Como la ganancia aproximada para este tipo de configuración es aproximadamente:

$$A_V \approx \frac{-R'_L}{R_E} \quad (12)$$

donde:

$$R'_L = R_C \parallel R_L.$$

Para este caso en particular $R'_L = R_C = L \parallel C$ dada esta relación y poder obtener el valor de esta resistencia se desprecia los efectos resistivos del capacitor, solo se tiene en cuenta los correspondientes a la bobina procediendo de la siguiente manera:

$$R'_L = R_{L_{Parallel}} \quad (13)$$

$$R_{L_{Parallel}} = R_{L_{Serie}} (1 + Q^2) \quad (14)$$

$$R_{L_{Serie}} = \frac{\omega_0 L}{Q} \quad (15)$$

al reemplazar la ecuación (14) en la ecuación (15), se obtiene

$$R_{L_{Parallel}} = \frac{\omega_0 L}{Q} (1 + Q^2) \quad (16)$$

De acuerdo a la ecuación anterior y con el valor de $Q = 50$ $R_{L_{Parallel}} = 4,8613k\Omega$. Por consiguiente y de acuerdo a la ecuación (12) el valor de $R_E = 270R_C \Rightarrow R_{E_1} = 18,0047\Omega$ que normalizado es $R_{E_1} = 18\Omega$.

Para la polarización se utilizó $I_C = 12mA$, $R_1 = 68k\Omega$, $R_2 = 7,5k\Omega$, $R_{E_2} = 3,6\Omega$.

2.1.1. Simulación

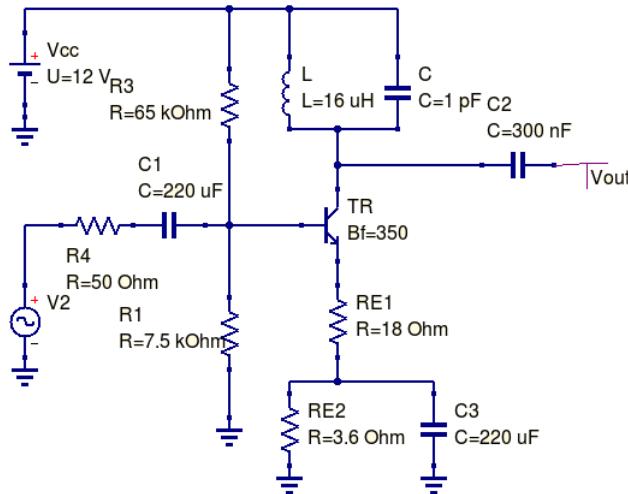


Figura 9: Circuito simulado para la práctica 2.

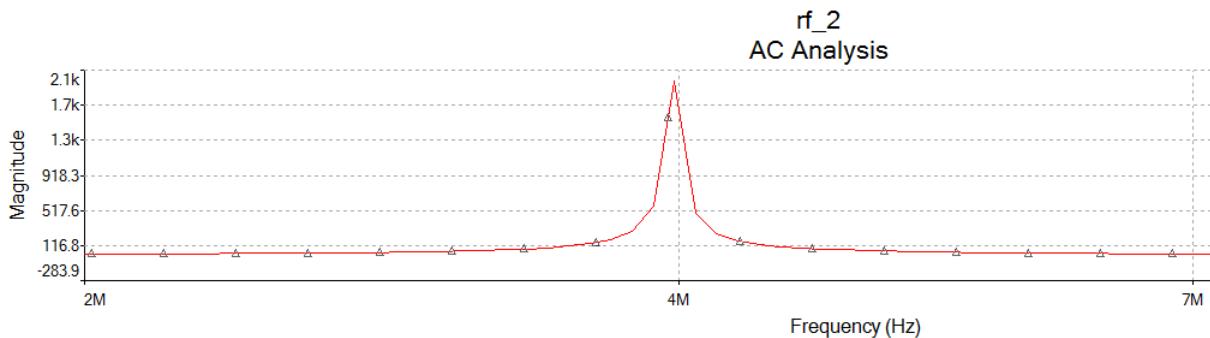


Figura 10: Gráfica de Ganancia en función de la frecuencia para la práctica 2.

2.2. Laboratorio

2.2.1. Resultados Obtenidos - Parte 1

De acuerdo al montaje de la Fig 10 se obtuvieron prácticamente los siguientes valores:

Elemento	Valor
V_{CC}	11,98V
F_R	4,47MHz
A_V	436,046
V_O	15,6V
R_1	68,8KΩ
R_2	7,49KΩ
R_{E_1}	18,4Ω
R_{E_2}	2,4Ω
I_{C_Q}	11,59mA
V_{CEQ}	11,96V

Cuadro 3: Valores obtenidos en la práctica.

Cuando se polarizaba el transistor con una señal AC de $V_{gen} = 100mV$ tenía una caída a $34,4mV$.

Los valores son muy similares a los obtenidos en la simulación y el script de matlab *resonance.m*.

¿Qué propiedades observan del circuito?

Se observa una ganancia grande, con un ancho de banda estrecho, debido a que la idea era poner en oscilación el tanque a la frecuencia solicitada, logrando una selección de la frecuencia en la cual operaba el montaje.

¿Qué puede decir acerca de las propiedades observadas?

Acerca de las propiedades observadas puede decirse que el amplificador selectivo en frecuencia genera cierta sensibilidad, debido a que es fácil salirse del ancho de banda especificado, además, se aprecia una alta ganancia en este punto dada por el efecto del tanque. ¿Qué tan bueno fue su cálculo del ancho de banda, explique la razón de su acierto o fallo?

El ancho de banda calculado fue de aproximadamente $400KHz$, semejante al valor esperado, que se calculó en $552,9KHz$ para el tanque considerado.

¿Qué sucede al conectar la resistencia de carga, explique a través de la teoría?

Al conectar la resistencia de carga se aumenta el factor de calidad del tanque pero se disminuye el ancho de banda.

2.2.2. Resultados Obtenidos - Parte 2

Para la segunda parte del laboratorio se utilizó el mismo circuito de la Figura 10 pero esta vez se pidió que tuviera una resonancia superior a $12MHz$, cuando se desarrolló se hizo resonar a $14,2MHz$, solo se cambió la inductancia de $22\mu H$ a $0,8\mu H$.

La Figura 11 muestra la respuesta del circuito utilizando el analizador de espectros.

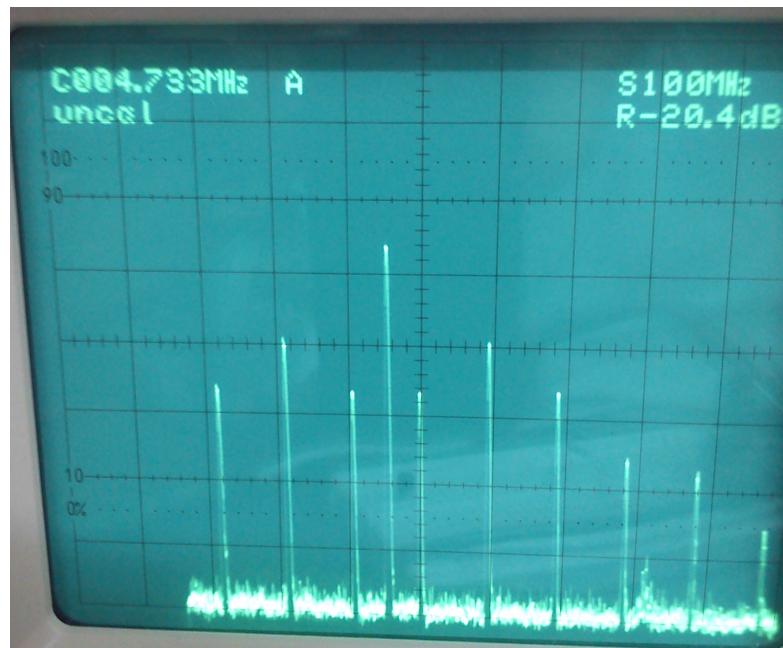


Figura 11: Salida del analizador de espectros para la práctica 2.

¿Cómo deberá ser la salida del amplificador al alimentarlo con la onda cuadrada?

Al alimentarlo con una onda cuadrada la salida del amplificador va a resultar de tipo senoidal para la frecuencia de resonancia. ¿Es posible realizarlo con el quinto armónico?

Pues para ese montaje que se realizó como se puede observar en la Figura 11, el quinto armónico está muy atenuado y la salida que se obtuvo no era muy buena porque el tercer armónico es mucho mayor, para poderlo hacer es necesario diseñar un filtro pasabanda para el quinto armónico.

2.3. Conclusiones

- Se observa que el amplificador selectivo en frecuencia permite centrar una frecuencia en resonancia con alto factor de calidad y bajo ancho de banda, lo cual resulta útil en muchas aplicaciones de comunicaciones.
- Se encontró que los valores finales son muy similares a los obtenidos en la simulación y el script de matlab realizado, llamado *resonance.m*.
- Es posible realizar una atenuación de todos los armónicos salvo el primero y el tercero, en base a una configuración del tanque que aumenta la frecuencia de resonancia.
- Es posible generar una onda senoidal a partir de una onda cuadrada realizar el circuito multiplicador.

3. Laboratorio 3: Acoplador de impedancias

3.1. Prelaboratorio

Se siguió la recomendación del profesor descrita en la guía de laboratorio, los resultados obtenidos de los valores de condensadores y de la bobina fueron determinados por el scrip de matlab *Practica_3.m* se obtuvo lo siguiente:

Elemento	Valor	Valor Normalizado
C_1	$20,64nF$	$22nF$
C_2	$71,18nF$	$68nF$
$L_{acoplador}$	$82,28nH$	$80nH$
$L_{transistor}$	$22\mu H$	$22\mu H$

Cuadro 4: Valores obtenidos para la Práctica 3.

3.1.1. Simulación

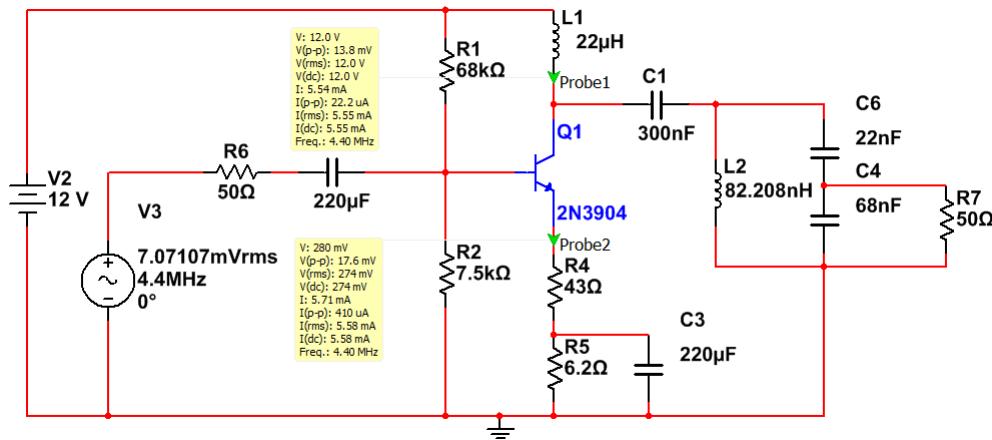


Figura 12: Circuito simulado para la práctica 3.

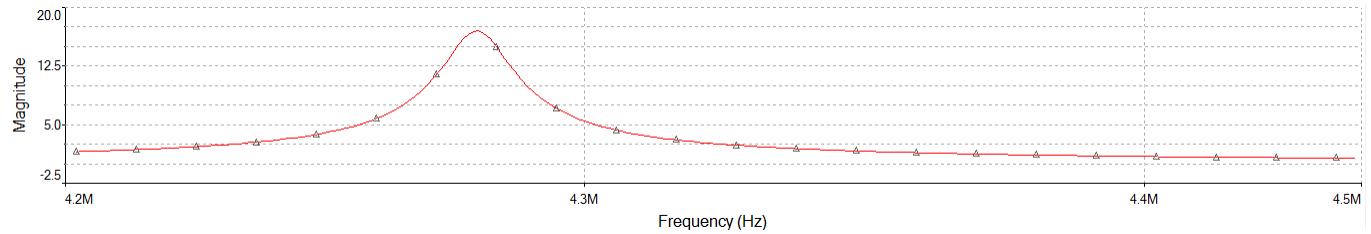


Figura 13: Gráfica de Ganancia en función de la frecuencia para la práctica 3.

Como se puede observar en la Figura 13 el punto de resonancia se corre aproximadamente a $4,3MHz$ cuando se normalizan los valores, esto se podrá comprobar al implementar el circuito en el laboratorio.

3.2. Laboratorio

Este laboratorio no fue posible implementarlo debido a los valores poco prácticos de inductancia para la red de acople ($80nH$), dicha inductancia no se pudo conseguir en el mercado, sin embargo se optó por fabricar una que se le acercara a su valor; por formula de Harold Wheeler:

$$L_{(\mu H)} = \frac{0,39r^2n^2}{9r + 10li} \quad (17)$$

La inductancia determinada por medio de dicha fórmula contó con las siguientes dimensiones: diámetro de $d = 0,8cm$ y una longitud de $l = 2,2cm$ con $n = 4$ espiras, fue diseñada con núcleo de aire y cable de protoboard AWG. El diseño de las bobinas no fue del todo satisfactorio, sin embargo después de algunos ajustes se consiguió que la red de acople resonara a una frecuencia de $4,5MHz$, mas sin embargo el amplificador funcionó solo a partir de $13,5MHz$ por dicha razón y por falta de tiempo **NO** fue imposible acoplar los dos circuitos.

4. Laboratorio 4: Oscilador

4.1. Prelaboratorio

Para el diseño del oscilador se decidió hacer uso de valores mas comerciales para la inductancia. La mínima bobina que se pudo hallar en el mercado de un valor confiable fue de $12\mu H$, valor con el cual se rediseño la red de acople que en este caso será utilizada como red de realimentación.

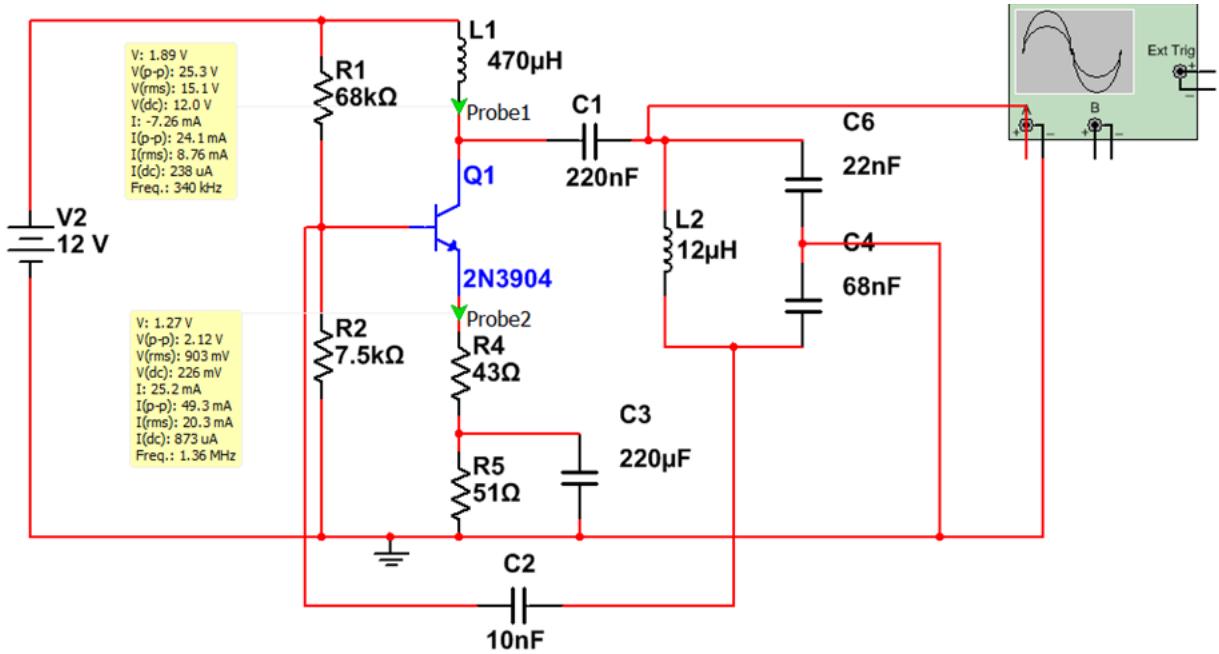


Figura 14: Oscilador de Colpits, circuito simulado para la práctica 4.

El diseño de la red de acople fue el mismo que el que se siguió en la guía 3 de laboratorio, sin embargo en este caso se fijo la inductancia en $12\mu H$ valor para el cual la frecuencia de resonancia:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{(22\mu F \parallel 68nF) 12\mu H}} \quad (18)$$

$$= 356,35 KHz \quad (19)$$

Haciendo uso del circuito acoplador para realimentar por la base el amplificador de emisor degenerado, se creó el oscilador de Colpits; su simulación arrojo los siguientes datos:

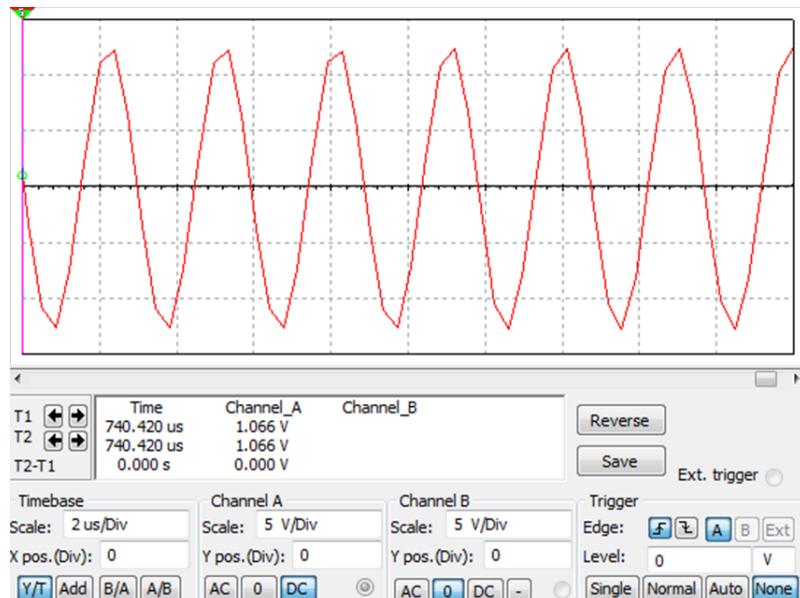


Figura 15: Simulación oscilador de Colpits para la práctica 4.

La onda resultante es aproximadamente senoidal cuenta con un $V_p = 12V$ y una frecuencia $f_r = 333,33 KHz$.

4.2. Resultados Obtenidos

El oscilador de colpits se implementó exitosamente, se consiguió generar una señal senoidal de 350 KHz de frecuencia y $10,2\text{ V}_{pp}$.

4.3. Problemas encontrados en la implementación

Inicialmente se diseño el amplificador para que tuviera una alta ganancia (cercana a 20), sin embargo a la hora de implementar el circuito se observó que el oscilador era altamente inestable pues la oscilación aumentaba hasta saturar el transistor. Teniendo en cuenta el criterio de **Barkhausen** se bajó la ganancia hasta un valor aproximado a 10 (variando la resistencia de emisor degenerada de $6,2\Omega$ a 51Ω), en dicho valor el producto AB es más cercano a 1; lo cual vuelve el oscilador altamente estable.

5. Laboratorio 5: Modulación AM

En esta práctica se hizo uso de el oscilador diseñado en la guía 4 y se lo utilizó para modular una señal de audio; frecuencia máxima del mensaje 20 KHz ; Al oscilador de colpits diseñado en la práctica pasada se le superpone una señal (mensaje) por la base y se obtiene la onda modulada por el colector.

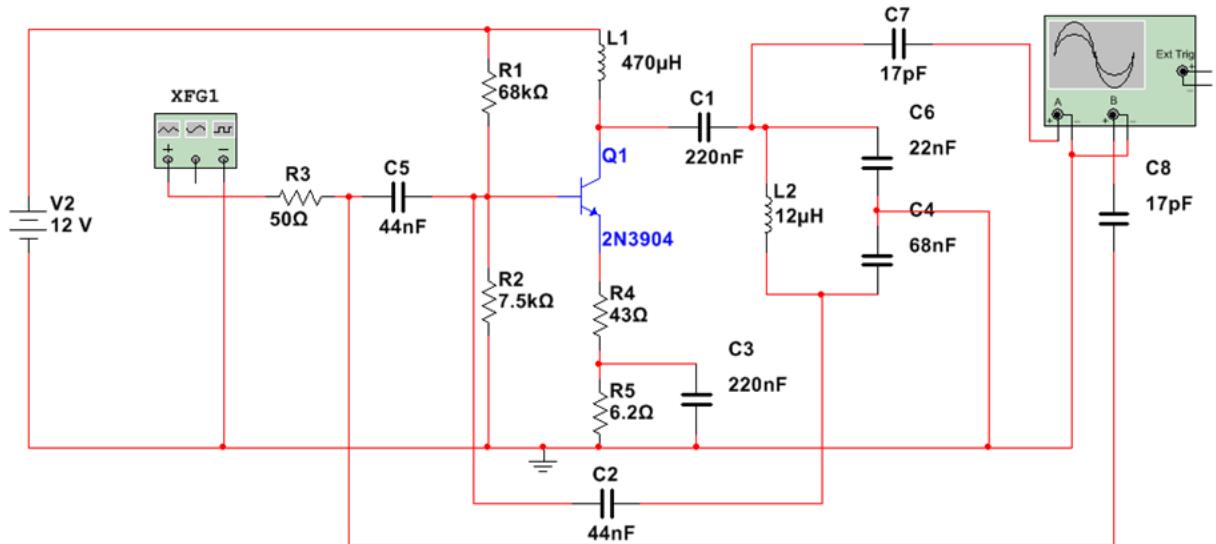


Figura 16: Modulador AM simulado para la práctica 4.

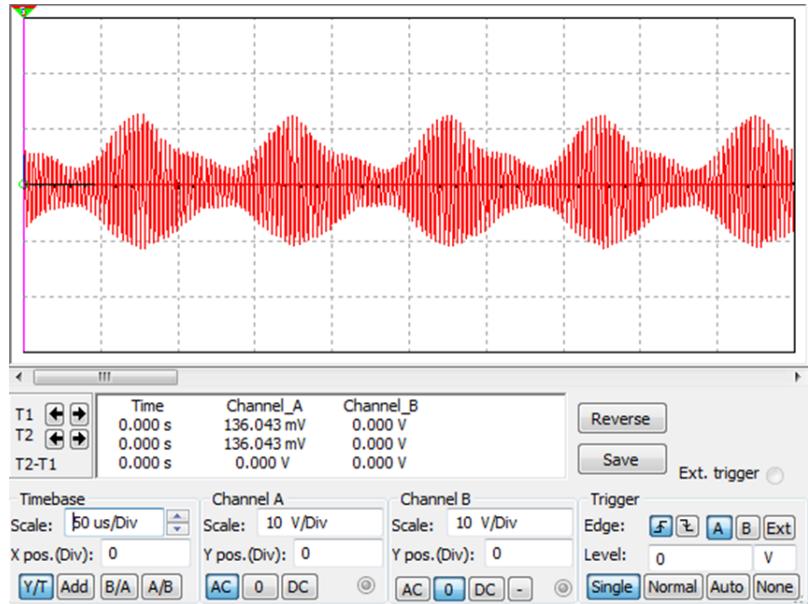


Figura 17: Simulación Modulador AM, mensaje 10KHz portadora 350KHz.

Del circuito implementado en el laboratorio se puede decir que para que la modulación sea optima la señal que entra por la base no debe ser mayor a $1V_p$ pues de ser así se satura el transistor y el circuito deja de modular. La onda portadora tiene una frecuencia de $350KHz$ lo cual asegura una buena transmisión para un mensaje comprendido entre entre $16Hz$ y $20KHz$ (señal de audio).

6. Proyecto Final: Transmisión de audio por medio de la red eléctrica

6.1. Parte 1: Acoplador

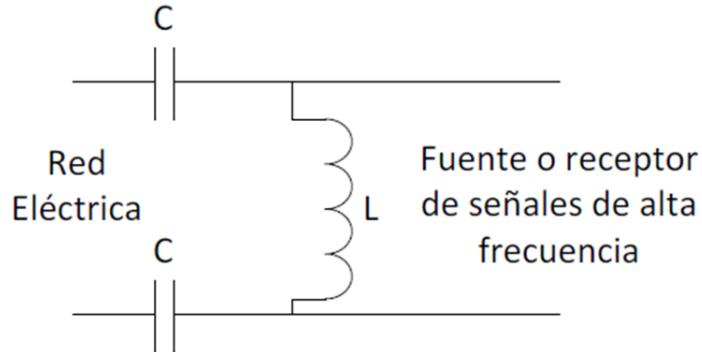


Figura 18: Acoplador para la red eléctrica.

Para el diseño del acoplador a la red eléctrica se calculó la función de transferencia :

$$\frac{v_O}{v_i} = \frac{s^2 CL}{s^2 CL + 2} \quad (20)$$

$$= \frac{\frac{s^2 CL}{2}}{s^2 CL + 1} \quad (21)$$

Se observa que la frecuencia de resonancia es:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{C}{2}}} \quad (22)$$

Para $L = 33\mu H$ y $C = 5,6nF$ se obtiene una $f_r = 523,5KHz$.

Como se observa de la figura 19 la red de acople actúa como un filtro pasa altos; a la frecuencia de resonancia la atenuación es mínima, por tal motivo se busca que la frecuencia de la portadora del modulador y la frecuencia de resonancia de la red de acople fueran similares.

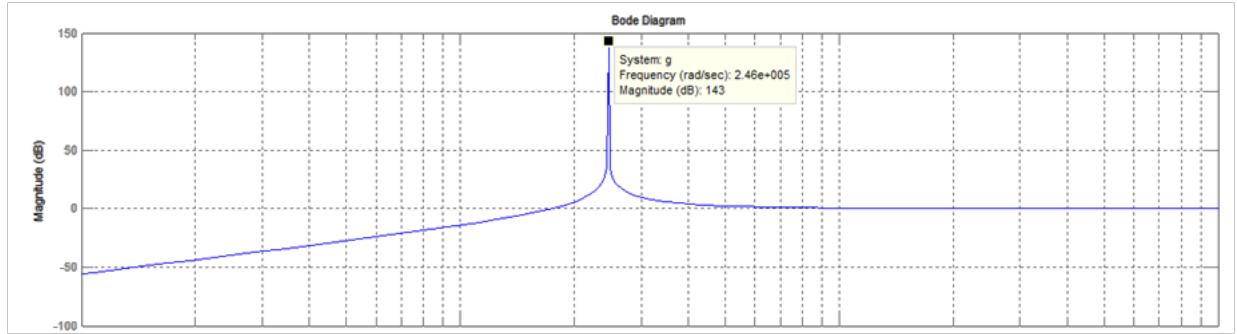


Figura 19: Función de transferencia acoplador.

6.2. Parte 2: Envío de audio

Finalmente después de implementar los circuitos de modulador y el acoplador se observó que el modulador en la práctica modula en una frecuencia base de $370KHz$; para esta frecuencia la red de acople tiene una atenuación bastante buena 0,8. Así pues se espera que al propagar la onda modulada a esta frecuencia se aproveche al máximo la función de transferencia del acoplador consiguiendo a la salida de la red eléctrica una buena señal para ser demodulada y amplificada.

Referencias

- [1] Jaeger, Richard C. & Blalock, Travis N. «*Microelectronic Circuit Desing*». McGraw-Hill, Fourth Edition, 1999.
- [2] Sedra, Adel S. & Smith, Kenneth C. «*Circuitos Microelectrónicos*». Oxford University Press, Cuarta Edición, 1999.