

Práctica 7: Adaptación de Impedancias

IMPORTANTE: La lectura y comprensión de este enunciado se considera como “trabajo previo” por parte del alumno. Dicho conocimiento será evaluado durante la sesión de práctica.

1 Introducción

La adaptación de impedancias es uno de los aspectos más importantes de la Electrónica, al permitir la optimización de la transferencia de carga para que la potencia entregada a la impedancia de carga a la salida de un circuito sea máxima. Una correcta adaptación redundará positivamente en la calidad final del diseño final realizado.

Existen varios métodos de adaptación de impedancias, planteándose en esta práctica el uso de alguno de ellos. Los circuitos electrónicos diseñados para realizar la adaptación, están en su mayoría, acotados en frecuencia, de forma que se diseñan en base a una frecuencia de interés, siendo la extensión a la banda ancha de frecuencias el principal inconveniente. Sin embargo, para una banda estrecha en torno a la frecuencia de interés, estos circuitos suelen ser válidos

Los circuitos que acoplan las diferentes etapas, por ejemplo de un transmisor, se denominan redes de acoplamiento de impedancia. Suelen estar formadas por circuitos LC, transformadores o combinaciones de ambos.

Además de la función principal en la transferencia máxima de la potencia, permiten aportar a los circuitos selectividad en las frecuencias de trabajo y filtrado de ruidos y efectos no deseados.

El objetivo de esta práctica se centra en:

1. Realizar la adaptación de impedancias con varias etapas simples para conseguir mejorar las características de máxima potencia a la salida de un generador de señal.
2. Analizar en profundidad la sensibilidad del circuito ante las variaciones de frecuencia del mismo.

2 Inductor toroidal

Una bobina toroidal consiste en un hilo conductor por el que circula una corriente a través de espiras envueltas sobre un soporte toroidal.

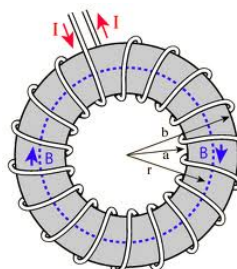


Fig. 1: Inductor toroidal

Una propiedad particular del toroide es que se le considera "auto-blindado". Esto es porque, como puede observarse en la figura 2, las líneas de inducción magnética tienden a estar circunscritas en su

interior y no se dispersan como sucede en un solenoide común, consiguiéndose mayores factores de calidad (Q).

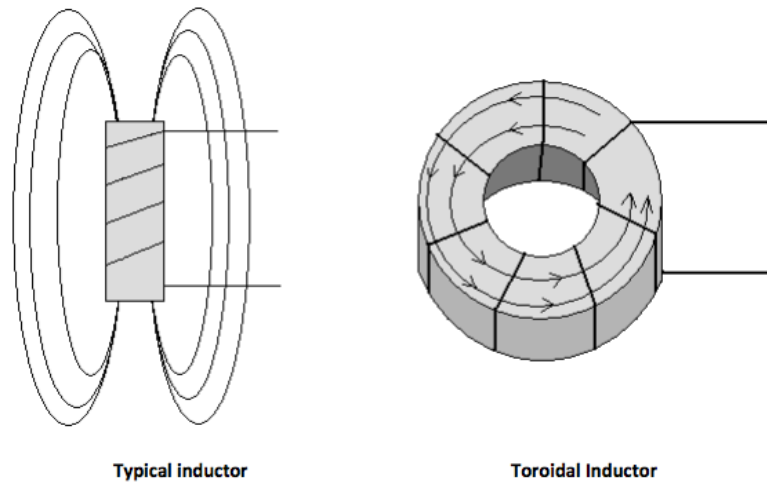


Fig. 2: Líneas de inducción magnética en un inductor típico frente a un inductor toroidal

Como cualquier solenoide, los inductores toroidales pueden construirse con núcleo de aire. Y como cualquier solenoide, si se emplean núcleos ferromagnéticos (núcleos con permeabilidad magnética elevada) se requiere un menor el número de vueltas para conseguir una inductancia determinada.

Como materiales para la construcción de toroides suelen emplearse ferrita o polvo de hierro. De forma general los núcleos de ferrita suelen emplearse en aplicaciones de baja frecuencia (VLF-VHF) debido a su mayor permeabilidad magnética: a esas frecuencias las inductancias que se requieren son elevadas y al tener mayor permeabilidad magnética necesitan un número de vueltas menor. Las de polvo de hierro suelen emplearse a altas frecuencias: el núcleo tiene menores pérdidas dando lugar a un mayor factor de calidad. Por último, señalar que los núcleos de ferrita presentan un problema importante: cuando es sometida a campos magnéticos elevados la ferrita tiende a magnetizarse, cambiando su permeabilidad magnética de forma permanente. Esto no le ocurre a los materiales de polvo de hierro por lo que en aplicaciones de alta potencia suelen emplearse estos últimos.

En general, los fabricantes del material magnético toroidal proveen un dato que simplifica los cálculos del cálculo de la inductancia. Es el número " A_L " llamado factor o índice de inductancia. No tiene nada de especial y surge de la ecuación general de la inductancia para un toroide, acomodada para que los cálculos sean más sencillos de realizar manualmente. El número A_L representa la inductancia por vuelta y dependiendo del fabricante puede venir expresado en mH por cada 1000, mH cada 100 espiras o nH por espira. De esta manera es muy fácil averiguar la inductancia o calcular el número de espiras. Por ejemplo, en el caso de un inductor toroidal formado por N espiras y factor de inductancia expresado en nH por vuelta, su inductancia puede calcularse de la siguiente manera:

$$L = A_L \cdot N^2$$

3 Circuitos adaptadores de impedancia

3.1 Máxima transferencia de potencia

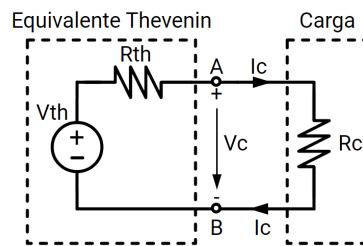


Fig. 3: Equivalente Thévenin de circuito de interés

Cuando una fuente o un circuito se conectan a una carga cualquiera es deseable que tal fuente o circuito pueda transmitir la mayor cantidad de potencia a la carga que la recibe. En la figura anterior, se muestra un equivalente de Thévenin de un circuito cualquiera (a la izquierda de AB) conectado a una carga R_c . Al conectar esta carga aparece un voltaje V_c y una corriente I_c entre los nodos A y B. La potencia entregada a la carga P_c puede calcularse como:

$$V_c = V_{th} \frac{R_c}{R_{th} + R_c}$$

$$P_c(R_c) = \frac{V_c^2}{R_c} = V_{th}^2 \frac{R_c}{(R_{th} + R_c)^2}$$

En la figura siguiente puede verse la variación de la potencia P_c en función de la carga R_c :



Fig. 4: Variación de Potencia entregada P_c frente a R_c

Como puede verse la potencia entregada a la carga es máxima cuando $R_{th} = R_c$

De forma general, empleando impedancias complejas, se puede demostrar que la máxima transferencia de potencia se produce cuando $Z_{th} = (Z_c)^*$

Por lo tanto, a la hora de conectar la salida de un circuito a otro, debe cumplirse la ecuación anterior si se quiere maximizar la transferencia de potencia. Como las impedancias de entrada o salida de los circuitos no suelen coincidir, se emplean etapas adaptadoras de impedancias.

3.2 Adaptación de impedancia mediante circuito LC

Si la aplicación en la que estamos trabajando es de banda estrecha, es decir, si tiene un ancho de banda relativamente pequeño frente a la frecuencia central, se prefieren este tipo de circuitos por su simplicidad.

En la figura siguiente se muestran algunos de estos circuitos:

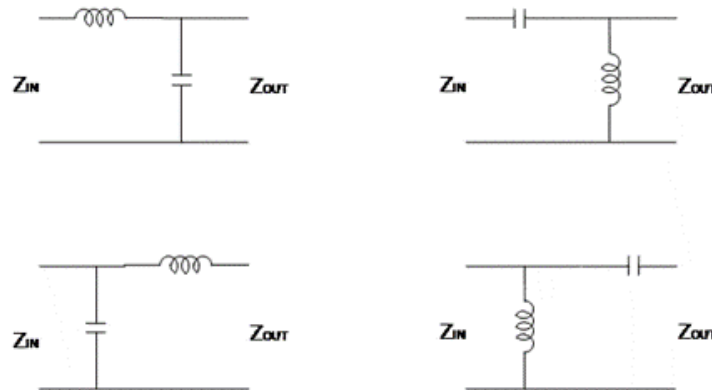


Fig. 5: Redes de acoplamiento de impedancias tipo LC

Los dos circuitos de la fila superior pueden emplearse cuando la carga es mayor que la impedancia de la fuente. Es decir, reducen la impedancia de carga. Los de la fila inferior se emplean cuando la impedancia de carga es inferior a la de la fuente.

En el caso de esta práctica emplearemos la etapa de abajo a la izquierda para transformar una impedancia de 10 Ohmios a los 50 Ohmios que necesita el generador de señal. En el caso de impedancias reales, si se calcula matemáticamente la impedancia de entrada del circuito a la frecuencia de resonancia ($\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$), suponiendo un factor de calidad elevado se puede obtener la siguiente ecuación: $R_{in} \cdot R_{out} = L/C$. Por lo tanto, con estas dos ecuaciones pueden diseñarse los valores de L y C.

3.3 Adaptación de impedancia mediante transformador

También pueden adaptarse impedancias mediante un transformador. En este caso el ancho de banda es mucho mayor que en el circuito LC, a costa de ocupar mayor espacio (y normalmente a un mayor coste).

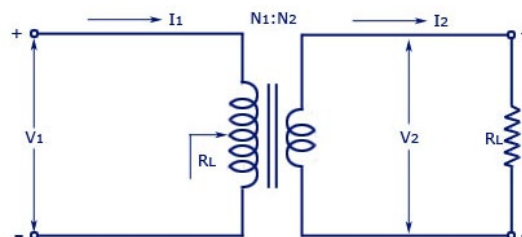


Fig. 6: Transformador

En el circuito de la figura anterior, N_1 es el número de espiras del primario y N_2 el número de espiras del secundario, la relación de transformación es $n = N_1/N_2$.

Empleando las ecuaciones del transformador se deduce fácilmente que la impedancia vista en el primario es $n^2 R_L$. Es decir, si se quiere transformar la R_L en R_S , se necesita de un transformador con $n = \sqrt{R_S/R_L}$.

Una forma de realizar un transformador con un toroide se muestra a continuación:

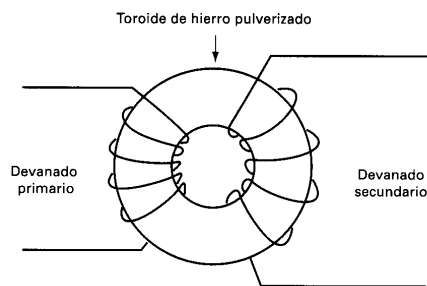


Fig. 7: Transformador Toroidal

3.4 Choke en modo común y modo diferencial

Una de las fuentes más importantes de interferencia electromagnética (EMI) se produce debido a las corrientes en modo común de un circuito/instalación. Estas corrientes circulan a través del plano de masa gracias a las capacidades parásitas. Estas corrientes no sólo introducen ruido en el propio circuito, sino que si son de una frecuencia suficientemente elevada pueden radiarse al exterior.

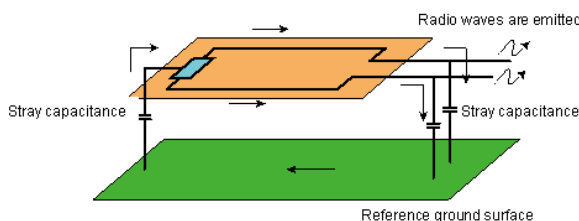


Fig. 8: Emisión de Interferencias debido a corrientes en modo común

Para filtrar las corrientes en modo común puede emplearse lo que se denomina un choke en modo común. El choke en modo común no es más que un transformador con relación de transformación 1:1.

En la figura siguiente puede verse como se conecta el transformador a una línea donde se quiere eliminar el modo común.,

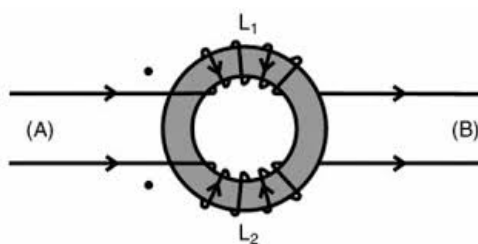


Fig. 9: Conexión del transformador para supresión de corrientes en modo común

En este circuito las corrientes diferenciales no se ven afectadas: cada corriente crea un campo magnético en el núcleo con sentido opuesto, anulándose mutuamente.

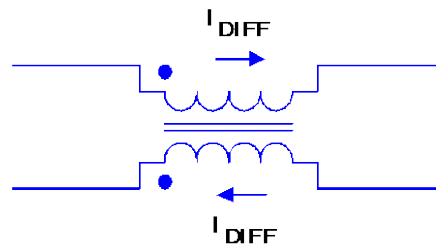


Fig. 10: Corrientes en modo Diferencial

Sin embargo, para las corrientes en modo común, cada una de las corrientes crea un campo magnético con la misma fase, sumándose y haciendo que el transformador se comporte como un inductor. Si la inductancia del toroide es lo suficientemente elevada, el choke atenuará la corriente en modo común.

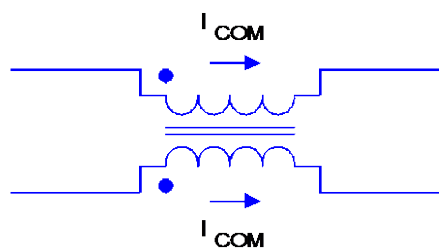


Fig. 11: Corrientes en modo común

Tan sólo cambiando las conexiones del transformador puede conseguirse el efecto contrario: un choke en modo diferencial. Pudiéndose combinar (ver figura siguiente) para filtrar tanto el modo diferencial como el modo común, algo que puede emplearse para filtrar y limpiar las alimentaciones de los circuitos.

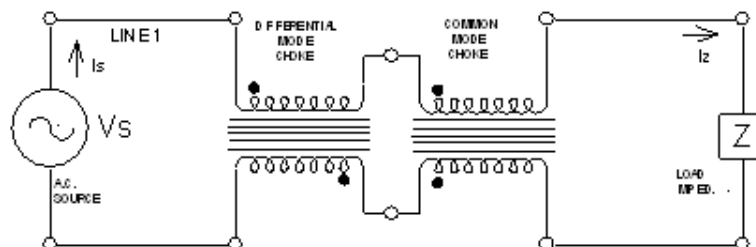


Fig. 12: Conexión del transformador para supresión de corrientes en modo común y diferencial



4 Conclusiones

Mediante el diseño adecuado de las redes de acoplamiento y la utilización de circuitos con inductores, la impedancia de carga puede acoplarse a la impedancia de la fuente. El inconveniente es que el diseño está caracterizado por la frecuencia característica del circuito, y para operar en un amplio intervalo de frecuencias, en banda ancha, se hace necesario otro tipo de elementos, como el transformador tipo balun.

Esta característica de banda ancha de los transformadores permite a los diseñadores crear amplificadores de potencia de RF. Estos dispositivos proporcionan una magnitud específica de amplificación de potencia en un ancho de banda extenso y se prefieren en particular en equipos de comunicaciones que deben operar en más de un intervalo de frecuencias, utilizando un único transmisor.

Como conclusiones en esta práctica se pretende que los alumnos conozcan:

1. CONCEPTO DE IMPEDANCIA DE SALIDA: Qué significa realmente que una fuente tenga una impedancia de salida y cuáles son los efectos que produce dicha impedancia.
2. CONCEPTO DE ADAPTACIÓN DE IMPEDANCIAS: Cuál es el objetivo real de adaptar impedancias y conocer varios posibles métodos simples de adaptar impedancias.



Cuestionario Práctica 7

Nombre:

-

Componente	Valor
Toroide	212-0910
Hilo de cobre resina (diámetro)	0.8 mm
RL (Ω)	10 y 47
C (nF)	68
Vin (V)	5

5 Trabajo Previo

5.1 Máxima Transferencia de Potencia

En este apartado vamos a comprobar los efectos que produce una impedancia de salida sobre el valor de tensión esperado. Para ello:

- 1) Realice la netlist del circuito de la Figura 3. Incluye una resistencia R_{th} de 50 Ω .
- 2) Mediante análisis OP simule el circuito para varios valores de resistencia R_c entre 10 Ω y 100 Ω .
- 3) Represente la potencia en R_c frente a las variaciones del valor de resistencia de esta (incluir figura en la memoria).

5.2 Adaptación de impedancia mediante circuito LC

Usando el circuito LC indicado anteriormente, realice los cálculos para la etapa de adaptación LC. Para ello podéis usar la calculadora proporcionada en el enlace: http://leleivre.com/rf_lcmatch.html

- 1) Calcule en primer lugar el valor de L y C para adaptar la impedancia RL

C =	L =
-----	-----

Para el valor de capacidad y la bobina, localiza el valor estándar más cercano.

Identificador	Especificaciones	Código Fabricante	Precio (€)	Comentario
Condensador				
Bobina				

- 2) Localice en el catálogo del fabricante, las características del toroide e indícalas en la tabla siguiente:

Identificador	Especificaciones	Código Fabricante	Precio (€)	Comentario
Toroide				

- 3) Realice el Netlist del circuito, conectando el circuito LC entre el entre el equivalente Thevenin y la carga Rc (figura 3).
- 4) Mida la tensión que cae en Rc.
- 5) ¿Está consiguiendo transferir la potencia disponible a la carga? Razone su respuesta.
- 6) Realice un análisis AC del circuito para frecuencias entre 100 Hz y 100 MHz, con paso de 100 en 100.
- 7) Busque la frecuencia en la que la amplitud de la señal de tensión en RC sea máxima. ¿cuál será la impedancia equivalente vista por la fuente?



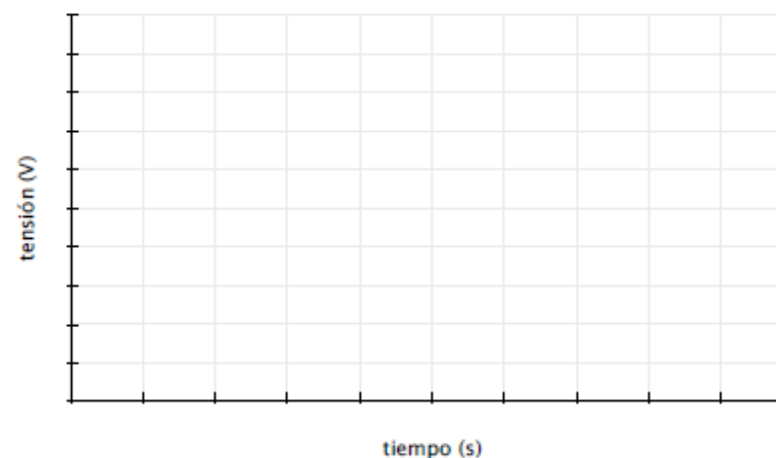
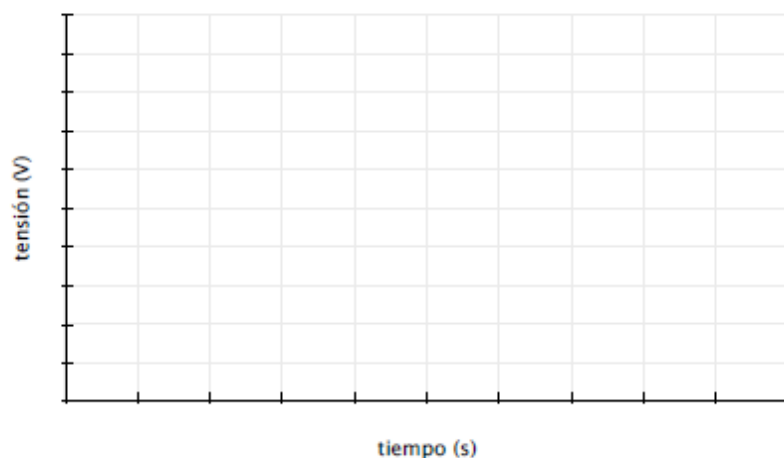
6 Trabajo Inicial en el laboratorio

En este apartado vamos a comprobar los efectos que produce una impedancia de salida sobre el valor de tensión esperado en la medición con el osciloscopio. Para ello:

- 1) Configure el generador de funciones para obtener una señal (al medir en circuito abierto) con las siguientes características:

$$v(t) = 2 \sin(2 \pi f t) \text{ con } f = 100 \text{ kHz}$$

- 2) Conecte la resistencia $R_L = 47 \, \Omega$ a la salida del generador y mida la tensión que cae en ella. Dibújelas.
- 3) Conecte la resistencia $R_L = 10 \, \Omega$ a la salida del generador y mida la tensión que cae en ella. Dibújelas.
- 4) ¿Hay alguna diferencia entre los dos apartados anteriores? ¿Es la esperada?



- 5) ¿Está consiguiendo transferir la máxima potencia disponible a la carga? Razone su respuesta.

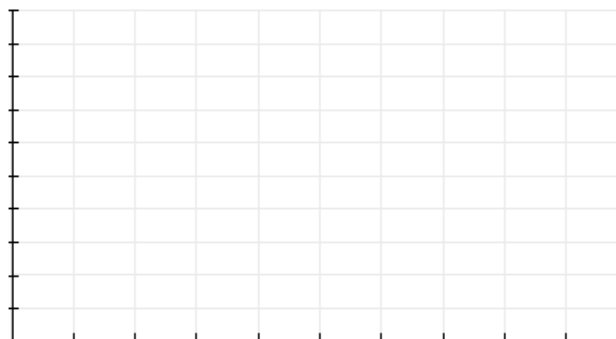


7 Adaptación de impedancia mediante circuitos básicos

En este apartado se van a utilizar los conceptos vistos en la introducción teórica, para ello trabajaremos con dos etapas de adaptación basadas en el toroide explicado previamente. En todos los casos se pretende adaptar la resistencia R_L de $10\ \Omega$ a $50\ \Omega$,

7.1 Adaptación de impedancia mediante circuito LC

- 1) Utilizando las fórmulas dadas en la introducción, y a partir de los parámetros AL, realice un inductor con el valor L calculado previamente.
 - 2) Conecte el circuito LC al generador y coloque la resistencia $R_L=10\ \Omega$ a la salida del circuito LC.
 - 3) Compruebe la forma de onda de tensión a la entrada y a la salida del circuito LC.
 - 4) ¿Está consiguiendo transferir la máxima potencia disponible a la carga? Razone su respuesta.
-
- 5) Busque la frecuencia en la que la amplitud de la salida sea máxima. ¿Cuál es la impedancia equivalente vista por la fuente?
 - 6) Mueva la frecuencia del generador en ambos sentidos hasta que la salida se modifique. Represente el valor obtenido en función de la frecuencia e identifique el valor de las frecuencias f_1 y f_2 en que la potencia entregada por el generador es la mitad (3dB **en potencia**). Dibuje algunos puntos de interés y calcule el ancho de banda del montaje.





7) ¿Qué conclusiones obtiene?

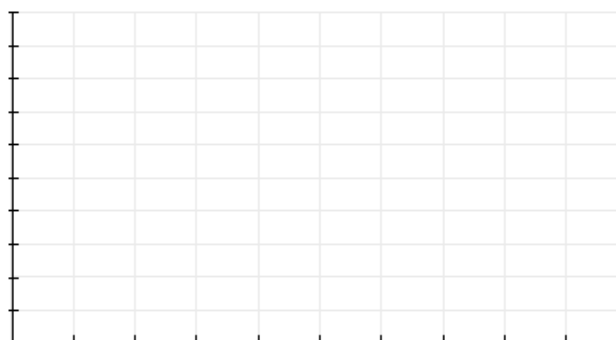
7.2 Adaptación de impedancia mediante transformador

A partir de los conceptos y ecuaciones de la introducción teórica, se pide:

1) Calcule en primer lugar la relación de transformación n para adaptar la impedancia R_L

$n=$

- 2) Para ese valor de n y utilizando el toroide construya un transformador que mantenga la relación entre espiras.
- 3) Utilizando la placa de pruebas conecte el generador al transformador toroidal, y la resistencia $R_L=10\ \Omega$ a la salida del transformador.
- 4) Compruebe la forma de onda de tensión a la entrada y la salida del transformador.
- 5) ¿Está consiguiendo transferir la máxima potencia disponible a la carga? Razone su respuesta.
- 6) Busque la frecuencia en la que la amplitud de la señal de tensión sea máxima. ¿Cuál es la impedancia equivalente vista por la fuente?
- 7) Mueva la frecuencia del generador en ambos sentidos hasta que la salida se modifique. Represente el valor obtenido en función de la frecuencia e identifique el valor de las frecuencias f_1 y f_2 en que la potencia entregada por el generador es la mitad (3dB **en potencia**). Dibuje algunos puntos de interés y calcule el ancho de banda del montaje.



8) ¿Qué conclusiones obtiene?

8 Choke en modo común

A partir de los conceptos de la introducción teórica, se pide:

- 1) Construya un choke utilizando el toroide. Recuerde que la relación de transformación debe ser 1:1 en este caso.
- 2) Conecte el choke en la placa de pruebas en configuración modo común. Los siguientes apartados permiten comprobar el comportamiento del montaje, cuando se utiliza para filtrar las corrientes
 - a. Generador inyectando modo común
 - b. Generador inyectando modo diferencial

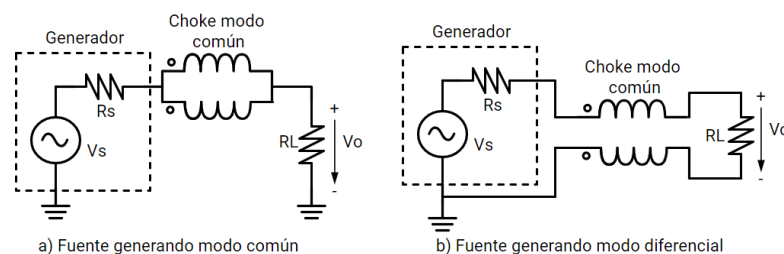


Fig. 13: Circuitos con choke en modo común con a) fuente en modo común, y b) fuente en modo diferencial.

Para el circuito a) se pide:

- 3) Configure el generador para una tensión (medida en circuito abierto) de 2 Vpp y 1 MHz
- 4) Monte el circuito a) con una resistencia RL de 47 Ω
- 5) Mida la tensión a la salida del generador y en la resistencia RL
- 6) Explique lo que ve y responda a las siguientes preguntas ¿Cuánta potencia llega a la carga? ¿Qué impedancia está viendo el generador? Razone sus respuestas.



Para el circuito b) se pide:

- 7) Configure el generador para una tensión (medida en circuito abierto) de 2 Vpp y 1 MHz
- 8) Monte el circuito b) con una resistencia RL de 47 Ω
- 9) Mida la tensión a la salida del generador y en la resistencia RL

IMPORTANTE: Note que la resistencia RL no tiene conexión a tierra y recuerde que la pinza de la sonda del osciloscopio es tierra. Si conecta dicha pinza al terminal inferior de RL el choke queda cortocircuitado, invalidando las medidas. Debe realizar la medida de Vo utilizando dos sondas y el modo matemático del osciloscopio.

- 10) Explique lo que ve y responda a las siguientes preguntas ¿Cuánta potencia llega a la carga? ¿Qué impedancia está viendo el generador? Razone sus respuestas.

- 11) ¿Que conclusiones obtienes comparando ambos comportamientos?

9 Trabajo opcional

Como trabajo opcional se propone a los alumnos que amplíen lo visto en la sesión práctica realizando los ejercicios siguientes:

- 1) Calcule para cada una de las etapas vistas, el precio total de la etapa de adaptación de impedancia.
- 2) Identifique aplicaciones en las que podamos usar alguna de las etapas vistas en la práctica, y trate de exponerla brevemente.
- 3) Discuta la validez de cada uno de los métodos utilizados para la medida de las impedancias anteriores, compárelos en prestaciones, costes, aplicabilidad, pérdidas de potencia ...

**ENTREGUE ESTE CUESTIONARIO AL PROFESOR AL FINAL DE LA SESIÓN.
EL TRABAJO OPCIONAL SERÁ ENTREGADO EN UNA FECHA POSTERIOR.**