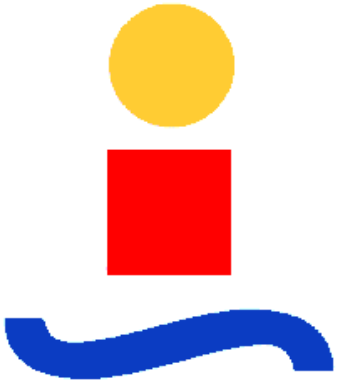
Tecnología y Componentes Electrónicos y Fotónicos



LIBRO DE PRÁCTICAS

CURSO 2001/02

Alejandro Carballar Rincón

Doctor Ingeniero de Telecomunicación

Joaquín Granado Romero

Ingeniero de Telecomunicación

Ingeniero de Telecomunicación

Departamento de Ingeniería Electrónica

Área de Tecnología Electrónica

DIE

Universidad de Sevilla

Escuela Superior de Ingenieros

http://woody.us.es/

Prólogo

Pensar que este Manual de Prácticas para la asignatura de Tecnología y Componentes Electrónicos y Fotónicos de primer curso de la titulación de Ingeniero de Telecomunicación ha salido de la nada sería ingrato y no haría justicia a los profesores que han dedicado tiempo y esfuerzo en la planificación, elaboración, desarrollo y montaje de estas prácticas.

Por ello, mención especial merecen los profesores **Francisco Colodro** y **Juan García** que diseñaron el contenido de las prácticas que se imparten actualmente y realizaron el arduo trabajo de la fabricación de las placas de circuito impreso que se utilizan en las mismas. El resultado de su trabajo es la programación y organización actual de las prácticas de la asignatura.

Agradecer también los comentarios y críticas constructivas del profesor **Fernando Muñoz** en las prácticas de la segunda parte; y al profesor **Jorge Chávez** por estar siempre disponible para actualizar la página Web de la asignatura y poner a disposición de los alumnos los programas y memorias de las prácticas vía Internet.

En general, agradecer a todos los alumnos y profesores que han pasado por esta asignatura desde que comenzaran los estudios de Ingeniero de Telecomunicación en 1991, porque de alguna forma todos han contribuido a su actualización y mejora. En este sentido es importante destacar que el contenido de estos apuntes no pretende ser definitivo, sino todo lo contrario, son unos apuntes totalmente susceptibles de nuevas ideas y mejoras que permitan perfeccionar todos los aspectos de su función docente en la consecución de nuestro principal objetivo: formar los futuros Ingenieros de Telecomunicación.

Profesorado

Juan García Ortega	juangar@gte.esi.us.es	Responsable de prácticas
Ramón González Carvajal	carvajal@gte.esi.us.es	
Fernando Muñoz Chavero	fmunoz@gte.esi.us.es	
Alejandro Carballar Rincón	alex@gte.esi.us.es	
Juana María Martínez Heredia	jmmh@gte.esi.us.es	
Juan Antonio Sánchez Segura	shanshe@gte.esi.us.es	
Mº Ángeles Martín Prats	mangeles@gte.esi.us.es	
Joaquín Granado Romero	joaquin@gte.esi.us.es	

Los profesores se encuentran en el Dpto de Ingeniería Electrónica localizado en:

- Laboratorio **L2 planta 1.**
- Cartuja **E2-SO**

Web de la asignatura

http://woody.us.es/ASIGN/TCEF_1T/

Contenido

1 INTRODUCCIÓN AL LABORATORIO DE ELECTRÓNICA 1-1

1.1 Objetivo de la práctica 1-1

1.2 Identificación de componentes electrónicos y medida de resistencias. 1-1

1.3 Montaje divisor de tensión 1-3

1.4 El Generador de funciones y el Osciloscopio. 1-3

2 RESPUESTA TRANSITORIA DEL CIRCUITO RC 2-1

2.1 Objetivo de la práctica 2-1

2.2 Montaje del circuito RC. 2-1

2.3 Generación de una señal de excitación. 2-1

2.4 Medida de una señal de excitación. 2-2

2.5 Excitación del circuito RC. 2-4

2.6 Medida de la constante RC y tiempo de subida. 2-5

2.7 Respuesta del circuito RC a señales de diferentes frecuencias. 2-6

3 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DEL CIRCUITO RC 3-1

3.1 Objetivo de la práctica. 3-1

3.2 Introducción teórica. 3-1

3.2.1 El principio de superposición. 3-1

3.2.2 El análisis de Fourier. 3-2

3.2.3 Función de transferencia 3-3

3.2.4 Medida experimental de la función de transferencia 3-4

3.3 Realización práctica 3-6

3.3.1 Medida experimental de la función de transferencia de la configuración paso bajo. 3-6

3.3.2 Medida experimental de la función de transferencia de la configuración paso alto. 3-6

A. Tabla de medidas de la función de transferencia paso bajo (LPF). 3-7

B. Tabla de medidas de la función de transferencia paso alto (HPF). 3-8

4 MEDIDA DE LA CARACTERÍSTICA ESTÁTICA DE DIODOS 4-1

4.1 Objetivo de la práctica 4-1

4.2 Introducción teórica. 4-1

4.2.1 Sincronismo, nivel y pendiente de disparo 4-1

4.3 Medida de la Característica I-V de un diodo 4-3

4.3.1 El circuito de medida 4-3

4.3.2 Potencia consumida por el diodo 4-3

4.3.3 Representación de la característica I-V 4-4

4.4 Realización práctica 4-4

4.4.1 Medida de la característica estática de un diodo LED 4-4

4.4.2 Medida de la característica estática de un diodo Zener 4-6

A. Características técnicas del diodo ZENER 4-7

B. Características técnicas del diodo LED 4-8
5 CIRCUITOS RECTIFICADORES CON DIODOS 5-1
5.1 Objetivo de la práctica 5-1
5.2 Introducción teórica. 5-1
5.2.1 Señales alternas y señales contínuas 5-2
5.2.2 Circuito rectificador de media onda 5-2
5.2.3 Circuito rectificador de media onda y filtrado con condensador 5-4
5.2.4 Circuito regulador con diodo Zener 5-5
5.3 Realización práctica 5-5
5.3.1 Circuito Rectificador de Media Onda 5-5
5.3.2 Circuito Rectificador de Media Onda y filtrado con Condensador 5-6
5.3.3 Circuito Regulador con diodo Zener 5-7
6 INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA DE SIMULACIÓN DE CIRCUITOS PSPICE 6-1
6.1 Objetivo de la práctica 6-1
6.2 Introducción teórica. 6-1
6.2.1 Como trabajar con PSpice 6-2
6.2.2 El fichero de entrada “fichero.CIR” 6-3
6.2.3 El fichero de salida “fichero.OUT” 6-4
6.2.4 El fichero de salida “.DAT” 6-5
6.3 Realización práctica. 6-5
6.3.1 Respuesta transitoria del circuito RC 6-5
6.3.2 Función de transferencia del circuito RC 6-5
6.3.3 Filtro paso-banda 6-6
6.3.4 Característica estática de diodos 6-6
6.3.5 Característica estática de transistores BJT 6-7
6.4 Bibliografía recomendada 6-7
A. Breve descripción de comando SPICE 6-8
7 POLARIZACIÓN DEL TRANSISTOR BIPOLAR (BJT) 7-1
7.1 Objetivo de la práctica 7-1
7.2 Introducción teórica. 7-1
7.3 Realización práctica 7-2
7.3.1 Análisis teórico del circuito de polarización del BJT 7-2
7.3.2 Caracterización experimental del circuito de polarización del BJT 7-2
7.3.3 Caracterización mediante simulación SPICE del circuito de polarización del BJT 7-2
B. Características del transistor Q2N2222 7-4
8 BJT COMO AMPLIFICADOR EN CONFIGURACIÓN DE EMISOR COMÚN 8-1
8.1 Objetivo de la práctica. 8-1
8.2 Introducción teórica. 8-1
8.2.1 Cálculo del punto de polarización del circuito 8-2

8.2.2 Cálculo de la ganancia en tensión del amplificador 8-2
8.3 Realización práctica 8-3
8.3.1 Análisis teórico del circuito amplificador con BJT 8-3
8.3.2 Caracterización experimental del circuito amplificador con BJT 8-4
8.3.3 Caracterización mediante simulación SPICE del circuito amplificador con BJT. 8-6
9 BJT COMO AMPLIFICADOR EN CONFIGURACIÓN DE EMISOR COMÚN CON RESISTENCIA DE EMISOR 9-1
9.1 Objetivo de la práctica 9-1
9.2 Introducción teórica. 9-1
9.2.1 Cálculo del punto de polarización del circuito 9-1
9.2.2 Cálculo de la ganancia en tensión del amplificador 9-2
9.3 Realización práctica 9-3
9.3.1 Análisis teórico del circuito amplificador con BJT 9-3
9.3.2 Análisis experimental del circuito amplificador con BJT 9-4
9.3.3 Simulación SPICE del circuito amplificador con BJT 9-4
10 EMISOR – RECEPTOR AM 10-1
10.1 Objetivo de la práctica 10-1
10.2 Introducción teórica. 10-1
10.2.1 La Modulación en Amplitud AM 10-2
10.2.2 Modulador de Ley Cuadrática 10-3
10.2.3 Demodulador de señales AM: El detector de envolvente 10-5
10.3 Realización práctica 10-5
10.3.1 Caracterización mediante simulación SPICE del circuito emisor – receptor de AM 10-6
10.3.2 Demostración experimental de emisión y recepción de señales radio AM 10-7
11 EL TRANSISTOR DE EFECTO DE CAMPO JFET COMO AMPLIFICADOR 11-1
11.1 Objetivo de la práctica 11-1
11.2 Introducción teórica. 11-1
11.2.1 Modelo de gran señal del transistor JFET 11-2
11.2.2 Modelo de pequeña señal del transistor JFET 11-4
11.3 Realización práctica 11-4
11.3.1 Caracterización experimental del JFET y su utilización como amplificador 11-5
11.3.2 Caracterización teórica del circuito amplificador con JFET. 11-6
11.3.3 Caracterización mediante simulación SPICE del circuito amplificador con JFET. 11-7
C. Hoja de características técnicas del BF245C 11-8

1 Introducción al Laboratorio de Electrónica

1.1 Objetivo de la práctica

El objetivo de esta práctica es que el alumno se familiarice con el material de laboratorio que utilizará durante la realización de las prácticas a lo largo del curso.

Se identificarán los distintos tipos de componentes electrónicos y la instrumentación básica de cada puesto que se encuentra formado por:

- osciloscopio,
- polímetro (voltímetro, amperímetro y óhmetro)
- generador de funciones.

1.2 Identificación de componentes electrónicos y medida de resistencias.

A. Identificación de la placa de pruebas.

En primer lugar el alumno deberá conocer la placa de pruebas o placa de inserción donde se montarán los distintos circuitos electrónicos para realizar las correspondientes medidas. Una placa de pruebas es simplemente una placa llena de perforaciones que están conectadas entre sí siguiendo el esquema de la Figura 1.1.

B. Identificación de resistencias, condensadores, latiguillos banana – banana y latiguillos BNC – cocodrilo.

Los componentes electrónicos que se utilizarán para las prácticas serán principalmente resistencias, condensadores, diodos, transistores bipolares y transistores FET, y se irán presentando a lo largo de las distintas prácticas. Además, se utilizarán componentes de conexionado para alimentar y excitar los diferentes circuitos electrónicos. Estos serán los latiguillos banana – banana que se utilizan para la medida de voltajes y resistencias con el polímetro; los latiguillos BNC – cocodrilo que se utilizan para excitar los circuitos con formas de onda del generador de funciones; y las sondas de los osciloscopios que son utilizadas para introducir las señales en estos equipos y que están diseñadas específicamente para minimizar los errores de carga de las medidas.

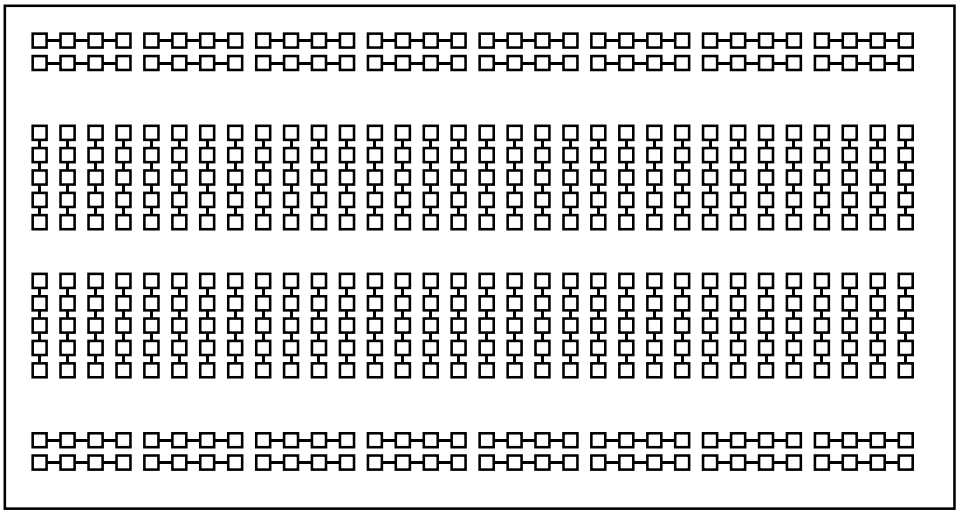


Figura 1.1. Conexionado interno de la placa de pruebas.

El material de laboratorio es muy delicado, por lo que es necesario extremar el cuidado en su manejo.

C. Medida de resistencias mediante el código de colores.

Puede observarse que dichas resistencias están recubiertas por una serie de barras de colores, las cuales indican el valor aproximado del valor óhmico de la misma. Para leer el valor de la resistencia se deberá utilizar el código de colores que se adjunta en la Tabla 1-1, y el procedimiento será el siguiente:

- Identificar la banda de tolerancias, que en general será de color oro o color plata.
- Colocar la resistencia en la forma que aparece en la Figura 1.2.
- En esta posición el valor de la resistencia se obtiene mediante la expresión:

$$R(\Omega) = [xy] \times 10^{Z} \pm \text{tolerancia}$$

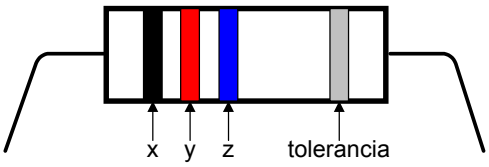


Figura 1.2. Esquema de bandas de colores de las resistencias

COLOR	x	y	z	Tolerancia
Plata			-2	10%
Oro			-1	5%
Negro		0	0	
Marrón	1	1	1	1%
Rojo	2	2	2	2%
Naranja	3	3	3	
Amarillo	4	4	4	
Verde	5	5	5	
Azul	6	6	6	
Violeta	7	7		
Gris	8	8		
Blanco	9	9		

Tabla 1-1. Código de colores de las resistencias

Siguiendo este procedimiento de medida, calcular el valor de las cinco resistencias que se adjuntan con el material de prácticas.

D. Medida de resistencias con el polímetro (Ohmetro).

A continuación pasaremos a medir con el polímetro el valor de las resistencias para comprobar que son del valor que marca su código de colores. Para ello, pulsaremos en el multímetro el botón kΩ, colocaremos la rueda en la escala más alta, y utilizaremos dos latiguillos banana – banana para tocar en los extremos de la resistencia, una conectada al terminal negro y la otra conectada al terminal rojo. Progresivamente iremos disminuyendo la escala de resistencias (rueda) para conseguir la medida más precisa posible.

¡No utilizar el terminal azul!, Es para medir corriente.

1.3 Montaje divisor de tensión

Una vez que conocemos como es el conexionado de la placa de pruebas se propone montar sobre la misma un divisor de tensión, compuesto por una fuente independiente de tensión (V) y dos resistencias (R1 y R2) . El circuito se muestra en la Figura 1.3.

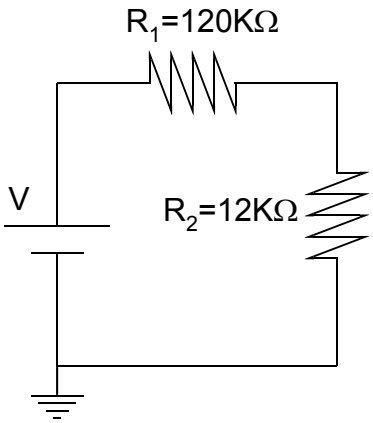


Figura 1.3. Divisor de tensión.

Un posible montaje en la placa de pruebas sería el mostrado en la Figura 1.4. Una vez comprobados los valores de las resistencias pasaremos a alimentar el circuito conectándole una fuente de alimentación de 12 V. Para ello utilizaremos uno de los terminales azules de la fuente junto con el rojo que esté a su lado. Seguidamente los conectaremos a las patas de las resistencias y con las ruedas *fine* y *coarse* nos aseguraremos de poner 12 V en las bornas.

Por último, le daremos al botón **ON** para efectivamente alimentar el circuito (hasta que no se ha pulsado dicho botón, y la luz central no se ha encendido, la fuente no está funcionando).

Seguidamente utilizaremos el multímetro para medir la tensión aplicada y cómo esta tensión se reparte en el divisor de tensión. Para ello utilizaremos las mismas bananas que para medir Ohmios pero ahora pulsando el botón **V** en vez del de KΩ.

Al igual que antes comenzaremos poniendo la escala en la mayor posible e iremos disminuyendo progresivamente para obtener la medida más precisa posible. Habremos de tener cuidado de no llevar la rueda a una escala menor que el valor de voltaje que estamos midiendo.

1.4 El Generador de funciones y el Osciloscopio.

Finalmente, vamos a identificar los otros dos instrumentos de medida que se encuentran en cada puesto de prácticas: el Generador de señal y el osciloscopio.

El osciloscopio sirve para ver en una pantalla las formas de onda de las señales de tensión que se producen en un circuito al excitarlo. Como es la primera vez que el alumno lo utiliza no veremos lo que le ocurre a un circuito complejo, sino que utilizaremos el circuito más sencillo posible. Dicho circuito es una fuente de tensión V=V(t). El dispositivo que genera dicha fuente de tensión se conoce como Generador de Señal, y proporciona diferentes señales de tensión periódicas en el tiempo.

Aplicaremos una señal senoidal cuya amplitud en principio es desconocida y eso es loque tenemos que averiguar con la ayuda del osciloscopio.

Para ello encenderemos el generador de señal y pulsaremos el botón de señal senoidal (indicada con el periodo de un seno), colocaremos la rueda de la frecuencia en 20KHz (para decirle al generador de señal que proporcione una tensión senoidal de frecuencia 20KHz, de esta forma: $V(t) = A\,\mathrm{sen}(2\pi \cdot 20KHz \cdot t)$) y la ajustaremos hasta que el display marque 20KHz. Comprobaremos que ningún botón de atenuación está pulsado y que las ruedas de Offset y amplitud están más o menos centradas.

Tanto las sondas como los conectores BNC son muy sensible, por lo que se ruega extremar el cuidado en su manejo

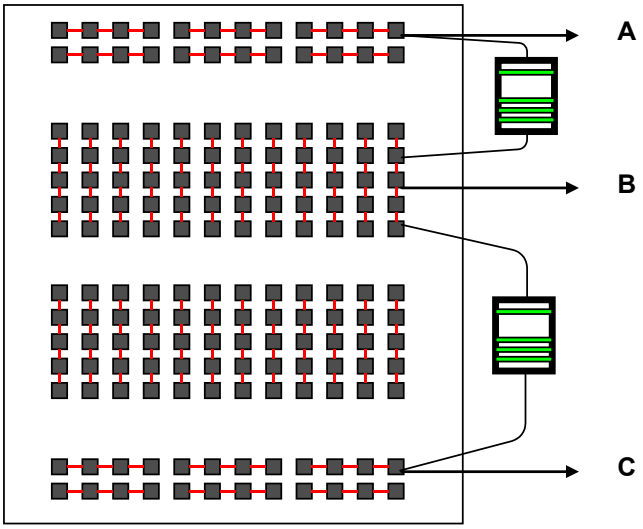


Figura 1.4. Montaje del divisor del tensión en la placa de pruebas.

Después pasaremos a conectar el osciloscopio. Seguidamente lo calibraremos pulsando GD en el canal en que se encuentre la sonda que estemos utilizando y moveremos **xpos** e **ypos** hasta tener la línea luminosa totalmente centrada en la pantalla. (A este proceso se le llama calibración del osciloscopio porque estamos colocando el nivel de tensión 0 a tierra, en el origen. Si este no coincide con el centro de la pantalla, podemos modificarlo con los botones de xpos e ypos). Una vez realizado esto, conectaremos la banana de tierra del generador de señal a la de la sonda y la banana roja a la sonda. De esta forma estamos realizando el montaje de la Figura 1.5.

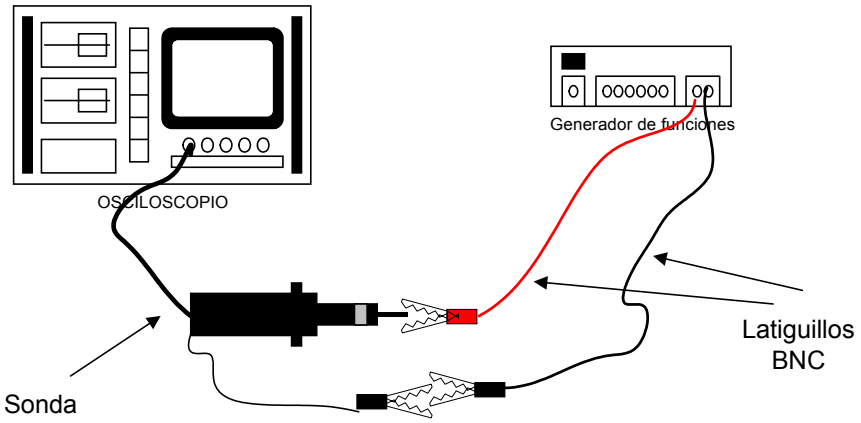


Figura 1.5. Montaje de generador de señal y osciloscopio.

De esta forma hemos conectado los extremos de la sonda del osciloscopio a los extremos de la fuente de tensión. Así, podemos ver en el osciloscopio la caída de tensión de la fuente de

tensión. Para ello colocaremos T/DIV en 0.1mseg (para hacer que la escala de tiempos sea consistente con la frecuencia de la señal de tensión. Si la frecuencia de la señal es 20KHz, esa frecuencia representa un periodo de T=0.05mseg. Por ello en el osciloscopio la escala de tiempos será de 0.05mseg, es decir, cada división en el eje x será 0.05mseg. Así podremos ver varios ciclos de la onda de tensión "representados" en pantalla). También tendremos que colocar V/DIV en 2V/div, de forma que cada división en el eje y represente 2 V. Si la onda se ve muy pequeña tendremos que disminuir la escala, mientras que si es muy grande tendremos que aumentarla. Por último mediremos la amplitud de señal de entrada (número de divisiones que su altura ocupa en pantalla).

Para terminar podremos cambiar en el generador de funciones las distintas formas de señal que puede proporcionar (señal cuadrada, senoidal y triangular) y visualizarlas en el osciloscopio.

2 Respuesta transitoria del circuito RC

2.1 Objetivo de la práctica

El objetivo de esta práctica es que el alumno conozca y se familiarice con el manejo del Generador de funciones y el Osciloscopio. El Generador de funciones será utilizado para proporcionar señales de tensión periódicas en el tiempo, mientras que el Osciloscopio se utilizará para la visualización y medida de las mismas.

Para este propósito se va a estudiar la respuesta transitoria de un circuito RC, y en particular, la carga y descarga de un condensador.

2.2 Montaje del circuito RC.

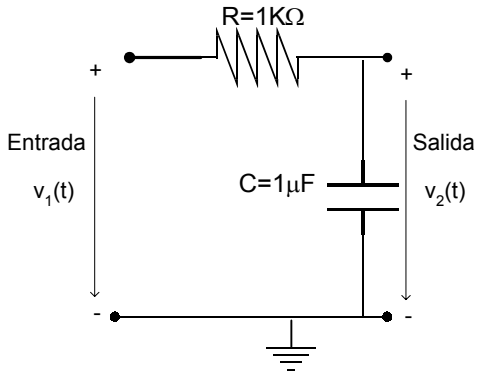


Figura 2.1. Circuito RC paso bajo.

El circuito que se muestra en la Figura 2.1 es un circuito RC en configuración de paso bajo. Utilice los componentes necesarios para montar dicho circuito en la placa de pruebas. Para ello, efectúe la medida (utilizando el polímetro o el código de colores) de las diferentes resistencias, e identifique numéricamente el valor de la capacidad del condensador para utilizar los valores correctos.

2.3 Generación de una señal de excitación.

A continuación se va a generar la señal de tensión con la cual se va a excitar al circuito RC (señal *entrada* de la Figura 2.1). Para ello se va a utilizar el generador de funciones.

El generador de funciones permite la formación de señales de tensión periódicas como la mostrada en la Figura 2.2. Los parámetros configurables son:

- **Forma de onda**: Cuadrada, Triangular o Senoidal (en este caso es una señal triangular). La forma de onda puede ser seleccionada por los botones frontales del instrumento.
- **Periodo (T) o Frecuencia (f).** La frecuencia es regulable de forma aproximada mediante los mandos en forma de rueda. La relación entre ambos parámetros es la siguiente:

$$f = \frac{1}{T}(\text{Hz})\,;\, T = \frac{1}{f}(\text{Seg.})$$

- **Valor Pico-Pico**: Máxima excursión de la señal desde el mínimo al máximo. A la mitad de esta cantidad se le denomina **Amplitud o Valor de Pico**. Este nivel puede ser controlado por rueda de ajuste de amplitud.

La amplitud puede ser atenuada mediante los pulsadores de atenuación que se encuentran en el frontal del instrumento. Asegúrese que se encuentran inactivos.

- **Nivel de continua de la señal** [DC]. Este nivel puede activarse o desactivarse mediante un pulsador del generador.

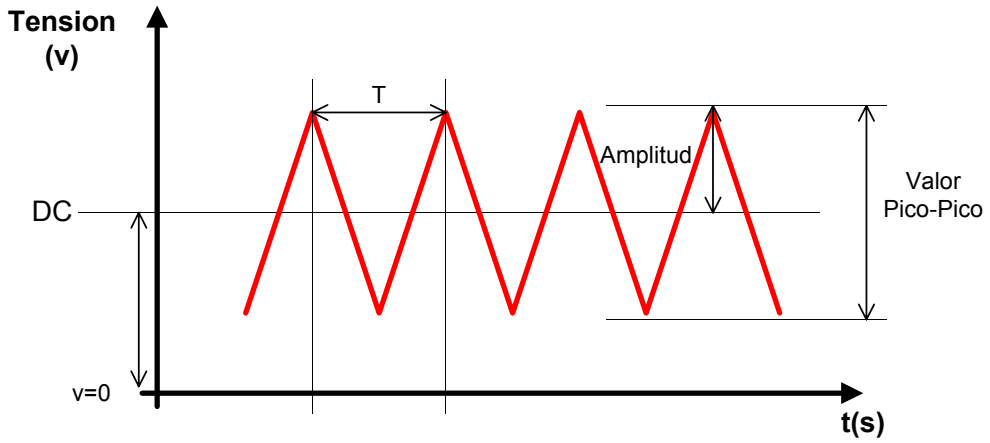


Figura 2.2. Parámetros característicos de las señales periódicas

Ajustaremos el generador de funciones para obtener una señal con las siguientes características:

Parámetro	Valor
Tipo de señal	CUADRADA
Frecuencia	1KHz
Valor de amplitud	2,5 v
Nivel de continua	2,5 v

Tabla 2-1. Señal de excitación

2.4 Medida de una señal de excitación.

Una vez que se ha generado la señal de voltaje con el generador de funciones, deberemos de visualizarla con el Osciloscopio para asegurar que los valores que hemos seleccionado son los correctos. De lo contrario se deberá hacer un ajuste hasta hacer coincidir las medidas de amplitud, frecuencia y nivel de continua con los exigidos.

Para ello conectaremos la sonda del osciloscopio al latiguillo que se encuentra contectado con el conector BNC al generador de funciones.

La señal que aparecerá en el osciloscopio será similar a la de la Figura 2.3.

Hemos de hacer notar que los valores de frecuencia y tensión que indica el generador de funciones son aproximados, y que los valores exactos deberán de conseguirse mediante la medida de los mismos con el Oscilospio.

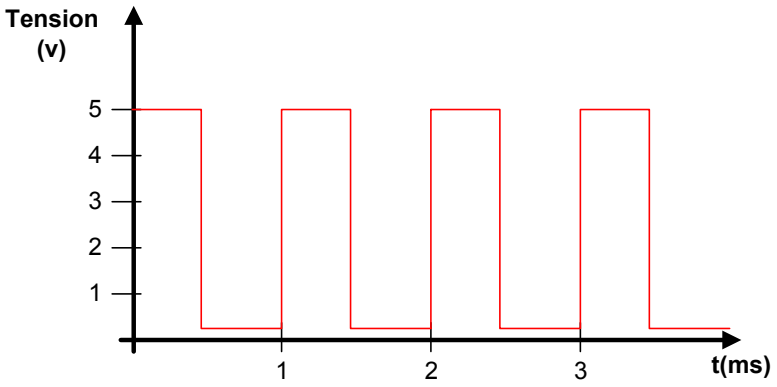


Figura 2.3. Señal de excitación

Como ya hemos dicho, el Osciloscopio es el equipo de Laboratorio que se utilizará para la representación y medida de las señales de voltaje dependientes del tiempo. Una vez encendido el Osciloscopio asegúrese que la traza de la pantalla se visualiza con una intensidad y grosor suficiente mediante los controles de "Intensidad" y "Enfoque".

El Osciloscopio se compone de dos Canales Verticales (CH I y CH II) que constan de sendos atenuadores - amplificadores de ganancia variable, de modo que el **factor de deflexión** de cada uno de ellos es variable a saltos con los mandos "Volts/div". Este factor de deflexión indica el valor de tensión que corresponde a cada división o cuadro en vertical.

Se ha de notar que este valor es conocido solamente cuando dicho mando se encuentra en la posición de calibrado.

Para la representación de las señales en función del tiempo el Osciloscopio dispone de una velocidad de barrido regulable a saltos, con lo que la **base de tiempos** es variable a saltos de la misma forma que los canales verticales. Cuando se fija una base de tiempos mediante el botón "Time/div", se conoce el tiempo en segundos que corresponde a una división o cuadro en horizontal.

Es importante decir que el valor de la base de tiempos se conoce cuando el botón "Time/div" se encuentra en la posición de calibrado.

La Figura 2.4 muestra los conceptos explicados.

Los valores de los factores de deflexión para cada uno de los canales verticales, así como el valor de la base de tiempos se visualizan de forma continua en la pantalla del Osciloscopio, identificándose cada uno de ellos por Y1, Y2 y T, respectivamente. Cuando los calores se encuentran en la posición de calibrado aparecerá en la pantalla un símbolo "=", de lo contrario el símbolo mostrado será un ">" indicando que no podrán realizarse medidas absolutas.

Por otro lado, cada canal del osciloscopio puede funcionar con el conjunto atenuador - amplificador vertical en cualquiera de los siguientes modos de entrada (Conmutadores etiquetados con "AC-DC" y GD".

- DC (=): La señal es representada en pantalla exactamente igual a como se encuentra a la entrada.
- AC (≈): A la señal a la entrada se le resta su componente continua.
- GD (Tierra ó Masa): La entrada del conjunto atenuador – amplificador es puesta a masa al tiempo que la entrada de señal al osciloscopio queda en circuito abierto.

De este modo se fija el nivel de referencia de tensión (0 V) con respecto se medirán las señales de voltaje.

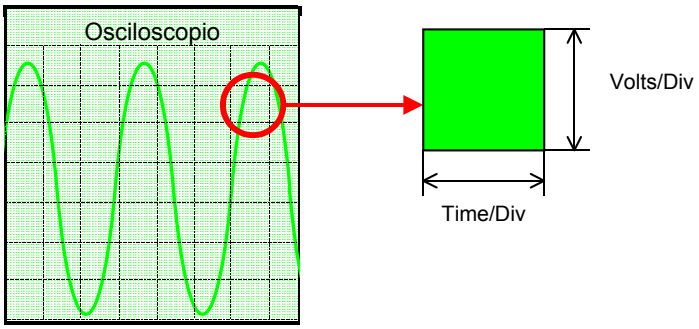


Figura 2.4. Concepto de Factor de Deplexión y Base de Tiempos

El procedimiento de medida constará de los siguientes pasos:

- En primer lugar se establecerá el nivel de referencia de tensiones trabajando con el osciloscopio en modo GD y llevando el nivel de 0 V al sitio deseado mediante los botones "Y.POS I" y "X.POS".
- A continuación se cambiará el modo del osciloscopio a DC y se seleccionarán el factor de deflexión y la base de tiempos adecuadas que hace que la señal ocupe el máximo de pantalla.
- Sobre esta traza de señal ya podrán medirse los parámetros de dicha señal ya que el *grid* de la misma está calibrado.

Es importante verificar que la sonda del osciloscopio (que sirve para introducir la señal en éste) esté en "x1", ya que de lo contrario estaremos introduciendo un factor de atenuación. El utilizar la sonda en la posición "x10" se hará en cursos superiores

Una vez realizado el montaje efectúe la medida de la señal de tensión de forma cuadrada del apartado 2.3, y refleje dicha medida en la memoria de la práctica (traza visualizada en la pantalla del osciloscopio, factor de deflexión del canal vertical y base de tiempos).

También es importante conocer que el osciloscopio del puesto de laboratorio dispone de dos **cursores** para realizar medidas absolutas con una mayor resolución. Los controles de estos cursores se encuentran en la parte inferior de la pantalla del osciloscopio. Dedique tiempo para aprender su manejo conmutando entre medidas en tensión y medidas en tiempo. La diferencia entre ambos cursores se visualiza de forma continua en la pantalla del osciloscopio.

Finalmente, cambie en el generador de funciones a las diferentes formas de onda triangular y senoidal y compruebe los resultados en la pantalla del oscilospio. Deje por último activa la forma de onda cuadrada con los valores especificados en la Tabla 2-1.

2.5 Excitación del circuito RC.

Excite el circuito RC de la Figura 2.1 montado en la placa de pruebas con la forma de onda cuadrada con los valores especificados en la Tabla 2-1. A continuación, mida con el osciloscopio las señales de voltaje: $v_1(t)$ con el canal 1 (CH I) y $v_2(t)$ con el canal 2 (CH II) del osciloscopio.

El osciloscopio le permitirá visualizar cada uno de los canales por separado o los dos canales simultáneamente. Es importante destacar que cada canal vertical tiene una referencia de tensión independiente (GD), con lo cual deberán de estar en el mismo sitio de la pantalla para poder comparar ambas señales.

Refleje las medidas de $v_1(t)$ y $v_2(t)$ en la memoria de la práctica. Mida también de forma explícita los valores de tensión máximo y mínimo de $v_2(t)$ y verifique que se corresponden con los valores proporcionados por la teoría de circuitos, y que vienen dados por:

Ecuación [2.1]

$$V_{min} = \frac{1 - e^{-(\frac{T}{2\tau})}}{1 - e^{-(\frac{T}{\tau})}} \cdot e^{-(\frac{T}{2\tau})} \cdot V_s$$

Ecuación [2.2]

$$V_{max} = \frac{1 - e^{-(\frac{T}{2\tau})}}{1 - e^{-(\frac{T}{\tau})}} \cdot V_s$$

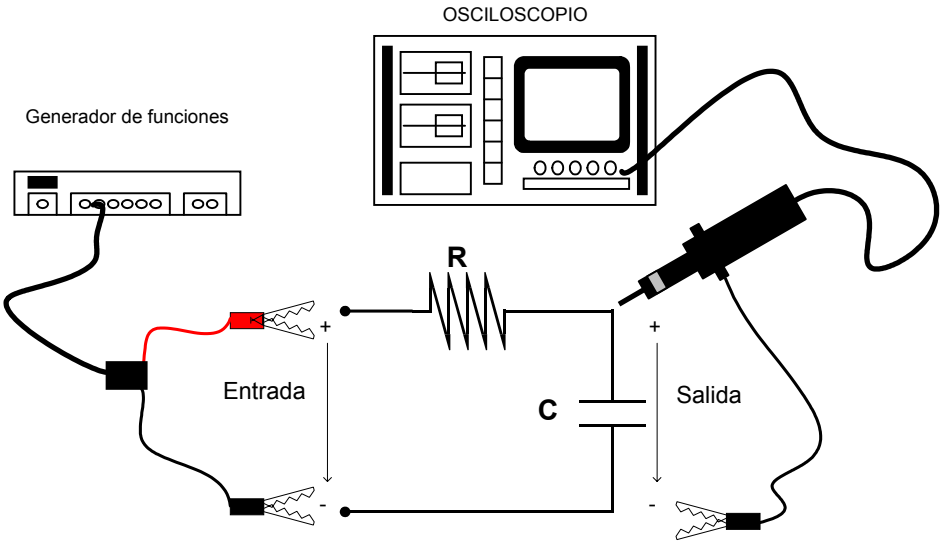


Figura 2.5. Excitación del circuito RC con la señal de tensión de forma cuadrada.

T es el periodo de la señal de entrada (en este caso $v_1(t)$), V_s es el valor máximo de la señal de entrada, y τ=RC es la constante de carga y descarga del circuito. A la vista de los resultados, discuta en la memoria de la práctica el porqué de la forma de onda de la señal $v_2(t)$. Los valores máximo y mínimo de la señal $v_2(t)$ pueden obtenerse de forma iterativa analizando la carga y descarga del condensador durante los 5 primeros periodos de la señal, es decir, durante un tiempo igual a 5 mseg.

2.6 Medida de la constante RC y tiempo de subida.

Se define el *Tiempo de Subida* t_s como el tiempo que tarda la señal $v_2(t)$ en pasar del 10% de su valor máximo al 90% de su valor máximo. EL tiempo de subida se ilustra en la Figura 2.6.

El tiempo de subida y la constante de carga están relacionados por la Ecuación [2.3]. La constante de carga τ del circuito RC puede medirse con el osciloscopio una vez que se conoce la relación de la misma con el tiempo de subida.

$$t_s = 2.2 \cdot \tau$$

Ecuación [2.3]

Para la medida del tiempo de subida tendrá que seleccionar una frecuencia de señal para $v_1(t)$ más baja (por ejemplo 50 Hz) y así poder dar tiempo al condensador a cargarse y descargarse y por tanto, poder medir el tiempo de subida y calcular a partir de él la constante de carga τ. Para una medida más cómoda del tiempo de subida utilice los cursores del osciloscopio y el "magnificador".

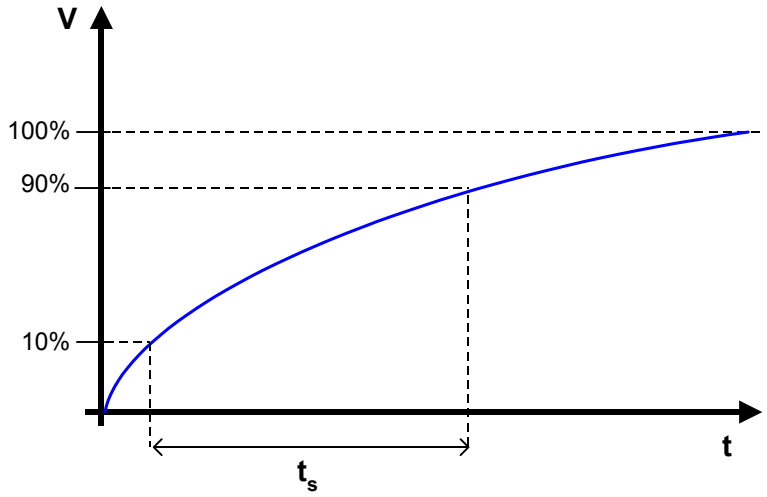


Figura 2.6. Tiempo de subida

Refleje esta serie de medidas en la memoria y los resultados que ha obtenido, tanto para el tiempo de subida, como para la constante de carga, y representando gráficamente las formas de onda obtenidas.

2.7 Respuesta del circuito RC a señales de diferentes frecuencias.

En este último apartado de la práctica se va estudiar la respuesta del circuito RC a señales de voltaje de forma cuadrada correspondientes a distintas frecuencias. De esta forma, el alumno deberá de medir y representar gráficamente las señales $v_1(t)$ y $v_2(t)$ cuando la frecuencia de la señal de entrada es una senoidal de amplitud 5V y frecuencia:

100 Hz	400 Hz	10 KHz	50 KHz	100 KHz

A la vista de los resultados, intente explicar y discutir las diferentes formas de onda que se obtienen para la señal $v_2(t)$.

3 Funciones de transferencia del circuito RC

3.1 Objetivo de la práctica.

El objetivo de la presente práctica es que el alumno se familiarice con los conceptos de excitación senoidal, frecuencia y función de transferencia de un circuito. Para esto, se estudiará el circuito RC serie en configuraciones de paso bajo y paso alto.

Para la obtención experimental de las funciones de transferencia se aprenderá a medir la relación de amplitudes entre dos señales senoidales y su diferencia de fases o desfase. Para esto último, se presentarán las dos técnicas de medida de desfase: la técnica basada en la visualización simultanea de las dos señales y la técnica basada en la composición de figuras de Lissajours y el modo XY del osciloscopio.

3.2 Introducción teórica.

3.2.1 El principio de superposición.

En la "*Introducción a la Teoría de Circuitos*" se ha estudiado como caracterizar el comportamiento de un circuito cualquiera en el dominio del tiempo mediante la resolución de un sistema de ecuaciones integro-diferenciales. Es decir, se ha conseguido analizar un circuito cualquiera y calcular la señal de salida (respuesta del circuito) cuando a su entrada se aplica una determinada señal (excitación del circuito). En la Figura 3.1 se muestra una representación de este hecho.

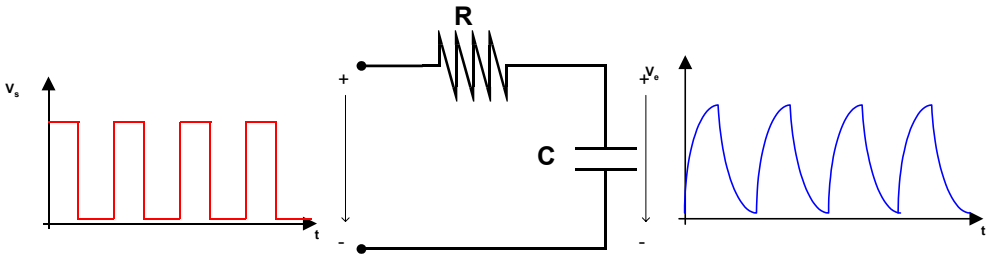


Figura 3.1. Esquema general del comportamiento de un circuito.

El análisis del circuito en el dominio del tiempo no es sencillo debido al sistema de ecuaciones integro – diferenciales que hay que resolver. Además la solución que se obtiene es una solución

particular para una determinada señal de entrada y por tanto no puede conocerse de una forma general el comportamiento del circuito.

En este sentido, el objetivo que se pretende conseguir será el disponer de otra herramienta de análisis de circuitos que caracterice de forma general el comportamiento de un circuito cualquiera, y así poder calcular la señal de salida correspondiente a cualquier señal de entrada.

Este comportamiento o caracterización general del circuito puede conseguirse cuando el circuito trabaja bajo condiciones de ***LINEALIDAD***, y por tanto puede aplicarse el ***PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN***, esquematizado en la Figura 3.2. Este principio expresa que si $s_1(t)$ es la respuesta de un circuito a la señal de excitación $e_1(t)$ y $s_2(t)$ lo es a la excitación $e_2(t)$, la respuesta del circuito a una señal de excitación $A \cdot e_1(t)+B \cdot e_2(t)$ vendrá dada por $A \cdot s_1(t)+B \cdot s_2(t)$.

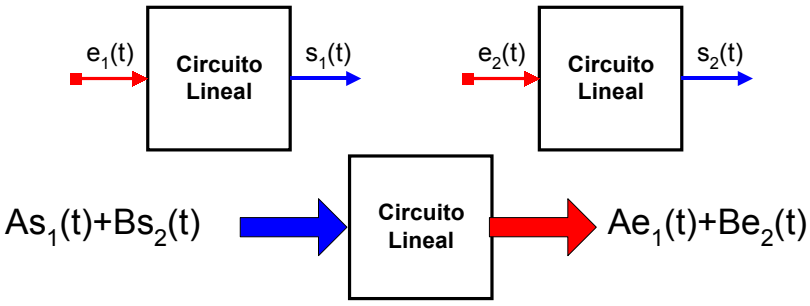
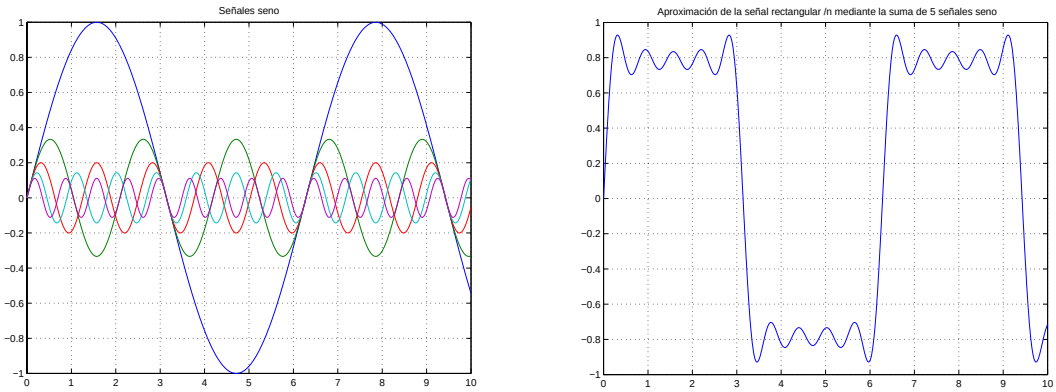


Figura 3.2. Principio de superposición

3.2.2 El análisis de Fourier.

El análisis de Fourier permite descomponer cualquier señal o forma de onda en una combinación lineal de senoides de diferentes frecuencias. Por ejemplo una señal cuadrada puede ser expresada como una combinación de señales senoidales como se muestra en la Figura 3.3.



(a) (b)

Figura 3.3. (a) Senoidales de diferentes frecuencias. (b) Aproximación mediante suma de senoidales

En consecuencia, conociendo cómo se comporta el circuito a señales de forma senoidal, podrá conocerse cómo se comporta el circuito a cualquier señal de entrada, simplemente descomponiendo dicha señal de entrada en suma de diferentes senoides y aplicando el principio de superposición. Este análisis del circuito es conocido como ***excitación senoidal permanente***.

De esta forma, para tener totalmente caracterizado el comportamiento de un circuito lineal se deberá conocer la respuesta del circuito a cualquier excitación senoidal de una determinada frecuencia. Este método de caracterización del circuito puede realizarse experimentalmente de

forma sencilla ya que las señales senoidales se generan fácilmente con el Generador de funciones.

En general, si se aplica una señal de excitación a la entrada del circuito, de forma de onda senoidal y dada por la expresión de la Ecuación [3.1].

$$v_e(t) = A_e \mathrm{sen}(2\pi \cdot f \cdot t + \phi_e) \qquad \text{Ecuación [3.1]}$$

Los parámetros que la caracterizan son:

- A_e: amplitud de la señal.
- f: Frecuencia.
- ϕ_e: desfase.

Si excitamos a un circuito lineal con una señal seniodal, la salida será siempre una señal senoidal de la misma frecuencia f que la entrada y podrán diferenciarse en la amplitud y desfase. La salida del circuito viene determindada por la Ecuación [3.2]:

$$v_s(t) = A_s \mathrm{sen}(2\pi \cdot F \cdot t + \phi_s) \qquad \text{Ecuación [3.2]}$$

3.2.3 Función de transferencia

Como se ha visto en el apartado anterior, la salida de un circuito lineal que es excitado con una señal seno es otra señal seno que:

- Mantiene la misma frecuencia f.
- Altera la amplitud. Si la amplitud de salida es superior a la amplitud de entrada ($A_e < A_s$) se habrá producido una *amplificación* de la señal de entrada. Por el contrario, si $A_e > A_s$ se habrá producido una *atenuación* del señal entrante.
- La fase de la señal de salida será distinta de la fase de la señal de entrada.

Por tanto, el comportamiento del circuito lineal puede caracterizarse completamente mediante una función que recoge estos dos efectos, alteración de amplitudes y de fases, para cada frecuencia. Esta función se denomina ***Función de Transferencia*** del circuito. Es una función compleja cuya expresión viene dada en forma polar (módulo y fase) por la Ecuación [3.3].

$$H(f) = |H(f)| \; e^{j\phi(f)} = \left|\frac{A_s(f)}{A_e(f)}\right| \; e^{j\,[\phi_s(f)-\phi_e(f)]} \qquad \text{Ecuación [3.3]}$$

Donde:

- $|A_s(f)/A_e(f)|$ es la *Respuesta en Amplitud o Módulo de la Función de Transferencia*. Expresa la relación entre las amplitudes de las formas senoidales a la entrada y a la salida del circuito para una determinada frecuencia. Es una magnitud adimensional y se expresa o bien en unidades naturales o bien en unidades logarítmicas denominadas *Decibelios (dB).* La Ecuación [3.4] muestra cómo calcular la respuesta en amplitud en decibelios.

$$|H(f)|_{dB} = 20 \times \log\left|\frac{A_s(f)}{A_e(f)}\right| \qquad \text{Ecuación [3.4]}$$

- $\phi_s(f)-\phi_e(f)$ es la *Fase de la Función de Transferencia* y mide la diferencia de fases o desfase entre la entrada y la salida de un circuito lineal. Se mide en unidades de ángulos (radianes o grados).

Es importante hacer notar que para representar gráficamente la función de transferencia se han de representar tanto su magnitud como su fase de forma conjunta ya que ambas son esenciales para caracterizar el comportamiento del circuito. En la Figura 3.4 se presenta un ejemplo de representación de una función de transferencia.

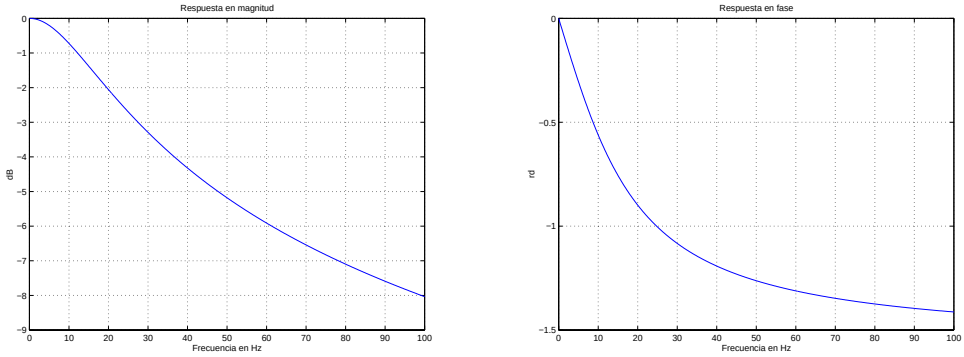


Figura 3.4. Representación de la función de transferencia de un circuito

3.2.4 Medida experimental de la función de transferencia

A. Medida de la respuesta en magnitud

Para la medida de la respuesta en amplitud bastará con visualizar la entrada en el Canal I del osciloscopio y medir el valor de amplitud o el valor de pico a pico. Posteriormente se conmutará el canal del osciloscopio para mostrar la salida (CANAL-II) y se procederá del mismo modo. El cociente de amplitudes, o alternativamente, el cociente de valores de pico a pico, será el valor de la respuesta en magnitud para la frecuencia de trabajo.

B. Medida de la respuesta en fase

El desfase o diferencia de fases entre dos señales de igual frecuencia puede realizarse de dos formas:

- Mediante observación simultanea de ambas señales,
- Mediante composición de figuras de Lissajours.

MEDIDA DE DESFASES MEDIANTE OBSERVACIÓN SIMULTANEA DE AMBAS SEÑALES.

Este método está basado en que una vez sincronizado el osciloscopio a una señal periódica, ambos canales se disparan para el mismo valor de tensión, y por tanto, para la misma fase. El desfase entre ambas señales podrá calcularse conociendo que un periodo de la señal corresponde a una fase de 2π radianes o 360º.

Por tanto, para calcular el desfase entre dos señales, se visualizarán las dos señales de forma simultanea en la pantalla, se identificarán los dos pasos por cero (con igual pendiente) de ambas formas de onda y se calculará la diferencia de tiempos Δt tal y como se indica en la Figura 3.5.

Una vez medida la diferencia de tiempos o el retraso de la señal del Canal II respecto del Canal I, se calcula el desfase entre las dos señales aplicando una regla de tres simple ya que el tiempo correspondiente a un periodo de señal equivale a 360º. El desfase, tanto en radianes como en grados viene expresado en la Ecuación [3.5].

$$\Delta\phi = \phi_s - \phi_e = 0 - (0 + \frac{2\pi \cdot \Delta t}{T})[\text{rad}] = -\frac{360 \times \Delta t}{T}[^{o}] \qquad \text{Ecuación [3.5]}$$

donde T representa el periodo de la señal periódica y t_2-$t_1$el retraso de tiempos entre las dos señales. De esta forma, se dice que la señal del Canal II está retrasada $\Delta\phi$ respecto de la señal del Canal I.

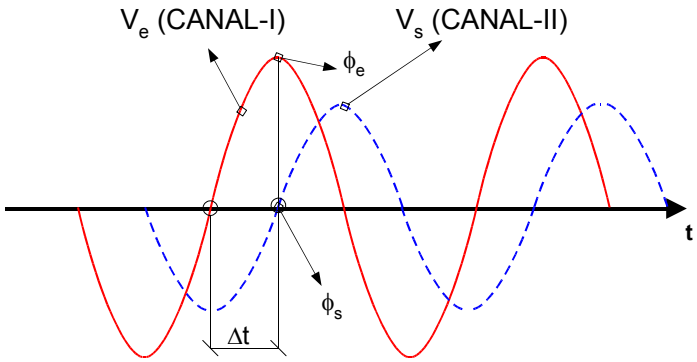


Figura 3.5. Medida de desfase mediante visualización simultanea

MEDIDA DE DESFASES MEDIANTE COMPOSICIÓN DE FIGURAS DE LISSAJOURS.

La medida de desfases entre dos señales de igual frecuencia también puede realizarse mediante la composición de figuras de Lissajours, utilizando el modo XY del osciloscopio.

El Modo XY se activa dejando pulsado durante un par de segundos el botón DUAL del osciloscopio.

En este modo de operación del osciloscopio, en el eje vertical se representa la variación de un canal, mientras que en el eje horizontal se representa la variación del otro canal. Es importante hacer notar que el eje horizontal del osciloscopio trabajando en modo XY no corresponde a un eje de tiempos, sino que corresponde también a un eje de voltajes.

Analíticamente, cuando se representa una señal senoidal en el Canal I del osciloscopio (eje vertical) y otra señal senoidal desfasada de igual frecuencia en el Canal II (eje horizontal), utilizando el modo XY, se está eliminando la variable tiempo de ambas señales y por tanto, se obtiene la representación de una elipse, como se muestra en la Figura 3.6.

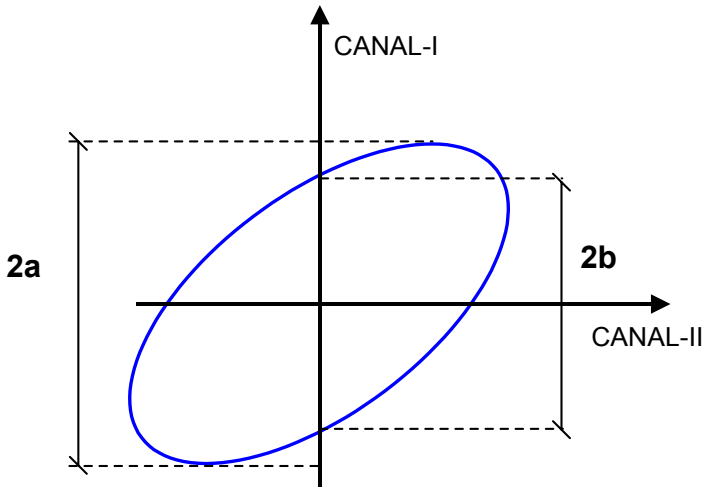


Figura 3.6. Figura de Lissajours

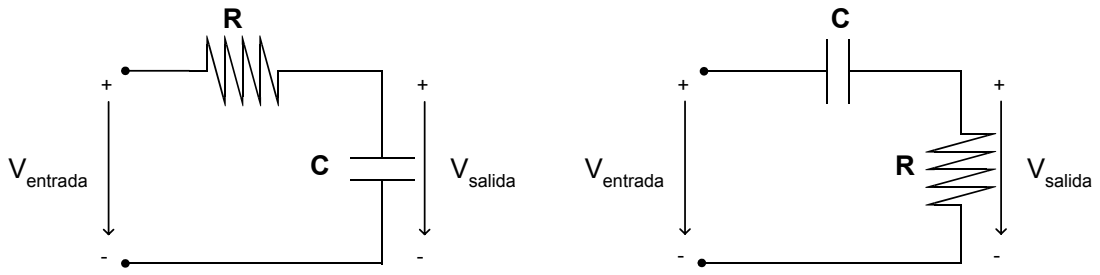
La forma de la elipse está directamente relacionada con el desfase entre ambas señales, y viene dado por la Ecuación [3.6], donde a y b, son las magnitudes que se indican en la Figura 3.6.

$$\Delta\phi = |\phi_s - \phi_e| = \text{arcsen}\,\frac{a}{b}$$ Ecuación [3.6]

Es importante destacar que para que la medida de las magnitudes a y b sea correcta, la elipse deberá estar centrada en la pantalla del osciloscopio. Esto puede conseguirse fácilmente disminuyendo la intensidad del haz de electrones, colocando los canales I y II en el modo de operación GD, centrando el punto que aparece en la pantalla mediante los mandos Y-POS I e Y-POS II, y volviendo al modo XY del osciloscopio para visualizar ya la elipse correctamente.

3.3 Realización práctica

La realización de la práctica va a consistir en la medida experimental de las funciones de transferencia de la configuración paso bajo y de la configuración paso alto del circuito RC serie. Estas dos configuraciones se muestran en la Figura 3.7.



(a) Filtro RC paso bajo (LPF: Low Pass Filter) (a) Filtro RC paso alto (HPF: High Pass Filter)

Figura 3.7. Filtros RC paso bajo y paso alto

3.3.1 Medida experimental de la función de transferencia de la configuración paso bajo.

Se deberá montar el circuito RC serie en configuración de paso bajo en la placa de pruebas, y se aplicará una senoidal de frecuencia 500 Hz y amplitud 3 V, sin componente de continua.

Con el osciloscopio visualice de forma simultanea las formas de onda de voltaje a la entrada al circuito ($v_i(t)$ en el Canal I) y a la salida ($v_o(t)$ en el Canal II). Deberá de observar que las dos señales son de la misma frecuencia y que se diferencian en su amplitud y en una diferencia de fases. Mida la amplitud de cada una de las dos formas de onda y mida el desfase entre ellas siguiendo los dos procedimientos que se detallan en la “Introducción teórica.”.

Con estos datos se deberá rellenar la tabla 1 contenida en el anexo de esta práctica y deberá repetir el procedimiento de medida para las demás senoides de diferentes frecuencias que se indican en la Tabla 3-1.

A partir de los resultados se deberá representar gráficamente la función de transferencia del circuito RC serie en configuración de paso bajo, tanto su característica en amplitud como su característica en fase. La característica en amplitud deberá de representarse tanto en escala lineal como en escala logarítmica (en dB frente a la frecuencia expresada también en escaña logarítmica).

A la vista de los resultados comente brevemente como afecta el circuito a las diferentes senoides de diferentes frecuencias e intente justificar el nombre de configuración en “paso bajo”.

3.3.2 Medida experimental de la función de transferencia de la configuración paso alto.

Obtenga experimentalmente la función de transferencia del circuito RC serie en configuración de paso alto siguiendo la misma metodología que en el apartado anterior. Represéntela gráficamente.

A la vista de los resultados comente brevemente como afecta el circuito a las diferentes senoides de diferentes frecuencias e intente justificar el nombre de configuración en “paso alto”.

A. Tabla de medidas de la función de transferencia paso bajo (LPF).

	Respuesta en amplitud			**Repuesta en fase** **Método de observación conjunta**			**Repuesta en fase** **Método de Lissajours**		
Frec.	**A_e (v.)**	**A_s(v.)**	**$\|H(f)\|=A_s/A_e$**	**Dt (seg.)**	**T (seg.)**	**ϕ(º)**	**A**	**B**	**ϕ(º)**
f=50Hz	3 V								
f=100Hz	3 V								
f=250Hz	3 V								
f=500Hz	3 V								
f=1KHz	3 V								
f=5KHz	3 V								
f=10KHz	3 V								
f=25KHz	3 V								

Tabla 3-1. Resultados prácticos correspondientes al filtro LP.

B. Tabla de medidas de la función de transferencia paso alto (HPF).

	Respuesta en amplitud			**Repuesta en fase** **Método de observación conjunta**			**Repuesta en fase** **Método de Lissajours**		
Frec.	**A_e (v.)**	**A_s(v.)**	**$\|H(f)\|=A_s/A_e$**	**Dt (seg.)**	**T (seg.)**	**ϕ(º)**	**A**	**B**	**ϕ(º)**
f=50Hz	3 V								
f=100Hz	3 V								
f=250Hz	3 V								
f=500Hz	3 V								
f=1KHz	3 V								
f=5KHz	3 V								
f=10KHz	3 V								
f=25KHz	3 V								

Tabla 3-2. Resultados prácticos correspondientes al filtro HP.

4 Medida de la Característica estática de diodos

4.1 Objetivo de la práctica

El objetivo de esta practica será que el alumno mida la característica estática (característica I-V) de diferentes tipos de diodos, en particular de un diodo LED y de un diodo Zener. Para ello, el alumno medirá caídas de tensión con el osciloscopio y aprenderá a medir corrientes con el osciloscopio mediante la medida de la caída de tensión en una resistencia de valor conocido.

Finalmente, para la obtención de la característica I-V se trabajará con el modo XY del osciloscopio. Además, en el ámbito de utilización del osciloscopio se introducirán los conceptos de sincronismo de la señal a representar y los conceptos de nivel y pendiente de disparo.

4.2 Introducción teórica.

4.2.1 Sincronismo, nivel y pendiente de disparo

El problema que nos encontramos en un osciloscopio es el de tener que representar señales en el tiempo de duración ilimitada en una pantalla de dimensiones limitadas. La única forma que se tiene para visualizar estas señales periódicas es representando un trozo de la misma sucesivamente. Por tanto, un osciloscopio (en modo analógico) representa un trozo de señal una y otra vez, es decir, cuando termina de representar una pantalla completa comienza a representar otra y así sucesivamente.

Se denomina *barrido* a cada una de las representaciones de una pantalla. La señal que determina el instante de tiempo en el que el osciloscopio ha de iniciar la representación de un barrido se denomina *señal de sincronismo*.

Como puede observarse en la Figura 4.1, existe un tiempo entre que el osciloscopio termina de representar una pantalla y comienza a representar la siguiente, para que el trozo de señal representado en pantalla sea siempre el mismo. Este tiempo se denomina tiempo de *Hold-Off,* y durante este tiempo la señal a representar no se aplica al canal vertical.

El tiempo de duración de un barrido está determinado por el valor de la base de tiempos (TIME/DIV). Cuanto mayor es este valor, mayor será el tiempo de representación en pantalla (mayor será el trozo de señal visualizada) y al contrario, cuanto menor sea este valor, menor será el tiempo de representación en pantalla (menor será el trozo de señal visualizada).

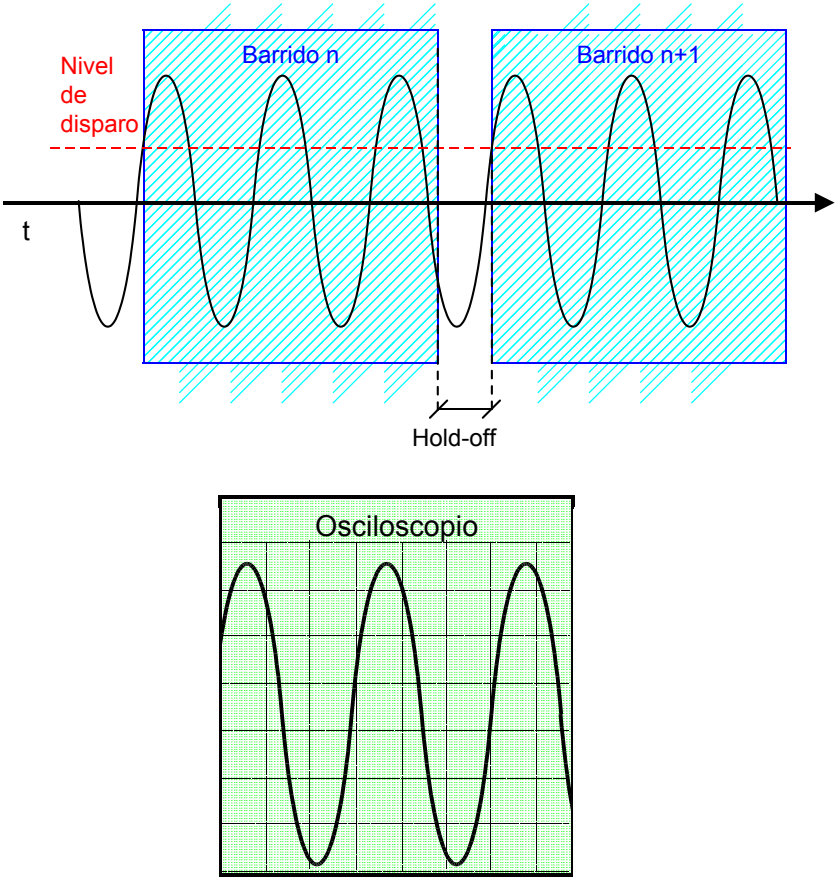


Figura 4.1. Explicación gráfica de los conceptos.

Para que el trozo de señal que se representa en la pantalla del osciloscopio sea siempre el mismo y pueda visualizarse de forma correcta, el osciloscopio habrá de comenzar a representar la señal siempre en el mismo punto.

Se denomina *Nivel de Disparo* (LEVEL) al nivel de la señal de sincronismo que una vez alcanzado supondrá el inicio del barrido. Para una señal periódica el nivel de disparo estará unívocamente determinado junto con su *Pendiente de disparo* (⌋ ó ⌉).

La señal de sincronismo podrá ser la del Canal I, Canal II o Externa (enchufada al conector correspondiente del frontal del osciloscopio).

La señal de sincronismo podrá ser generada por el osciloscpio de forma automática (AT) o de forma normal (NM). Es recomendable utilizar el modo automático de generación de señal de sincronismo salvo que las señales a representar sean muy complejas. En ambos modos de funcionamiento tanto el Nivel de disparo (LEVEL) como la Pendiente de disparo (⌋ y ⌉) pueden seleccionarse mediante los correspondientes controles del instrumento.

En la Figura 4.1 se muestra lo que ocurriría cuanto el osciloscopio representa una señal de tensión seno conectada al Canal I que es capturada cuando dicha señal alcanza un nivel de disparo con pendiente positiva (⌋). La propia señal del Canal I funciona como señal de sincronía.

Si el nivel de disparo no es alcanzado por la señal de sincronismo, el barrido no se iniciará, y por lo tanto no se mostrará de forma estática la señal en a pantalla. Hay que asegurar que la señal siempre alcanza el nivel de disparo. Para ello el nivel de disparo puede ajustarse mediante el control LEVEL del instrumento. Dicho nivel puede verse a la izquierda en la pantalla del osciloscopio.

Finalmente, el osciloscopio dispone de algunos modos de disparo específicos para determinados tipos de señales. Generalmente se trabajará con el modo de disparo *AC*, excepto cuando se representen señales de muy baja frecuencia donde se utilizará el modo de disparo *DC*. Los modos de disparo *HF*, *LF*, *TVL* y *TVF* son modos de sincronismo para señales complejas como por ejemplo señales de televisión.

4.3 Medida de la Característica I-V de un diodo

4.3.1 El circuito de medida

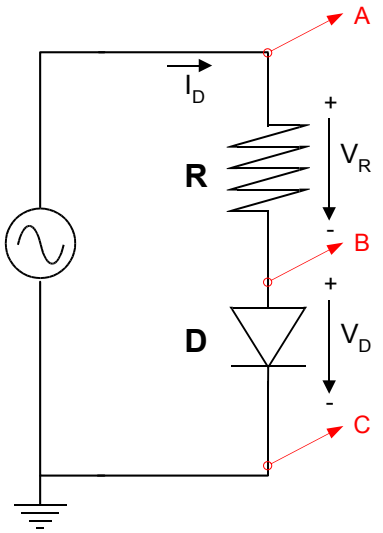


Figura 4.2 Polarización del diodo

Para la medida de la característica estática de un diodo se deberá medir tanto la caída de tensión que se produce entre sus bornas (V_D) como la corriente eléctrica que circula por él (I_D). En principio podría utilizarse el circuito que se muestra en la Figura 4.2.

La caída de tensión en el diodo puede ser medida conectando la sonda del osciloscopio entre los puntos B-C de la Figura 4.2.

En cambio la medida de la corriente que circula por el diodo no es inmediata ya que el osciloscopio solamente mide tensiones. Para medir intensidades en el osciloscopio en necesario recurrir a la la Ley de Ohm expresada en la Ecuación [4.1], que permitirá conocer intensidades a partir de la medida de tensiones.

$$i_D = i_R = \frac{v_R}{R} \qquad \text{Ecuación [4.1]}$$

Sin embargo, el circuito descrito en la Figura 4.2 presenta el problema que para medir de forma simultánea la caída de tensión en el diodo (conectado al canal I) y en la resistencia (conectada al canal II), no compartirían la misma referencia de tensión (Tierra).

De ahí que se utilice el circuito de la Figura 4.3 en el cual se utilizan dos ramas iguales compuestas de un diodo en serie con una resistencia. Dado que ambas ramas contienen la misma tensión aplicada y están compuestas de componentes iguales, la intensidad que circula por ambas será idéntica (I_D).

Una de las ramas se utilizará para medir la caída de tensión en el diodo, mientras que en la otra rama se determinará la intensidad que circula a partir de la caída de tensión de la resistencia. con la ventaja que ahora ya se tiene la misma referencia de tensión.

Las sondas del osciloscopio comparten siempre referencia de tensión (también denominada *masa* o *tierra*). Por esa razón los cocodrilos de masa de las sondas deben ir conectados al mismo punto del circuito

4.3.2 Potencia consumida por el diodo

Una vez que se conocen las caídas de tensión en el diodo y la corriente que circula a su través (calculada a partir de la caída de tensión en la resistencia) puede calcularse la potencia instantánea que se disipa en el diodo aplicando la expresión:

$$P_{dis} = v_D \cdot i_D = v_D \cdot \frac{v_R}{R} \qquad \text{Ecuación [4.2]}$$

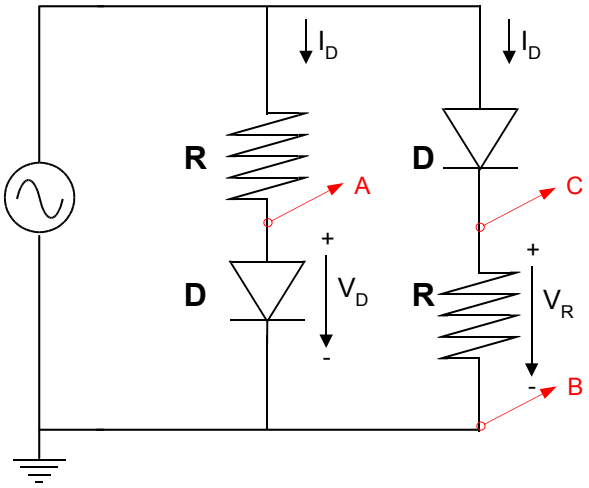


Figura 4.3. Circuito utilizado para la medida de la característica I-V. (R=1KΩ)

4.3.3 Representación de la característica I-V

Por último se podrá representar la característica estática o característica I-V del diodo obteniendo una gráfica similar a la representada en la Figura 4. Para ello se utilizará el modo XY del osciloscopio, que permitirá visualizar el Canal I (V_D) frente al Canal II (V_R que es proporcional a I_D).

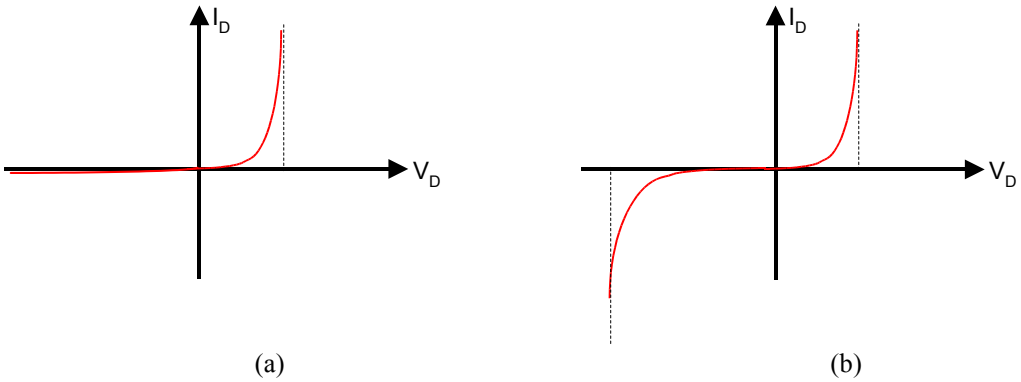


Figura 4.4. Características estáticas o característica I-V de (a) un diodo LED y (b) un diodo Zener.

4.4 Realización práctica

4.4.1 Medida de la característica estática de un diodo LED

A. <u>Generación de la señal de excitación</u>

Genere una señal con las siguientes características:

Parámetro	Valor
Forma de onda	TRIANGULAR
Frecuencia	1KHz
Amplitud	6 V
DC	-2 V
Valor mínimo	-8 V
Valor máximo	4 V

Tabla 4-1. Señal de excitación

Visualice la señal en el Canal I del osciloscopio y ajuste correctamente todos los parámetros de la señal. Asegúrese que el nivel de referencia de tensiones (GD) se encuentra en el centro de la pantalla del osciloscopio.

Verifique que la señal de sincronismo del osciloscopio se obtiene a partir de la señal del Canal I (TRIG.), y para diferentes valores del Nivel de disparo (LEVEL) y Pendiente de disparo (⌋ y ⌉), seleccione los modos de disparo AC y DC y visualice que ocurre con la señal que representa en la pantalla del osciloscopio.

Tome por ejemplo tres valores de Nivel de disparo: 0V, -6V y 6V. Refleje en la memoria de la práctica un breve resumen de las señales obtenidas en la pantalla del osciloscopio.

B. Montaje del circuito

A continuación monte el circuito descrito en la Figura 4.3 en la placa de pruebas, utilizando los diodos LED, teniendo cuidado de conectar correctamente el cátodo (-) y el ánodo (+).

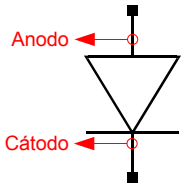


Figura 4.5. Pines de un diodo

C. Excitación y medida del circuito

Aplique ahora al circuito la señal de excitación generada en el apartado 4.4.1A. y realice las siguientes medidas:

- Mida la caída de tensión en el diodo, V_D, con el Canal I del osciloscopio y refleje en la memoria de la práctica la pantalla que se observa en el osciloscopio, indicando la base de tiempos, factor de deflexión y posición del GD. Explique la forma de onda obtenida.
- Con el Canal II del osciloscopio mida la caída de tensión en la resistencia de la otra rama, V_R, a partir de la cual puede obtener la corriente que circula a través del diodo. Refleje en la memoria de la práctica la pantalla que se visualiza en el osciloscopio e intente explicar la forma de onda obtenida.
- A partir de las medidas de caída de tensión en el diodo y la corriente que lo atraviesa, calcule la potencia instantánea máxima que disipa el diodo. Justifique cuándo ocurre dicho consumo máximo.

D. Obtención de la Característica I-V

Para obtener la forma de la característica I-V cambie el modo de operación del osciloscopio al modo XY, teniendo la precaución de tener bien centradas las referencias de tensión GD para dicho modo. Refleje en la memoria de la práctica la pantalla obtenida en el osciloscopio.

A partir de la medida anterior (V_R en función de V_D) represente gráficamente la característica I-V del diodo LED (I_D en función de V_D), indicando sobre la misma el valor de la tensión umbral del diodo V_t.

E. Comportamiento del diodo a altas frecuencias

Aumente la frecuencia de la señal de excitación proporcionada por el generador de funciones hasta un valor de 200KHz.

Observe qué ocurre con la forma de la característica I-V del diodo. Refleje la medida en la memoria de la práctica e intente dar una explicación a dicho fenómeno basándose en el circuito equivalente de gran señal del diodo estudiado en teoría.

4.4.2 Medida de la característica estática de un diodo Zener

A. Generación de la señal de excitación

Genere la siguiente señal de tensión con el generador de funciones:

Parámetro	Valor
Forma de onda	TRIANGULAR
Frecuencia	1KHz
Amplitud	7 V
DC	-2 V
Valor mínimo	-9 V
Valor máximo	5 V

Visualice la señal en el Canal I del osciloscopio para ajustar correctamente todos los parámetros de la señal y asegúrese que el nivel de referencia de tensiones (GD) se encuentra en el centro de la pantalla del osciloscopio.

B. Montaje del circuito

A continuación, monte el circuito descrito en la Figura 4.3 en la placa de pruebas, utilizando ahora los diodos Zener y teniendo cuidado de conectar correctamente el cátodo y el ánodo.

C. Excitación del circuito

Aplique ahora al circuito la señal de excitación generada en el apartado 4.4.2A. y realice las siguientes medidas:

- Mida la caída de tensión en el diodo, VD, con el Canal I del osciloscopio y refleje en la memoria de la práctica la pantalla que se observa en el osciloscopio, indicando la base de tiempos, factor de deflexión y posición del GD. Intente explicar la forma de onda obtenida.
- Con el Canal II del osciloscopio mida la caída de tensión en la resistencia de la otra rama, VR, a partir de la cual puede obtener la corriente que circula a través del diodo. Refleje en la memoria de la práctica la pantalla que se visualiza en el osciloscopio e intente explicar la forma de onda obtenida.
- A partir de las medidas de caída de tensión en el diodo y la corriente que lo atraviesa, calcule la potencia instantánea máxima que disipa el diodo.

D. Obtención de la Característica I-V

Para obtener la forma de la característica I-V cambie el modo de operación del osciloscopio al modo XY. Refleje en la memoria de la práctica la pantalla obtenida en el osciloscopio.

A partir de la medida anterior (V_R en función de V_D) represente gráficamente la característica I-V del diodo LED (i_D en función de v_D), indicando sobre la misma el valor de la tensión umbral del diodo V_t y la tensión Zener V_z.

A. Características técnicas del diodo ZENER

BZX55 SERIES

VOLTAGE REGULATOR DIODES

Silicon planar diodes in a DO-35 envelope intended for use as low-voltage stabilizers or voltage references. The series covers the normalized range of nominal working voltages from 2,4 V to 75 V with a tolerance of ± 5% (international standard E24).

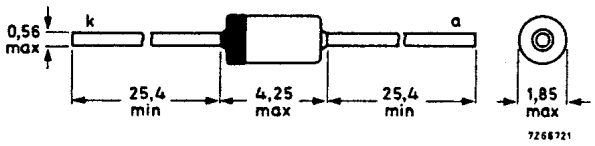
QUICK REFERENCE DATA

Working voltage range	V_Z	nom.	2,4 to 75 V
Total power dissipation*	P_{tot}	max.	500 mW
Non-repetitive peak reverse power dissipation	P_{ZSM}	max.	30 W
Junction temperature	T_j	max.	200 °C
Thermal resistance from junction to tie-point*	$R_{th\ j\text{-}tp}$	=	0,30 K/mW

* If leads are kept at T_{tp} = 50 °C at 8 mm from body.

MECHANICAL DATA

Fig. 1 DO-35 (SOD-27). Dimensions in mm



Cathode indicated by coloured band

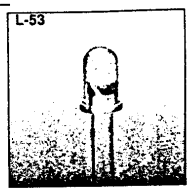
Zener diodes. 0,5 W.

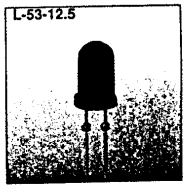
BZX55 Series. Glass Zener Diodes in DO-35 Package (T_A = 25°C). Outline: 6

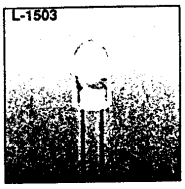
Type	Zener (1) Voltage Range at I_Z = 5 mA V_Z	Maximum Zener Impedance at I_Z = 5 mA Z_{ZT}	Maximum Zener Impedance at I_Z = 1 mA Z_{ZK}	Typical Temperature Coefficient	Maximum Reverse Leakage Current I_R	Maximum Reverse Leakage Current at V_R	Maximum Regulator Current I_{ZM}
	(V)	(Ω)	(Ω)	(%/°C)	(μA)	(V)	(mA)
BZX55-C2V7	2.5-2.9	85	600	−0.07	10	1.0	135
BZX55-C3V0	2.8-3.2	85	600	−0.07	4	1.0	125
BZX55-C3V3	3.1-3.5	85	600	−0.065	2	1.0	115
BZX55-C3V6	3.4-3.8	85	600	−0.06	2	1.0	105
BZX55-C3V9	3.7-4.1	85	600	−0.05	2	1.0	95
BZX55-C4V3	4.0-4.6	75	600	−0.025	1	1.0	90
BZX55-C4V7	4.4-5.0	60	600	−0.01	0.5	1.0	85
BZX55-C5V1	4.8-5.4	35	550	+0.015	0.1	1.0	80
BZX55-C5V6	5.2-6.0	25	450	+0.025	0.1	1.0	70
BZX55-C6V2	5.8-6.6	10	200	+0.035	0.1	2.0	64
BZX55-C6V8	6.4-7.2	8	150	+0.045	0.1	3.0	58
BZX55-C7V5	7.0-7.9	7	50	+0.050	0.1	5.0	53
BZX55-C8V2	7.7-8.7	7	50	+0.050	0.1	6.0	47
BZX55-C9V1	8.5-9.6	10	50	+0.060	0.1	7.0	43

B. Características técnicas del diodo LED

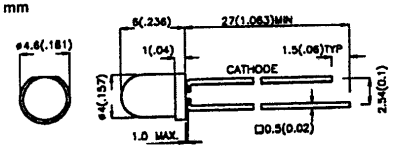
LEDS ESTANDAR



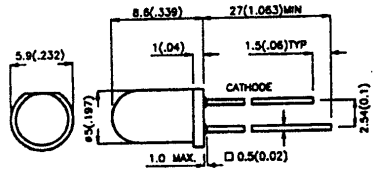




Referencia	Color Emisión + Material	Longitud de onda (nm)	Cápsula	Iv (mcd) @10mA *@20mA Min.	Iv (mcd) @10mA *@20mA Máx.	Ángulo Visión 2θ1/2	Cotas
L-44HD	GaP	700	rojo difuso	0,8	2	80°	4 mm
L-44ID	GaAsP/GaP	625	rojo difuso	8	32	80°	
L-44GD	GaP	565	verde difuso	3,2	20	80°	
L-44YD	GaAsP/GaP	590	amarillo difuso	3,2	20	80°	



L-53HD	GaP	700	rojo difuso	2	8	60°	T-1 3/4 (5 mm)
L-53ID	GaAsP/GaP	625	rojo difuso	12,5	80	60°	
L-53IT	GaAsP/GaP	625	rojo transparente	50	200	30°	
L-53EC	GaAsP/GaP	625	transparente	50	200	30°	
L-53ED	GaAsP/GaP	625	naranja difuso	12,5	80	60°	
L-53GD	GaP	565	verde difuso	5	32	60°	
L-53GT	GaP	565	verde transparente	20	150	30°	
L-53GC	GaP	565	transparente	20	150	30°	
L-53YD	GaAsP/GaP	590	amarillo difuso	5	32	60°	
L-53YT	GaAsP/GaP	590	amarillo transp.	20	80	30°	
L-53YC	GaAsP/GaP	590	transparente	20	80	30°	
L-53ND	GaAsP/GaP	610	naranja difuso	12,5	80	60°	
L-53NT	GaAsP/GaP	610	naranja transp.	50	200	30°	
L-53NC	GaAsP/GaP	610	transparente	50	200	30°	
L-53PGD	GaP	555	verde difuso	2	8	60°	
L-53PGT	GaP	555	verde transparente	5	32	30°	
L-53PGC	GaP	555	transparente	5	32	30°	
L-53SRSGW	GaAlAs GaP	660 565	blanco difuso	*80 *12,5	*200 *40	50°	



5 Circuitos Rectificadores con Diodos

5.1 Objetivo de la práctica

Un *Circuito Rectificador* es un circuito que permite obtener una tensión continua a partir de una tensión alterna. Estos circuitos rectificadores se utilizan en la práctica totalidad de los dispositivos electrónicos que se conectan a la red eléctrica y convierten la tensión alterna de alimentación, generalmente 220V, en tensión continua (3,6,12,10V etc.)

El objetivo de la práctica será el analizar diferentes configuraciones de circuitos rectificadores con diodos, medir las diferentes formas de onda que se obtienen en el proceso de rectificación, y finalmente, evaluar el comportamiento de las diferentes configuraciones en función de los parámetros de calidad que se definan.

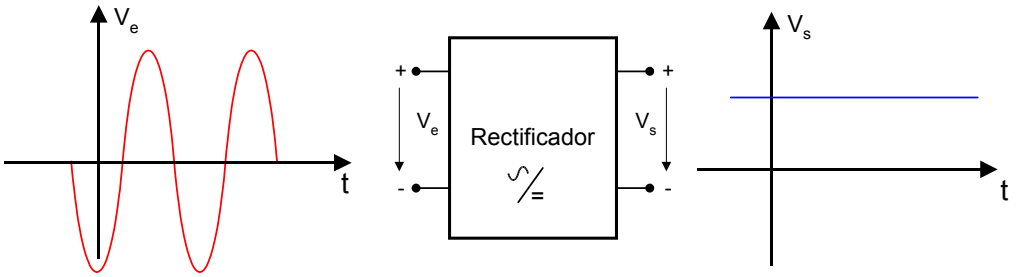


Figura 5.1. El Circuito Rectificador visto como una caja negra.

5.2 Introducción teórica.

En la parte teórica de la asignatura de Tecnología de Componentes Electrónicos y Fotónicos se han estudiado las siguientes configuraciones de circuitos rectificadores:

- circuito rectificador de media onda,
- circuito rectificador de onda completa,
- circuitos rectificadores con condensador, y,
- circuito regulador con diodo Zener,

El comportamiento general de cualquier circuito rectificador se muestra en la Figura 5.1.

A continuación se presenta un breve resumen de las configuraciones de circuito rectificador que van a utilizarse en el desarrollo de la práctica, haciendo especial hincapié en los parámetros que determinan la calidad de la señal rectificada.

5.2.1 Señales alternas y señales contínuas

De forma general la tensión alterna a la entrada del circuito vendrá dada por $V_e = A_e \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f \cdot t + \phi)$, siendo A_e la amplitud de la tensión V_e, f la frecuencia en Hertzios, t el tiempo en segundos y ϕ un desfase en radianes. Cualquier señal alterna pura está caracterizada por tener una componente continua (offset o DC) nula.

Por el contrario, la señal de salida del circuito rectificador V_s está caracterizada por tener una cierta componente de DC.

Para medir la componente de continua en el osciloscopio es necesario, en primer lugar, activar el modo DC y seguidamente conectar el indicador de DC.

Una forma muy común de indicar la magnitud de la tensión alterna de entrada es mediante su *Valor Eficaz* definido de forma genérica en la Ecuación [5.1], y particularizada para una señal senoidal en la Ecuación [5.2].

Igualmente se define *Valor Medio* o componente de contínua (DC) como el valor resultante de aplicar la Ecuación [5.3]. Si calculamos el valor medio de la señal de entrada veremos que, al ser una señal seno pura, es nulo. En cambio a la salida del rectificador tendremos una señal cuyo valor medio será no nulo.

$$V_{e,eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v_e dt} \qquad \text{Ecuación [5.1]}$$

$$v_{i,eff} = \frac{2 \cdot A_e}{\sqrt{2}} \qquad \text{Ecuación [5.2]}$$

$$\bar{v}_s = \frac{1}{T}\int_0^T v_s(t)dt \qquad \text{Ecuación [5.3]}$$

Para estimar la calidad de la tensión rectificada a la salida del circuito, que en el caso ideal sería una señal continua, se utiliza el parámetro *de Factor de rizado* (F_r). El Factor de Rizado se define como la relación entre la tensión pico-pico de la señal rectificada (diferencia entre el máximo y el mínimo) y la componente continua de la misma:

$$F_r = \frac{v_{o,pico-pico}}{\bar{v}_o} \times 100(\%) \qquad \text{Ecuación [5.4]}$$

El caso de circuito rectificador ideal se correspondería con un factor de rizado igual a cero ya que la amplitud pico-pico de la señal continua sería igual a cero. En general, puede concluirse que cuanto menor sea el factor de rizado mejor comportamiento presentará el circuito rectificador.

Consideraremos como valores de medida de la calidad del circuito rectificador el Factor de Rizado y el Valor Medio de la señal rectificada.

5.2.2 Circuito rectificador de media onda

En la Figura 5.2 se presenta el esquema del circuito rectificador de media onda. Dicho circuito consta de un diodo simple 1N4007 en serie con una resistencia. El circuito se excita a su entrada con una señal seno V_e y a su salida se obtiene la señal rectificada, V_s, sobre la carga R.

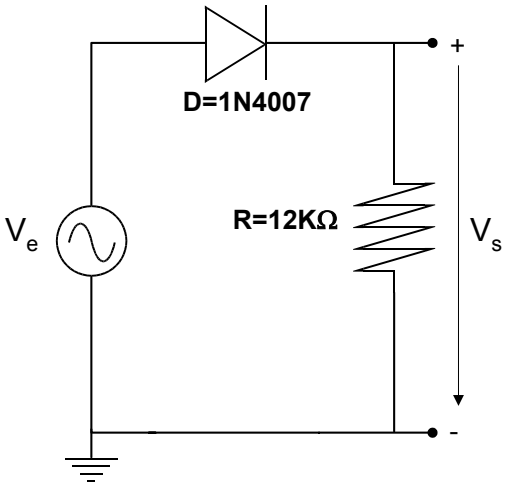


Figura 5.2. Circuito rectificador de media onda .

La tensión rectificada V_s a la salida del circuito rectificador estará determinada por la característica del diodo. Utilizando el modelo circuital del diodo puede obtenerse una aproximación de la tensión rectificada a la salida del circuito rectificador V_s. Dicho modelo establece que el diodo conduce cuando está polarizado en directa con una tensión mayor que la tensión umbral V_γ y está cortado cuando está polarizado con una tensión menor que la tensión umbral o en inversa.

La tensión alterna de entrada es rectificada por el diodo eliminando a la salida los semiciclos de tensión negativa, y obteniendo a la salida del circuito rectificador una forma de onda de tensión V_s. La Figura 5.3 muestra las formas de onda del circuito rectificador de media onda. Puede observarse que la salida es distinta de 0 en los semiciclos positivos de la señal V_e. La señal de salida se caracteriza por tener una componente continua u offset mayor que cero y que puede calcularse mediante la expresión de la Ecuación [5.3].

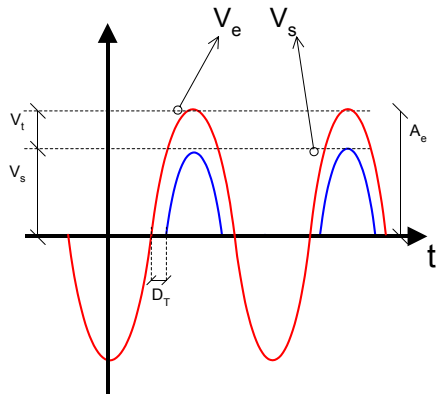


Figura 5.3. Formas de onda del rectificador de media onda.

Como se desprende de la Figura 5.3, los semiciclos positivos de la tensión alterna V_e y la tensión rectificada V_s no coinciden exactamente debido a que el diodo necesita una pequeña polarización directa igual a V_γ para comenzar a conducir. Estas diferencias se calculan analíticamente a partir de las especificaciones técnicas del diodo y se presentan en la Ecuación [5.5], donde A_s es la amplitud de pico de la tensión rectificada a la salida del circuito V_s.

$$D_T = \frac{T}{2\pi}\sin^{-1}\left(\frac{V_\gamma}{A_e}\right);\ V_\gamma = A_e - A_s \qquad \text{Ecuación [5.5]}$$

Finalmente, también es importante tener en cuenta la potencia instantánea que ha de disipar el diodo en todo momento (tanto cuando está en conducción como cuando está cortado) ya que si dicha potencia es mayor que la que puede disipar el dispositivo, éste se quemará quedando inservible el circuito rectificador.

La potencia instantánea que ha de disipar el diodo, P_d, vendrá dada por el producto de la tensión que cae entre sus bornas (V_d) y la corriente que circula a su través (I_d). Dicha potencia deberá de ser menor que la potencia máxima que puede disipar el diodo (P_{max}) dada en sus especificaciones técnicas.

$$P_d = v_d \cdot i_d < P_{max} \qquad \text{Ecuación [5.6]}$$

5.2.3 Circuito rectificador de media onda y filtrado con condensador

Las prestaciones del circuito rectificador de media onda pueden mejorarse considerablemente mediante el filtrado de la tensión a la salida del circuito mediante un condensador. El condensador permitirá disminuir el factor de rizado y aumentar la componente continua de la señal rectificada. La configuración del circuito rectificador de media onda y filtrado con condensador que se utilizará en la práctica se representa en la Figura 5.4.

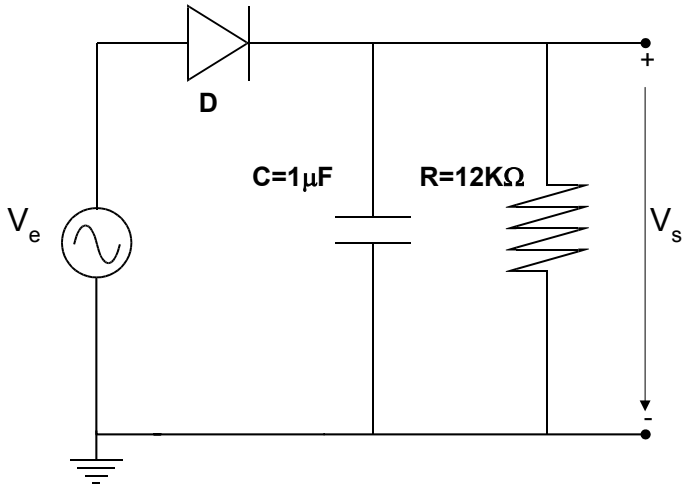


Figura 5.4. Circuito rectificador de media onda y filtrado con condensador.

La idea de utilizar un condensador para filtrar la tensión a la salida en el circuito rectificador de media onda se basa en poder cargar dicho condensador durante el semiciclo positivo de la tensión alterna de entrada y poder descargarse en la carga R_L durante el semiciclo de tensión negativa. Durante el semiciclo en el cual el diodo está cortado la tensión de salida no caerá hasta cero sino que el condensador la mantendrá hasta que llegue el siguiente semiciclo positivo.

Las formas de onda de las tensiones a la entrada y a la salida del circuito rectificador en cuestión se representan en la Figura 5.5.

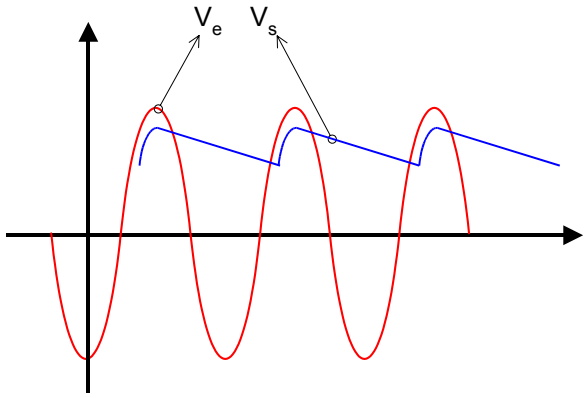


Figura 5.5. Formas de onda del circuito rectificador de media onda filtrada.

Como puede observarse en la Figura 5.5, la componente continua de la señal rectificada V_s ha aumentado, y el factor de rizado habrá disminuido gracias a que el rizado de la señal rectificada ha aumentado. En definitiva, las prestaciones (F_r y DC) del circuito rectificador de media onda con filtrado son superiores al circuito visto en el apartado anterior.

Es importante destacar como consideración de diseño que el valor de la capacidad del condensador deberá de estar acorde con la frecuencia de la tensión alterna a la entrada del circuito, F, y con la salida del circuito rectificador, R_L, ya que la constante de descarga del condensador, $\tau = C \times R_L$, deberá ser mayor que un semiperiodo de la tensión de entrada:

$$\tau = C \cdot R_L > \frac{T}{2}$$ Ecuación [5.7]

De no cumplirse esta condición, las mejoras en las prestaciones del circuito en cuanto a la componente continua de la tensión rectificada y factor de rizado, no serán tan apreciables.

5.2.4 Circuito regulador con diodo Zener

La calidad de la señal rectificada por el circuito rectificador puede mejorarse aún más utilizando un diodo Zener a la salida del circuito. Dicho diodo será encargado de regular la tensión rectificada de salida.

Como ya es conocido, en un diodo Zener polarizado en inversa la caída de tensión entre sus bornas (V_d) se mantiene prácticamente constante cualquiera que sea la intensidad (I_d) que lo atraviesa. Utilizando esta idea, es posible regular la tensión rectificada mediante un circuito rectificador de media onda y filtrado con condensador, y mejorar sus prestaciones.

La configuración de circuito regulador con diodo Zener que se utilizará en la práctica se muestra en la Figura 5.6.

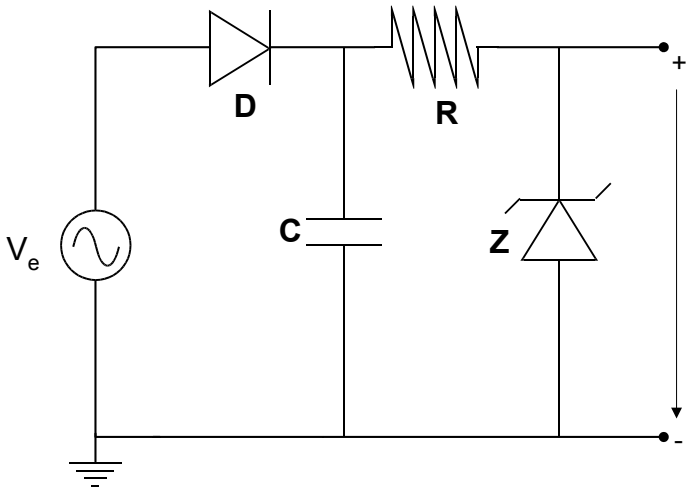


Figura 5.6. Circuito regulador de tensión con diodo Zener utilizado en el desarrollo de la práctica.(Z=BZX55-C5V1)

La calidad de la tensión regulada por diodo Zener es muy buena ya que prácticamente es una señal continua, es decir, el factor de rizado es prácticamente nulo. Sin embargo, no debe de olvidarse que el precio que se ha de pagar para conseguir esta calidad de tensión continua es un menor rendimiento del circuito en cuanto a la relación entre la potencia de señal a la entrada y la potencia de señal entregada a la carga. También es importante hacer especial hincapié en las potencias máximas que deben disipar el diodo rectificador y el diodo Zener regulador para no quemarlos e inutilizar el circuito.

5.3 Realización práctica

5.3.1 Circuito Rectificador de Media Onda

A. Identificación del circuito en la placa de circuito impreso y excitación del mismo.

Identifique en la placa de circuito impreso el circuito rectificador correspondiente a la configuración de rectificador en media onda, y cuyo esquema se ha representado en la Figura 5.2 de la práctica.

Excite el circuito con una señal de tensión senoidal de f=1KHz y 6V de amplitud.

B. Visualización de las formas de onda V_e y V_s.

Una vez que se haya excitado el circuito rectificador, visualice con el osciloscopio de forma simultanea, las formas de onda de la tensión a la entrada del circuito V_e (Canal I), y la tensión rectificada a la salida del mismo V_s (Canal II). Refleje en la memoria de la práctica esta medida, indicando para cada canal, la base de tiempos y el factor de deflexión vertical utilizados.

A partir de la discrepancia entre los semiciclos positivos de las tensiones V_e y V_s, mida el valor de la tensión umbral del diodo V_γ y verifique que dicha medida está acorde con las especificaciones que suministra el fabricante. Con este valor medido de V_γ y utilizando la Ecuación [5.5], calcule teóricamente el valor de Δt. Compare finalmente dicho valor con la medida experimental de ésta magnitud.

C. Medida de la calidad de la señal rectificada V_s.

Calcule el valor teórico de los parámetros de componente continua de la tensión rectificada y del factor de rizado de la tensión a la salida del circuito.

A continuación mida con el osciloscopio la componente continua de V_s, mida el valor pico-pico o rizado de V_s, y obtenga el factor de rizado F_r. Con estos datos rellene la siguiente tabla y refléjela en la memoria de la práctica.

	Valor teórico	Valor experimental
Componente continua de V_S		
Factor de rizado, Fr [%]		

Tabla 5-1. Resultados para el circuito rectificador de media onda

D. Medida de la potencia máxima disipada en el diodo.

Mediante la medida simultanea de la caída de tensión en el diodo V_d, y la caída de tensión a la salida del circuito V_s (proporcional a la intensidad de corriente que circula por el diodo), calcule la potencia instantánea máxima que ha de disipar el diodo.

5.3.2 Circuito Rectificador de Media Onda y filtrado con Condensador

A. Identificación del circuito en la placa de circuito impreso.

Identifique en la placa de circuito impreso el circuito rectificador correspondiente a la configuración de rectificador en media onda y filtrado con condensador, y cuyo esquema se ha representado en la Figura 5.4 de la práctica.

B. Excitación del circuito con tensión alterna de frecuencia 10KHz y 1KHz.

Excite el circuito con una señal de tensión senoidal de frecuencia 1KHz y amplitud 6V.

Una vez que se haya excitado el circuito rectificador, visualice con el osciloscopio, de forma simultanea, las formas de onda de la tensión a la entrada del circuito V_e en el Canal I, y la tensión rectificada a la salida del mismo V_s en el Canal II. Refleje en la memoria de la práctica esta medida, indicando para cada canal, la base de tiempos y el factor de deflexión vertical utilizados.

Con el osciloscopio mida la componente continua y el factor de rizado de la señal de tensión rectificada a la salida del circuito V_s. Rellene la Tabla 5-2.

Repita la medida para una señal de entrada de 10KHz

C. Discusión de resultados

Con las medidas efectuadas en los apartados anteriores intente justificar los resultados. Explique a que se debe la diferencia entre los valores obtenidos y cuando y porqué se obtienen mejores resultados.

	Valores experimental	
	f=10KHz	f=1KHz
Componente continua (DC) en V_S		
Factor de rizado (F_R)		

Tabla 5-2. Resultados para 1KHz y 10KHz

5.3.3 Circuito Regulador con diodo Zener

A. Identificación del circuito en la placa de circuito impreso.

En primer lugar, el alumno deberá identificar en la placa de circuito impreso el circuito regulador con diodo Zener que se representa en la Figura 5.6 de la práctica.

B. Excitación del circuito.

La señal de excitación del circuito se obtendrá de la red eléctrica a través de un transformador que suministra una amplitud de $28.29V_{eff}$.

¡No conectar el transformador a la red sin verificar el correcto conexionado!
El transformador suministra dos tensiones distintas:
- **entre terminal NEGRO y VERDE: $28.29V_{eff}$**
- **entre terminal NEGRO y ROJO: 56.58. NO UTILIZAR**

Calcule qué amplitud de pico de señal corresponde a los $28.29V_{eff}$. Con el osciloscopio deberá de visualizar la tensión alterna que suministra el transformador y medir sobre dicha forma de onda la frecuencia y amplitud de la señal de entrada. Refleje en la memoria de la práctica estas medidas. Una vez que ha verificado que la señal de entrada es la correcta, excite al circuito.

C. Visualización de las formas de onda V_c y V_S.

Con el osciloscopio, visualice de forma simultanea la tensión rectificada en el condensador V_c en el Canal I, y la tensión regulada por el diodo Zener a la salida del circuito (V_s) en el Canal II. Refleje en la memoria de la práctica dicha medida, indicando bases de tiempos y factores de deflexión. A continuación, mida la componente continua y el factor de rizado de cada una de estas dos señales y complete la siguiente tabla.

	Tensión rectificada en C	Tensión regulada en Z
Componente continua (DC)		
Factor de rizado (F_R)		

Tabla 5-3. Resultados para el circuito rectificador con Zener

A partir de los resultados obtenidos, discuta que mejoras y que inconvenientes presenta esta configuración de circuito regulador frente a la configuración de circuito rectificador y filtrado con condensador.

6 Introducción al programa de simulación de circuitos PSpice.

6.1 Objetivo de la práctica

El objetivo de esta práctica es que el alumno se familiarice con una potente herramienta de simulación de circuitos denominada SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*). En las prácticas se empleará una versión del programa llamada PSPICE.

A lo largo de esta práctica se simulará el comportamiento de algunos circuitos vistos en prácticas anteriores. El alumno aprenderá a generar el fichero de entrada al simulador que modela el circuito a estudiar, así como los análisis y medidas a realizar sobre él. Se visualizará el resultado de la simulación mediante la herramienta correspondiente.

Por último se aconseja a los alumnos que comparen los resultados del análisis simulado con el análisis experimental realizado en el laboratorio.

Al realizar la memoria de la práctica se deberá entregar el listado de todos los ficheros creados, así como todos los datos numéricos y gráficas solicitados.

6.2 Introducción teórica.

La reducción del tamaño de los circuitos integrados han permitido desde los años 70 hacer cada vez más intensiva la capacidad de integración de componentes dentro de un mismo circuito o circuito integrado. Desde los 2 o 3 transistores BJT que se integraban en los primeros chips hasta los 20 millones de transistores MOS que llevan los actuales microprocesadores (por ejemplo el procesador Italium contiene 25 millones de transistores), la evolución de la electrónica ha ido siempre acompañada del desarrollo de las herramientas que permitan analizar el comportamiento de los circuitos sin necesidad de tener que fabricarlos.

De hecho, el coste y el tiempo de desarrollo asociados a la fabricación de prototipos resulta excesivamente elevado, por lo que una alternativa interesante es la de realizar modelos de los circuitos y llevar a cabo simulaciones en un ordenador. Este hecho es el origen del desarrollo de los programas de simulación de circuitos integrados y en particular de SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis).

SPICE es un programa de ordenador que permite simular el comportamiento de circuitos electrónicos antes de realizarlos físicamente, ofreciendo las posibilidades de crear circuitos de test y realizar todo tipo de medidas sobre ellos.

Originalmente el simulador de circuitos SPICE fue desarrollado por la Universidad de California, Berkeley, durante la mitad de la década de 1970. Posteriormente, este programa original ha sido mejorado por diferentes empresas dando lugar a una gran variedad de productos comerciales. En particular, para la simulación de las prácticas de Tecnología y Componentes Electrónicos y Fotónicos, se trabajará con la versión de evaluación de PSpice v6.0 desarrollada por MicroSim y que se encuentra disponible en la página Web de la asignatura:

http://woody.us.es/ASIGN/TCEF_1T/

6.2.1 Como trabajar con PSpice

La versión de evaluación del programa de simulación Pspice v6.0 de MicroSim corre bajo el sistema operativo DOS.

El programa de simulación consta de un núcleo principal (SIMULATOR) encargado del modelado matemático de los componentes y de los algoritmos de resolución correspondientes a la teoría de circuitos. Adicionalmente SPICE también cuenta con una serie herramientas auxiliares utilizadas para generación de estímulos y para la visualización gráfica de resultados (herramienta PROBE).

La descripción del circuito electrónico a simular, así como los análisis y medidas a realizar sobre el circuito se especifican en un fichero de texto de entrada que deberá tener extensión *.CIR*.

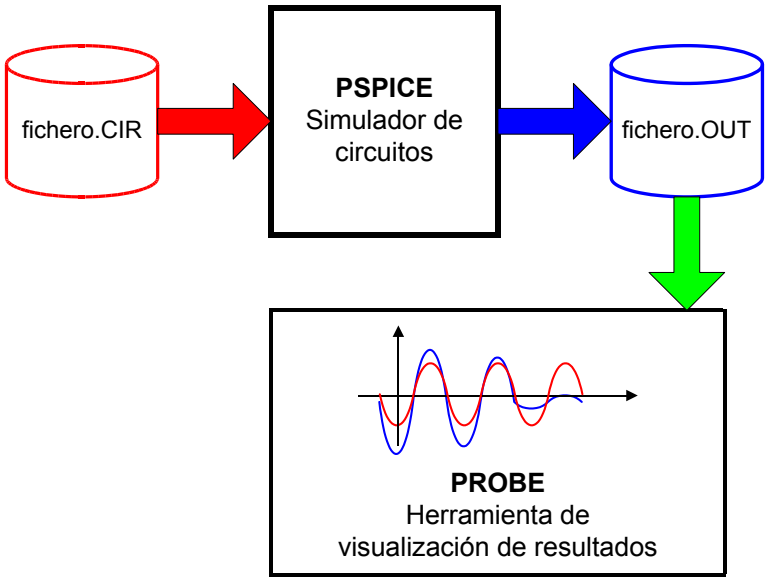


Figura 6.1. Flujo de datos en el programa de simulación PSpice.

Una vez que se ha generado el fichero de entrada se lanzará la simulación del circuito que generará dos ficheros de salida de resultados:

- El fichero de texto ".OUT" donde se recogen los principales resultados de la simulación,
- y el fichero de datos binario ".DAT" formado por los resultados numéricos que arrojan los diferentes análisis realizados sobre el circuito. Este fichero ".DAT" será utilizado por la herramienta PROBE del programa de simulación para la visualización gráfica de resultados.

En la Figura 6.1 se muestra un diagrama de bloques que representa el flujo de datos para el programa de simulación, tanto para datos de entrada (fichero.CIR) como resultados de salida (fichero.OUT y fichero.DAT).

6.2.2 El fichero de entrada "fichero.CIR"

El fichero de entrada "fichero.CIR" es el fichero de texto que contiene los datos de entrada al programa de simulación PSpice. En el dicho archivo se describen:

- Los componentes a simular
- La topología del circuito
- Los análisis y medidas a realizar sobre el circuito.
- Parámetros de simulación que utilizan los algoritmos de resolución de teoría de circuitos.

El formato general del "fichero.CIR" se muestra a continuación:

```
* TITULO DEL CIRCUITO ELECTRONICO A SIMULAR
* ==========================================

* Definicion de fuentes independientes de tension y corrientes
* ------------------------------------------------------------
  * Fuentes de tension
     V.... DC .... ; componente de para la polarización del
circuito
     + AC .... ; componente para el analisis de pequeña señal
     + SIN(......) ; componente para el analisis transitorio
  * Fuentes de corriente
     I.... DC .... ; componente de para la polarización del
circuito
     + AC .... ; componente para el analisis de pequeña señal
     + SIN(......) ; componente para el analisis transitorio

* Descripción del circuito (NETLIST)
* ----------------------------------
* Componentes pasivos
   R..... ; resistencias
   C..... ; condensadores
   L..... ; inductancias
* Componentes activos
     D..... ; diodos
     Q..... ; transistores bipolares
     M..... ; transistores MOSFET
     J..... ; transistores JFET
  * Fuentes dependientes
     E..... ; fuente de V controlada por V
     F..... ; fuente de I controlada por I
     H..... ; fuente de V controlada por I
     G..... ; fuente de I controlada por V
  * Subcircuitos
     .SUBCKT ....
       ....
     .ENDS
  * Modelos y Librerias
     .MODEL .....
     .LIB .....

* Analisis a realizar
* -------------------
.OP
.DC ..... ; analisis acorde con la definicion de fuentes
independientes
.AC ..... ; analisis acorde con la definicion de fuentes
independientes
.TRAN ..... ; analisis acorde con la definicion de fuentes
independientes

* Salida de resultados
* --------------------
.OP
.PROBE

* Opciones de simulacion
* ----------------------
.OPTIONS NOPAGE NOMOD
.WIDTH OUT=80

.END
```

A. Título del circuito

La primera línea del fichero de texto es interpretada por el programa de simulación como el título del circuito electrónico a simular, por lo que habrá que tener cuidado de no definir en esta primera línea del fichero ningún componente del circuito.

B. Fuentes independientes del circuito

A continuación se definen las fuentes independientes de tensión y de corriente de forma acorde a los análisis que se quieran realizar sobre el circuito. Si por ejemplo se quiere realizar un análisis DC deberá de definirse la fuente correspondiente con su parte DC. Si se quiere realizar sobre el circuito un análisis AC deberá de definirse la fuente correspondiente con su parte AC; e igualmente si se quiere realizar sobre el circuito un análisis transitorio para visualizar formas de onda en función del tiempo.

C. Topología del circuito

Una vez que se han definido las fuentes independientes se pasa a describir la topología del circuito comenzando por la identificación y numeración de todos los nodos del circuito.

Se reserva el nodo "0" para el nodo de tierra o referencia de tensión.

Seguidamente se insertarán todos los componentes electrónicos del circuito siguiendo la sintaxis que se adjunta en el Anexo A, y finalmente se especifican las características de los componentes utilizados mediante los modelos y librerías. Esta parte del fichero de entrada es lo que se conoce como la *NETLIST* (lista de uniones) del circuito.

D. Análisis y medidas

A continuación se especifican los análisis y medidas que se quiere realizar sobre el circuito, siendo coherentes con la definición de fuentes independientes que se hizo anteriormente.

Los análisis a realizar serán:

- Análisis .OP para el cálculo del punto de polarización del circuito;
- Análisis .DC para calcular el punto de polarización del circuito en función de una o varias variables independientes;
- Análisis .AC para el análisis de pequeña señal en función de la frecuencia;
- Análisis .TRAN para el cálculo de transitorios y visualización de formas de onda en función del tiempo.

Los resultados de estos análisis han de guardarse en dos ficheros de salida, el "fichero.OUT" y el "fichero.DAT". El fichero de salida "fichero.OUT" es generado siempre en la simulación mientras que el "fichero.DAT" se genera si se incluye en el archivo de entrada el comando PROBE.

E. Parámetros

El fichero de entrada de datos termina con una sección para establecer parámetros de simulación para los algoritmos de resolución de circuitos y para el formato de los datos de salida.

El último comando del fichero de entrada será .END que indica al programa de simulación que la entrada de datos ha terminado.

6.2.3 El fichero de salida "fichero.OUT"

El fichero de salida "fichero.OUT" es un fichero de ASCII que genera siempre el programa de simulación y que contiene los siguientes resultados:

- El punto de polarización del circuito.
- Resultados de potencia consumida por el circuito.
- Resultados estadísticos de la simulación.
- Resultados específicos que se quieran salvar en modo texto, así como un informe de errores en caso que la simulación haya sido errónea.

Este fichero es una herencia de las primeras versiones de SPICE, ya que ahora la visualización de resultados se realiza de forma más eficiente mediante la herramienta PROBE.

6.2.4 El fichero de salida ".DAT"

El fichero de salida ".DAT" es un fichero de datos binario donde se almacenan los resultados de todos los análisis que se han realizado sobre el circuito.

El fichero DAT será tomado como entrada por la herramienta PROBE que permite la visualización gráfica de resultados. Es importante hacer notar que cada análisis realizado sobre el circuito arroja una serie de datos que serán leídos por la herramienta PROBE de manera independiente, es decir, un análisis DC arroja una serie de resultados que son independientes de los resultados que puedan generar los análisis AC y TRAN. La herramienta PROBE visualiza los resultados de cada análisis de forma totalmente independiente.

Una vez que se ejecuta la herramienta de visualización de resultados podrán generarse las gráficas necesarias para describir el comportamiento del circuito y podrán realizarse las medidas oportunas.

6.3 Realización práctica.

En la realización de esta práctica el alumno deberá simular el comportamiento de los circuitos que se describen a continuación, debiendo de generar el fichero de entrada ".CIR" para obtener los resultados que se piden.

En la memoria de la práctica (que será entragada por cada grupo de prácticas) deberán incluirse los listados de los ficheros de entrada "fichero.CIR", las gráficas de resultados solicitadas y una breve explicación del funcionamiento de los circuitos.

6.3.1 Respuesta transitoria del circuito RC

El primer circuito a simular será el circuito RC de la Figura 6.2.

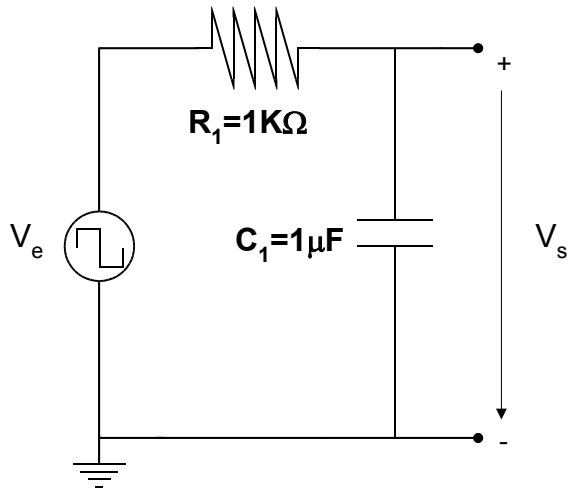


Figura 6.2. Filtro RC paso bajo

La señal de entrada V_e será una onda cuadrada con frecuencia *1KHz*, amplitud de 5V y nivel de continua de 5V.

Se pide:

- Crear el fichero *.CIR* para simular la respuesta transitoria de este circuito. Debe verse, al menos, la carga y la descarga del condensador.
- Visualizar en la misma gráfica la tensión de entrada V_e y salida V_s.
- Calcular la constante de tiempo, utilizando los cursores.
- Repetir los apartados anteriores para las frecuencias de 100Hz y 100KHz.

6.3.2 Función de transferencia del circuito RC

Se utilizará el circuito de la Figura 6.2, pero ahora la fuente V_e es una senoide de diferentes frecuencias.

				Función de Transferencia			
Entrada V_e		Salida V_s		Amplitud		Fase (ϕ)	
Frec. (Hz)	Amplitud[V]	Amplitud [V]	Desfase [rd]	|H(f)| [u. n.]	|H(f)| [dB]	Δt [seg]	$\phi_s-\phi_e$[rd]
10							
100							
1K							
5K							
10K							
100K							
1M							
10M							
100M							

Tabla 6-1. Respuesta en frecuencia del circuito paso bajo

Se pide:

- Crear el fichero *.CIR*.
- Utilizando una señal de entrada senoidal de 1KHz, representar simultáneamente V_e y V_s. Rellene el apartado correspondiente de la Tabla 6-1.
- Utilizando el mismo fichero calcular la función de transferencia con un análisis AC.
- Cambiar la parte de fichero que corresponda y terminar de completar la tabla para todas las frecuencias.

6.3.3 Filtro paso-banda

En este apartado se simulará el circuito paso-banda de la Figura 6.3.

Se pide, utilizando un sólo fichero de simulación:

- Calcular el punto de operación estático del circuito, siendo V_e una tensión constante de 5V. Encontrar el fragmento del fichero*.out* donde se da la tensión de los diferentes nodos. Explique los resultados.
- Calcular la función de transferencia entre 100Hz y 10MHz.
- Utilizando una señal senoidal de 1KHz, 5V de amplitud y 0V de continua, representar simultáneamente la entrada y la salida.

6.3.4 Característica estática de diodos

En la práctica 4 se calculaba la característica estática del diodo. En el laboratorio era necesario utilizar un circuito con dos diodos y dos resistencias debido a que el osciloscopio sólo mide tensiones con una misma referencia.

En SPICE la intensidad del diodo es uno de los parámetros de salida, y se puede representar directamente utilizando *PROBE*. Calcularemos la característica de transferencia del diodo con modelo D1N4148 incluido en la librería *eval.lib.*

Se pide:

- Circuito, con el mínimo de componentes, necesario para representar la característica estática del diodo D1N4148.
- Fichero .CIR para representar la característica V-I del diodo, cuando la tensión del diodo cambia entre –120V y 6V.
- Valor de la tensión umbral y la tensión inversa de ruptura.

- Buscar un modelo de diodo Zener incluido en la librería eval.lib y repetir los apartados anteriores para el diodo Zener.

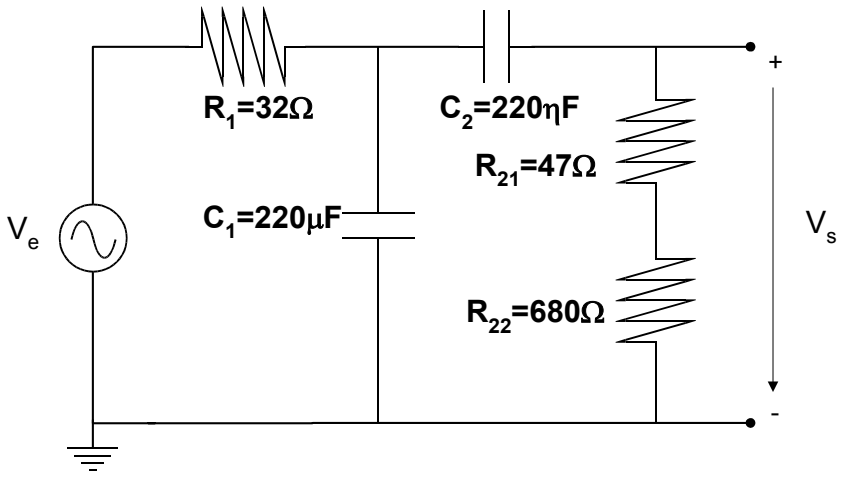


Figura 6.3. Filtro Paso de Banda

6.3.5 Característica estática de transistores BJT

El análisis .DC se puede utilizar para representar la característica estática de cualquier dispositivo. Sabiendo que el análisis DC se puede realizar especificando dos fuentes diferentes (ver manual), se pide:

- Circuito, con el mínimo de componentes, necesario para representar la característica estática de un transistor NPN.
- Utilizando uno de los transistores NPN Q2N2222 incluidos en la librería *eval.lib*, representar la curva I_C en función de V_{CE} (entre 0V y 6V) para diferentes valores de la intensidad de base (entre 0 y 1mA). Todo en la misma gráfica.

6.4 Bibliografía recomendada

[Chávez – 94] Jorge Chávez; *Manual de HSPICE Rev 1.0*

Disponible en: http://woody.us.es/~chavez/pub_academ.html

[Tuinenga – 95] Paul W. Tuinenga; *SPICE: A Guide to Circuit Simulation and Analysis Using Pspice*, Second Edition

Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1995

A. Breve descripción de comando SPICE

SPICE FORMAT ©Chávez'92

1 FICHERO DE ENTRADA

Título de la Simulación
Netlist : listado de conexiones
Análisis a realizar
Valores a imprimir
.END

`* XXXXXXXXXXXXXXX` significa línea comentario
`+ XXXXXXXXXXXXXXX` continuación de línea

Nombres de Elementos
Un nombre debe empezar por la letra que caracteriza el elemento y a continuación una cadena que lo diferencie de otro.

Valores Numéricos

num_value | expon_lit | comentario

Exponentes literales

k=10^3	meg=10^6	g=10^9	t=10^{12}	
m=10^{-3}	u=10^{-6}	n=10^{-9}	p=10^{-12}	f=10^{-15}
mil=25.610^{-6}				

2 ELEMENTOS

RESISTENCIA	`RXXXXX n+ n- value`
CAPACIDAD	`CXXXXX n+ n- value` **[IC=value]**
INDUCTANCIA	`LXXXXX n+ n- value` **[IC=value]**
DIODO	`DXXXXX na nc modelo`
Trans. BIPOLAR	`QXXXXX nc nb ne modelo`
Trans. MOS	`MXXXXX nd ng ns nb modelo`
GaAsFET	`BXXXXX nd ng ns modelo`
JFET	`JXXXXX nd ng ns modelo`
F.I. Intensidad	`IXXXXX n+ n-` [**DC** `value`] [**AC** `mag phase`] `[transient especif.]`
F.I. Tensión	`VXXXXX n+ n-` [**DC** `value`] [**AC** `mag phase`] `[transient especif.]`
F.D. Tensión control V	`EXXXXX n+ n- nc+ nc- gain`
F.D. Intensidad control I	`FXXXXX n+ n- nc+ nc- gain`
F.D. Tensión control I	`HXXXXX n+ n- nc+ nc- transr`
F.D. Intensidad control V	`GXXXXX n+ n- nc+ nc- transc`
Bobinas Acopladas	`KXXXXX Lxxx Lyyy coupl. value`
Línea de Transmisión	`TXXXXX na+ na- nb+ nb-` **Z0=**`value`
Interruptor V-control	`SXXXXX ns+ ns- nc+ nc-`
Subcircuit call	`XXXXXX n1 n2 . . . s_name`

3 SEÑALES

Pulso	**PULSE (** V_{min} V_{max} T_{delay} T_{raise} T_{fall} PW T_{total} **)**
Senoide	**SIN (** V_{offset} V_{ampl} $Freq$ T_{delay} $Theta$ **)**
Exponencial	**EXP (** V_{ini} V_{pulsed} T_{rise} τ_{rise} T_{fall} τ_{fall} **)**
Piece-Wise Linear	**PWL (** T_1 V_1 T_2 V_2 . . . **)**
Single Frequency FM	**SFFM (** V_{offset} V_{ampl} $Freq_{carrier}$ Mod_{index} $Freq_{signal}$ **)**

4 ANALISIS

punto de trabajo del circuito
.OP
análisis DC al variar la fuente
.DC `src_name vstart vstop vinc`
analisis del comportamiento en frecuencia
.AC [**DEC/OCT/LIN**] `n_points f_start f_stop`
transient analysis
.TRAN `tstep tstop [tstart [tmax]]`[**UIC**]
función de transferencia
.TF `out_var in_src`
noise analysis
.NOISE `V(out [,ref]) src_name` [**DEC/OCT/LIN**] `n_points f_start f_stop`
Fourier Analysis
.FOUR `freq out_var1 out_var2 . . .`
Monte Carlo Analysis
.MC `nruns` [**DC/AC/TRAN**] `out_var` **YMAX**

5 VARIOS

inclusión de archivo	**.INC** `file`
inclusión de librería	**.LIB** `file`
definición de subcircuito	**.SUBCKT** `sub_name n1 n2 ..`
	.....
	.ENDS
condiciones iniciales	**.IC** node1 = value1 ...
definición de modelo	**.MODEL** `name type ( param1=val1 ...)`

6 OUTPUT

.PRINT [**DC/AC/NOISE/TRAN**] `var1 var2 ...`
.PROBE[1] Almacena todos los valores de la simulación

Variables

V(n1 **)**	tensión `n1`
V(n1 , n2 **)**[1]	caida `n1-n2`
I(source **)**	intensidad fuente
VDB(n1 **)**	módulo tensión en dB
VP(n1 **)**	fase tensión

[1] exclusivo **PSPICE**

7 Polarización del transistor bipolar (BJT)

7.1 Objetivo de la práctica

El objetivo de la práctica es que el alumno analice y monte el circuito de polarización de un transistor bipolar y poder calcular así su punto de trabajo. En particular, en el desarrollo de la práctica se trabajará con la configuración en emisor común del transistor bipolar identificando las diferentes regiones de funcionamiento en función de una variable independiente.

7.2 Introducción teórica.

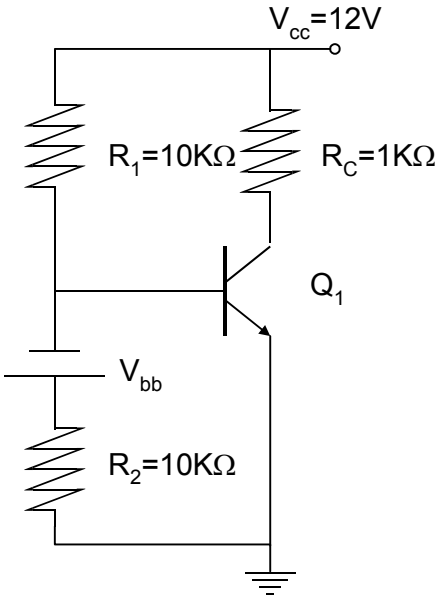


Figura 7.1. Polarización del BJT.

En la Figura 7.1 se representa el circuito de polarización de un transistor bipolar en configuración de emisor común sin resistencia de emisor. El circuito está alimentado a 12V y dispone de una fuente de alimentación variable "V_{bb}" entre emisor y base para poder ajustar el punto de polarización del circuito.

En la realización de la práctica se calculará el punto de polarización del circuito y por tanto, del transistor bipolar. Para ello se variará el valor de la fuente de tensión V_{bb} entre 0 y 12V y se medirán las caídas de tensión colector-emisor, V_{CE}, tensión base-emisor, V_{BE}, y a partir de ellas se calcularán las corrientes de colector, I_C, y de base, I_B. Con estos valores se identificarán las distintas regiones de funcionamiento del transistor bipolar (corte, activa y saturación) y se calcularán sus parámetros característicos V_{BE} y β.

7.3 Realización práctica

7.3.1 Análisis teórico del circuito de polarización del BJT

Analice el circuito circuito de polarización mostrado en la Figura 7.1 empleando el modelo analítico del transistor BJT y la teoría de circuitos. Suponga que la fuente independiente de tensión V_{bb} varía el intervalo [0, 12V]. Considérese la β=100.

Deberá identificar para qué intervalo de valores de V_{bb} el transistor se encuentra en zona de corte, zona activa y zona de saturación.

En la memoria de la práctica deberá incluirse el análisis teórico del circuito, justificando los intervalos de valores de V_{bb} para los cuales el transistor se encuentra en sus diferentes regiones de funcionamiento.

7.3.2 Caracterización experimental del circuito de polarización del BJT

Utilizando la placa de circuito impreso que se ha proporcionado con el material de laboratorio, monte el circuito de la Figura 7.1. Alimente con una fuente de tensión fija independiente de 12V y una fuente de alimentación independiente variable V_{bb}. Variando el valor de la fuente de alimentación V_{bb} entre 0 y 12V rellene la tabla midiendo los valores de V_{CE} y V_{BE}, bien con el voltímetro o bien con el osciloscopio.

A partir de estos valores y utilizando la teoría de circuitos, calcule las corrientes de colector y de base, para cada uno de los valores de V_{bb}.

En la memoria de la práctica deberá reflejarse la Tabla 7-1 con los datos de medida de voltaje que se han realizado y los datos de corrientes que se han calculado a partir de ellos. A partir de estos resultados represente gráficamente las siguientes funciones:

- Gráfica 1: $V_{ce}=f(V_{bb})$: Evolución de la tensión de colector – emisor frente a la tensión V_{bb}.
- Gráfica 2: $V_{be}=f(V_{bb})$: Evolución de la tensión base-emisor en función de V_{bb}
- Gráfica 3: $I_c=f(I_b)$: Corriente de colector en función de la corriente de base

A la vista de los resultados de las gráficas, identifique sobre ellas los intervalos para los cuales el transistor BJT se encuentra en sus diferentes regiones de funcionamiento (zona de corte, zona activa y zona de saturación).

Finalmente, calcule los valores de V_{BE} y de β del transistor cuando se éste se encuentra funcionando en zona activa.

7.3.3 Caracterización mediante simulación SPICE del circuito de polarización del BJT

Una vez realizada la caracterización experimental del circuito de polarización del transistor BJT, verifique los resultados mediante simulación con el programa PSpice. Para ello, escriba el fichero de entrada ".CIR" donde se describe la topología y componentes del circuito de la Figura 7.1, y realice un análisis DC en función de los valores de voltaje de la fuente independiente V_{bb}.

Con la herramienta de visualización de resultados PROBE genere las gráficas análogas a las gráficas 1, 2, y 3 de la caracterización experimental del circuito, identificando las diferentes regiones de funcionamiento del transistor.

Compare los resultados experimentales con los resultados de simulación y discuta la bondad de los mismos. A partir de los resultados de simulación, calcule de igual forma los valores de V_{BE} y β del transistor cuando este trabaja en zona activa.

En la memoria de la práctica deberán incluirse el listado del fichero ".CIR", así como las gráficas de simulación análogas a las gráficas 1, 2, y 3 de la parte experimental.

V_{bb} [V]	Medida de los valores		Cálculo de los valores	
	V_{CE} [V]	V_{BE} [V]	I_C [mA]	I_B [mA]
0				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
9.2				
9.4				
9.6				
9.8				

V_{bb} [V]	Medida de los valores		Cálculo de los valores	
	V_{CE} [V]	V_{BE} [V]	I_C [mA]	I_B [mA]
9				
9.2				
9.4				
9.6				
9.8				
10				
10.2				
10.4				
10.6				
10.8				
11				
11.5				
12				

Tabla 7-1. Caracterización experimental del circuito de polarización del BJT

B. Características del transistor Q2N2222

NPN switching transistors 2N2222; 2N2222A

FEATURES

- High current (max. 800 mA)
- Low voltage (max. 40 V).

APPLICATIONS

- Linear amplification and switching.

DESCRIPTION

NPN switching transistor in a TO-18 metal package.
PNP complement: 2N2907A.

PINNING

PIN	DESCRIPTION
1	emitter
2	base
3	collector, connected to case

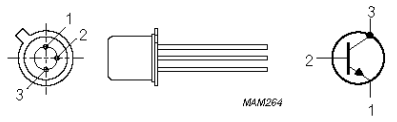


Fig.1 Simplified outline (TO-18) and symbol.

QUICK REFERENCE DATA

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_{CBO}	collector-base voltage	open emitter			
	2N2222		–	60	V
	2N2222A		–	75	V
V_{CEO}	collector-emitter voltage	open base			
	2N2222		–	30	V
	2N2222A		–	40	V
I_C	collector current (DC)		–	800	mA
P_{tot}	total power dissipation	$T_{amb} \leq 25$ °C	–	500	mW
h_{FE}	DC current gain	$I_C = 10$ mA; $V_{CE} = 10$ V	75	–	
f_T	transition frequency	$I_C = 20$ mA; $V_{CE} = 20$ V; f = 100 MHz			
	2N2222		250	–	MHz
	2N2222A		300	–	MHz
t_{off}	turn-off time	$I_{Con} = 150$ mA; $I_{Bon} = 15$ mA; $I_{Boff} = -15$ mA	–	250	ns

LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_{CBO}	collector-base voltage	open emitter			
	2N2222		–	60	V
	2N2222A		–	75	V
V_{CEO}	collector-emitter voltage	open base			
	2N2222		–	30	V
	2N2222A		–	40	V
V_{EBO}	emitter-base voltage	open collector			
	2N2222		–	5	V
	2N2222A		–	6	V
I_C	collector current (DC)		–	800	mA
I_{CM}	peak collector current		–	800	mA
I_{BM}	peak base current		–	200	mA
P_{tot}	total power dissipation	$T_{amb} \leq 25$ °C	–	500	mW
		$T_{case} \leq 25$ °C	–	1.2	W
T_{stg}	storage temperature		–65	+150	°C
T_j	junction temperature		–	200	°C
T_{amb}	operating ambient temperature		–65	+150	°C

THERMAL CHARACTERISTICS

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	VALUE	UNIT
$R_{th\ j\text{-}a}$	thermal resistance from junction to ambient	in free air	350	K/W
$R_{th\ j\text{-}c}$	thermal resistance from junction to case		146	K/W

8 BJT como amplificador en configuración de emisor común

8.1 Objetivo de la práctica.

En esta práctica se integrará el transistor BJT en un circuito cuya aplicación será la de amplificador. Para ello se utilizará una configuración en emisor común.

Se estudiarán los conceptos de punto de polarización, circuito de pequeña señal y amplificación. Finalmente el alumno deberá de analizar la dependencia del funcionamiento del amplificador con el punto de polarización del circuito.

8.2 Introducción teórica.

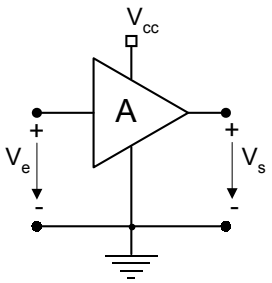


Figura 8.1. Amplificador

Un *Amplificador* es un circuito electrónico que proporciona un aumento de la amplitud de entrada (V_e) a su salida (V_s). La potencia extra inyectada a la salida del amplificador es proporcionada por una fuente de alimentación (V_{cc}). El esquema de un amplificador se muestra en la Figura 8.1.

La función del circuito amplificador será obtener una señal de salida, $V_s(t)$, réplica exacta de la señal de entrada $V_e(t)$, pero con una magnitud mayor. La relación entre la amplitud de la señal de salida y la señal de entrada se denomina *Ganancia* en tensión del amplificador (G ó Av).

Los circuitos amplificadores son muy empleados en sistemas de telecomunicación tales como receptores de radio y TV, telefonía móvil, etc.

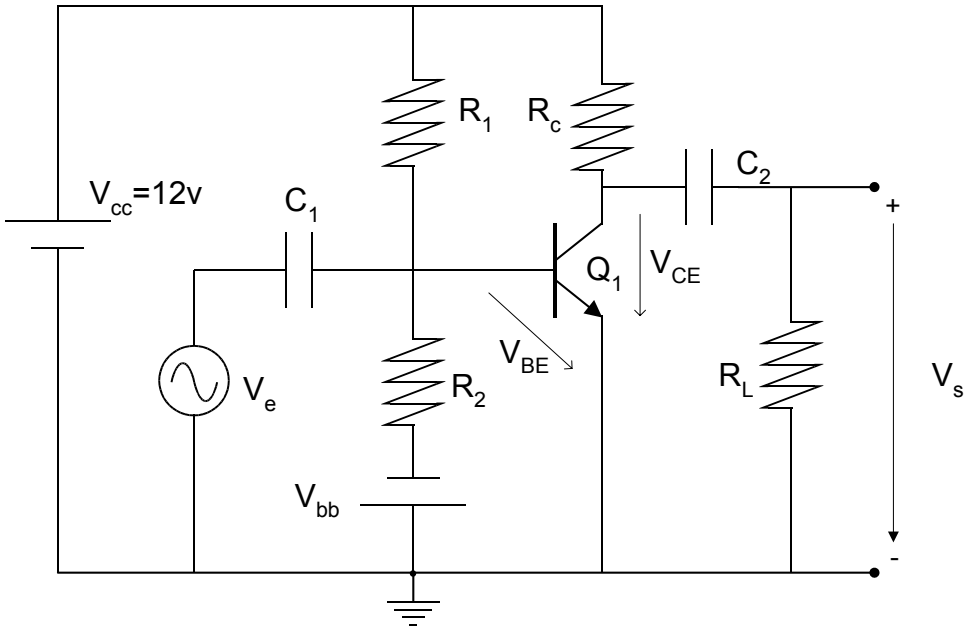


Figura 8.2. Circuito amplificador con transistor bipolar en configuración de emisor común.

8.2.1 Cálculo del punto de polarización del circuito

Para conseguir realizar un amplificador con un transistor BJT se deberá polarizar al BJT para que este opere en su región activa de funcionamiento.

En el circuito de la Figura 8.2, los condensadores C_1 y C_2 desacoplan la pequeña señal a amplificar (V_e) como señal de entrada y $V_s(t)$ como señal de salida del circuito.

Las relaciones que modelan el punto de operación o punto de polarización del circuito serán:

$$I_C = \frac{V_{cc} - V_{CE}}{R_C}$$ Ecuación [8.1]

$$I_B = \frac{I_C}{\beta}$$ Ecuación [8.2]

$$I_B = I_1 - I_2 = \frac{V_{cc} - V_{BE}}{R_1} - \frac{V_{BE} + V_{bb}}{R_2}$$ Ecuación [8.3]

donde I_C e I_B representan las corrientes de colector y base, β representa la ganancia en corriente del transistor, e I_1 e I_2 las corrientes que atraviesan las resistencias R_1 y R_2, respectivamente.

8.2.2 Cálculo de la ganancia en tensión del amplificador

Para el cálculo de la ganancia en tensión del amplificador se habrá de analizar el circuito de pequeña señal del circuito utilizando para el transistor su circuito equivalente simplificado. El circuito de pequeña señal correspondiente al circuito amplificador en estudio se representa en la Figura 8.3.

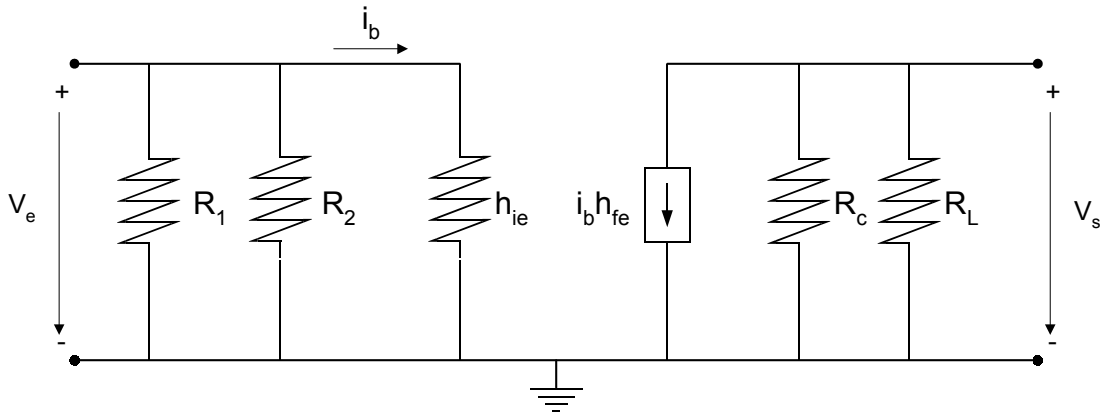


Figura 8.3. Circuito de pequeña señal del amplificador con BJT en configuración de emisor común.

La Ganancia en Tensión del circuito se define en la Ecuación [8.4], y en general es una función que depende de la frecuencia de la señal de entrada. En el análisis teórico del circuito de pequeña señal no se tendrá en cuenta la dependencia de la ganancia en tensión con la frecuencia, y por tanto, las relaciones que modelan el comportamiento del circuito serán:

$$A_v = \frac{V_s}{V_e}$$ Ecuación [8.4]

$$v_s = -h_{fe} i_b \left(R_C \| R_L\right)$$ Ecuación [8.5]

$$i_b = \frac{v_e}{h_{ie}}$$ Ecuación [8.6]

$$A_v = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}}\left(R_C \| R_L\right)$$ Ecuación [8.7]

Siendo h_{ie} y h_{fe} los correspondientes parámetros h del transistor. El signo menos que aparece en la expresión de la ganancia refleja que la señal de salida está invertida con respecto a la señal de entrada.

La Ganancia en Tensión del amplificador podrá expresarse en unidades naturales [u.n.] o decibelios [dB], siendo esta última la forma más común.

8.3 Realización práctica

8.3.1 Análisis teórico del circuito amplificador con BJT

Considérese el circuito de la Figura 8.2 con los valores de los componentes que se dan a continuación:

R_1=12KΩ	Q_1: 2N2222
R_2=12KΩ	C_1=1μF
R_C=1KΩ	C_2=1μF
R_L=100KΩ	β=200

Tabla 8-1. Componentes del emisor común

A. <u>Cálculo del punto de polarización del circuito</u>

Empleando las expresiones dadas en la introducción teórica de la práctica, calcule la tensión necesaria V_{bb} para conseguir un punto de polarización del BJT en activa con tensión colector – emisor, V_{CE}, igual a 6V. Para este punto de polarización calcule la tensión en todos los nodos del circuito así como las corrientes que circulan por las distintas ramas (corriente de colector, I_C,

corriente de base, I_B, corrientes que atraviesan las resistencias R_1 y R_2, I_1 e I_2, respectivamente). En la memoria de la práctica deberán de reflejarse todos estos cálculos.

V_{cc}=	12 V	I_b=		I_1=	
V_{ce}=	6 V	I_c=		I_2=	
V_{be}=		I_e=			

Tabla 8-2. Valores obtenidos del emisor común

B. Cálculo de la ganancia en tensión del amplificador

Calcule la ganancia en tensión del amplificador de pequeña señal empleando para ello las expresiones que se dan en la introducción teórica de la práctica, y considerando unos valores de $h_{fe} \cong \beta$ y $h_{ie} \cong 1K\Omega$. Rellene la siguiente tabla:

Av [u.n.]=	
Av [dB]=	

Tabla 8-3. Ganancia del amplificador

Refleje en la memoria de la práctica los cálculos realizados y exprese la ganancia del amplificador tanto en unidades naturales como en unidades logarítmicas.

8.3.2 Caracterización experimental del circuito amplificador con BJT

A. Polarización del circuito amplificador

Utilizando la placa de circuito impreso que se ha proporcionado con el material de laboratorio monte el circuito amplificador descrito en la Figura 8.2.

Alimente el circuito con una fuente de tensión fija independiente de V_{cc}=12V y una fuente de alimentación independiente variable V_{bb}. Variando el valor de la fuente V_{bb} polarice al BJT para que trabaje en la región activa con una tensión V_{CE}=6V. Mida esta tensión continuamente utilizando el voltímetro digital. Refleje en la memoria de la práctica la tensión V_{bb} necesaria para conseguir el punto de polarización solicitado.

V_{CE}=	6V
V_{bb}=	

Tabla 8-4. Ajuste del punto de polarización

B. Ganancia en tensión de pequeña señal del circuito amplificador

Una vez que se ha polarizado el circuito correctamente se pasa a calcular la ganancia en tensión de pequeña señal del circuito amplificador.

Excite el circuito con una señal de entrada $V_e(t)$ proporcionada por el Generador de funciones, de forma senoidal, frecuencia igual a 8KHz, y amplitud necesaria para obtener a la salida una señal, $V_s(t)$, similar pero con amplitud igual a 2.5V.

Visualice en el canal I del osciloscopio la señal a la entrada del circuito y en el canal II la señal de salida. Podrá observarse como la señal de salida está invertida respecto de la señal de entrada como ya se predijo en el análisis teórico. En la memoria de la práctica deberá de representar la medida realizada con el osciloscopio, indicando la base de tiempos y el factor de deflexión utilizado para cada canal.

Con los resultados obtenidos y cambiando la frecuencia de señal de entrada rellene la Tabla 8-5.

ENTRADA		SALIDA	CARACTERÍSTICA DEL AMPLIFICADOR		
f [Hz]	A_e[V]	A_s[V]	$Av=v_e/v_i$ [u.n]	$Av=20\log(v_s/v_e)$ [dB]	Desfase: $\phi_s-\phi_e$
50		5			
100		5			
170		5			
220		5			
350		5			
600		5			
900		5			
1.2K		5			
2.1K		5			
3.2K		5			
5.1K		5			
8K		5			
12K		5			
20K		5			
32K		5			
50K		5			
80K		5			

Tabla 8-5. Resultados para la caracterización experimental de la ganancia en tensión de pequeña señal del circuito amplificador.

A partir de los resultados de la Tabla 8-5, represente gráficamente en la memoria de la práctica las siguientes funciones:

- Gráfica 1: Ganancia en tensión en unidades naturales en función de la frecuencia.
- Gráfica 2: Ganancia en tensión en unidades logarítmicas en función de la frecuencia.
- Gráfica 3: Desfase de la señal de salida respecto de la entrada en función de la frecuencia.

C. Dependencia del comportamiento del circuito amplificador con el punto de polarización

En este apartado se medirá la dependencia del circuito amplificador con el punto de polarización. Para ello se ajustará la fuente de tensión V_{bb} para que la tensión de colector-emisor sean las indicadas en la Tabla 8-6.

En todo momento se empleará la señal de excitación de 8KHz con la amplitud resultante del apartado anterior.

Visualice en el osciloscopio la señal de entrada en el canal I y la señal de salida en el canal II, y refleje dicha medida en la memoria de la práctica. A la vista de los resultados intente dar una explicación al fenómeno observado.

V_{CE}=	1V
V_{bb}=	

V_{CE}=	11V
V_{bb}=	

Tabla 8-6. Cambio de punto de polarización

8.3.3 Caracterización mediante simulación SPICE del circuito amplificador con BJT.

A. Análisis de la polarización del circuito amplificador

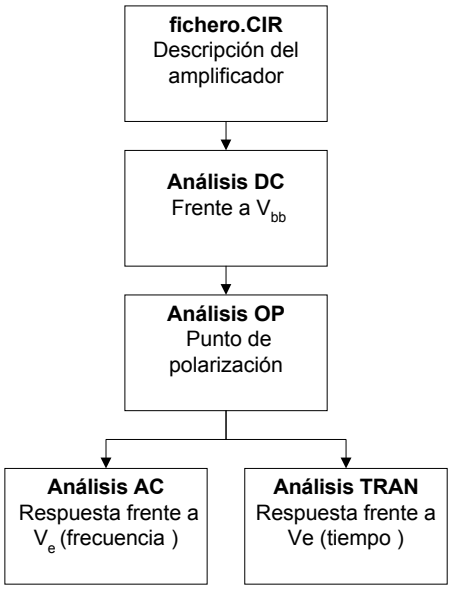


Figura 8.4. Diagrama de flujo de la simulación

Para la caracterización del circuito amplificador mediante simulación con el programa SPICE se seguirán los mismos pasos que los realizados experimentalmente en el laboratorio, resumidos en la Figura 8.4.

En primer lugar hay que escribir el fichero ".CIR" que describe la topología y componentes del circuito amplificador de la Figura 8.2, con los valores de componentes dados en la Tabla 8-1.

A continuación realice un análisis DC para calcular el valor de V_{bb} necesario para polarizar al transistor BJT con una tensión V_{CE}=6V. Con la tensión calculada V_{bb} realice un análisis OP del circuito para computar el punto de polarización del circuito.

Compare los valores de tensiones en los nodos obtenidos por simulación con los resultados obtenidos en el análisis teórico.

En la memoria de la práctica deberá incluir: el listado del fichero de entrada CIR, la gráfica resultado del análisis DC para el cálculo de la tensión V_{bb} de polarización, y el listado de la parte del fichero ".OUT" con los resultados del análisis OP.

B. Análisis de pequeña señal del circuito amplificador

Para el análisis del comportamiento del circuito funcionando como amplificador se deberá realizar un análisis AC en función de la frecuencia para poder así calcular la función de transferencia del circuito o ganancia en tensión.

De los resultados de este análisis incluya en la memoria de la práctica las representaciones gráficas correspondientes a:

- Gráfica 1: Ganancia en tensión en unidades naturales en función de la frecuencia
- Gráfica 2: Ganancia en tensión en unidades logarítmicas en función de la frecuencia
- Gráfica 3: Desfase de la señal de salida respecto de la entrada en función de la frecuencia

C. Análisis transitorio del circuito amplificador

Finalmente, para poder visualizar formas de onda se realizará un análisis transitorio del circuito. Excite el circuito con una señal senoidal de frecuencia 8KHz y amplitud necesaria para obtener a

la salida una señal similar de amplitud $5V_{pico\text{-}pico}$. Es importante hacer notar que la amplitud de la señal de entrada necesaria puede calcularse a partir de la curva de ganancia obtenida en el apartado anterior (análisis AC). A partir de los resultados del análisis transitorio represente gráficamente las señales a la entrada y a la salida e incluya dicha gráfica en la memoria de la práctica.

Realice otros dos análisis transitorios para visualizar las señales a la entrada y a la salida del amplificador pero cuando se ha polarizado el BJT con tensiones V_{CE}=11V y V_{CE}=1V. Para conseguir esto deberá de volver a ajustar los valores de la tensión V_{bb}. Compare los resultados obtenidos mediante simulación con los resultados obtenidos en la caracterización experimental.

9 BJT como amplificador en configuración de emisor común con resistencia de emisor

9.1 Objetivo de la práctica

En esta práctica el alumno volverá a utilizar el transistor bipolar (BJT) como amplificador en configuración de emisor común. La diferencia sobre la práctica anterior es que ahora el circuito presenta una resistencia en el emisor que modifica la polarización del circuito y también su ganancia.

La principal ventaja que presenta el amplificador de emisor común con resistencia de emisor es que hace al circuito amplificador mucho más estable frente a la temperatura y también hace que la dependencia de la ganancia con la el parámetro β del transistor sea mucho menor.

El objetivo de la práctica será por tanto verificar estas afirmaciones mediante un análisis teórico del circuito, una verificación experimental en el laboratorio y un análisis mediante simulación SPICE.

9.2 Introducción teórica.

En la Figura 9.1 se representa un circuito amplificador basado en un transistor bipolar (BJT) en configuración de emisor común con resistencia de emisor.

9.2.1 Cálculo del punto de polarización del circuito

Para conseguir implementar un amplificador con un transistor BJT se deberá polarizar el BJT para que este opere en su región activa de funcionamiento.

En el circuito de la Figura 9.1, el condensador C_1 desacopla la componente de continua de la señal de entrada del circuito de polarización del transistor. El circuito de polarización es similar al estudiado en teoría, y las relaciones que modelan el punto de operación o punto de polarización del circuito serán:

$$V_B = V_{cc}\frac{R_1}{R_1 + R_2}$$ Ecuación [9.1]

$$V_B \approx V_{BE} + I_C R_E$$ Ecuación [9.2]

$$V_{cc} = I_C\left(R_E + R_C\right) + V_{CE}$$ Ecuación [9.3]

donde I_C y V_{CE} representan la corriente de colector y tensión colector - emisor del transistor bipolar, respectivamente.

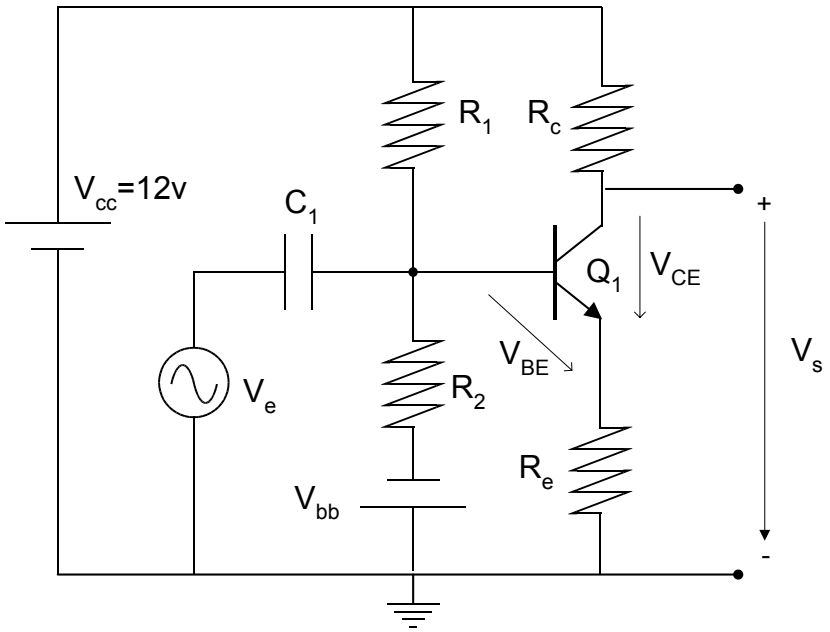


Figura 9.1. Circuito amplificador con transistor bipolar en configuración de emisor común con resistencia de emisor.

9.2.2 Cálculo de la ganancia en tensión del amplificador

Para el cálculo de la ganancia en tensión del amplificador se habrá de analizar el circuito de pequeña señal utilizando para el transistor su circuito equivalente simplificado. El circuito de pequeña señal correspondiente al amplificador en estudio se muestra en la Figura 9.2.

En el análisis teórico del circuito de pequeña señal no se tendrá en cuenta la dependencia de la ganancia en tensión con la frecuencia, y por tanto, las relaciones que modelan el comportamiento del circuito serán:

$$A_v = \frac{V_s}{V_e}$$ Ecuación [9.4]

$$V_s = -h_{fe} i_b \left(R_C\right)$$ Ecuación [9.5]

$$V_e = i_b\left[h_{ie} + \left(h_{fe} + 1\right)R_E\right]$$ Ecuación [9.6]

$$A_v = -\frac{h_{fe} R_C}{h_{ie} + \left(h_{fe} + 1\right)R_E}$$ Ecuación [9.7]

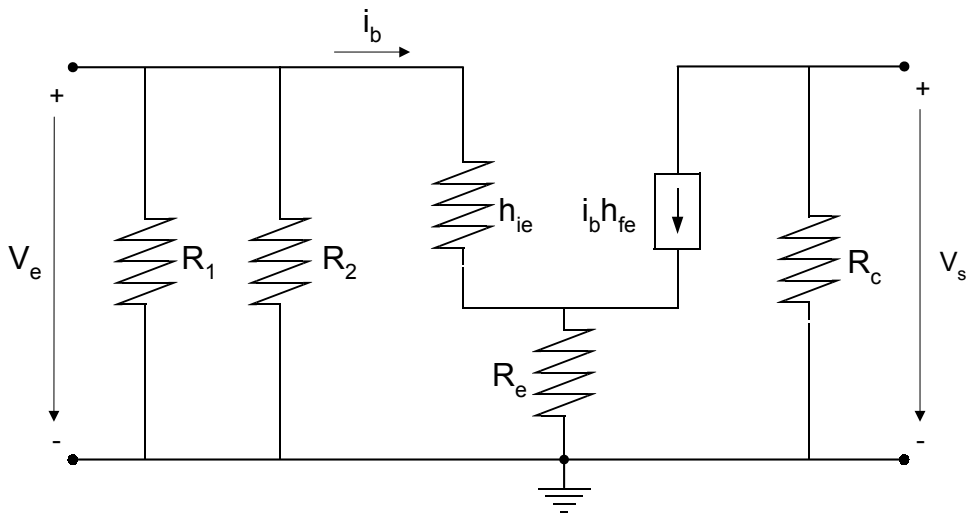


Figura 9.2. Circuito de pequeña señal del amplificador con BJT en configuración de emisor común con resistencia de emisor.

Siendo h_{ie} y h_{fe} los correspondientes parámetros h del transistor BJT. El signo menos que aparece en la expresión de la ganancia refleja que la señal de salida está invertida con respecto a la señal de entrada.

9.3 Realización práctica

9.3.1 Análisis teórico del circuito amplificador con BJT

Considérese el circuito de la Figura 9.1 con los valores de los componentes que se dan a continuación:

R_1=10KΩ	Q_1: 2N2222
R_2=1KΩ	C_1=1μF
R_C=1.8KΩ	R_E=100Ω

Tabla 9-1. Componentes del circuito amplificador.

A. Cálculo del punto de polarización del circuito

Empleando las expresiones dadas en la introducción teórica de la práctica calcule el punto de polarización del BJT (el BJT se encuentra en activa). Determine la tensión en todos los nodos del circuito así como las corrientes que circulan por las distintas ramas (corriente de colector, I_C, corriente de base, I_B, corrientes que atraviesan las resistencias R_1 y R_2, I_1 e I_2, respectivamente). Rellene la siguiente tabla:

V_{cc}	12 V	I_b		I_1	
V_{ce}	6 V	I_c		I_2	
V_{be}		I_e			

Tabla 9-2. Valores obtenidos del emisor común

B. Cálculo de la ganancia en tensión del amplificador

Calcule la ganancia en tensión del amplificador de pequeña señal empleando para ello las expresiones que se dan en la introducción teórica de la práctica, y considerando unos valores de $h_{fe} \cong \beta \cong 200$ y $h_{ie} \cong 1K\Omega$.

Av [u.n.]=	
Av [dB]=	

Tabla 9-3. Ganancia del amplificador

Refleje en la memoria de la práctica los cálculos realizados y exprese la ganancia del amplificador tanto en unidades naturales como en unidades logarítmicas.

9.3.2 Análisis experimental del circuito amplificador con BJT

A. Polarización del circuito amplificador

Utilizando la placa de circuito impreso que se ha proporcionado con el material de laboratorio, monte el circuito de la Figura 9.1 y aplique una alimentación de 12V.

Mida la tensión en la base del BJT, en el emisor, colector y base del BJT. Compare los resultados experimentales con los resultados teóricos.

B. Ganancia en tensión de pequeña señal del circuito amplificador

Una vez que se ha polarizado el circuito correctamente se pasa a calcular la ganancia en tensión de pequeña señal del circuito amplificador. Para ello, excite el circuito con una señal de entrada proporcionada por el Generador de funciones, $V_e(t)$, de forma senoidal, frecuencia igual a 8KHz, y amplitud necesaria para obtener a la salida una señal, $V_s(t)$, similar pero con amplitud igual a $5V_{pico\text{-}pico}$.

Visualice en el canal I del osciloscopio la señal a la entrada del circuito y en el canal II la señal de salida. Podrá observarse como la señal de salida está invertida respecto de la señal de entrada como ya se predijo en el análisis teórico.

En la memoria de la práctica deberá de representar la medida realizada con el osciloscopio, indicando la base de tiempos y el factor de deflexión utilizado para cada canal.

Cambiando la frecuencia de señal de entrada que proporciona el generador de funciones obtenga los resultados necesarios para completar la Tabla 9-4.

A partir de los resultados obtenidos represente gráficamente en la memoria de la práctica las siguientes funciones:

- Gráfica 1: Ganancia en tensión en unidades naturales en función de la frecuencia.
- Gráfica 2: Ganancia en tensión en unidades logarítmicas en función de la frecuencia.
- Gráfica 3: Desfase de la señal de salida respecto de la entrada en función de la frecuencia.

C. Comparación de las ganancias del circuito amplificador en configuración de emisor común con y sin resistencia de emisor.

Finalmente, compare los resultados de ganancia obtenida en esta práctica (amplificador con BJT en configuración de emisor común sin resistencia de emisor) con los resultados de ganancia de la práctica anterior (amplificador con BJT en configuración de emisor común con resistencia de emisor), y discuta los resultados.

9.3.3 Simulación SPICE del circuito amplificador con BJT

A. Análisis de la polarización del circuito amplificador

Para la caracterización del circuito amplificador mediante simulación con el programa SPICE se seguirán los mismos pasos que los realizados experimentalmente en el laboratorio. En primer lugar se escribirá el fichero ".CIR" que describe la topología y componentes del circuito. A continuación realice un análisis DC para calcular el punto de polarización del circuito. Compare

los valores de tensiones en los nodos obtenidos por simulación con los resultados obtenidos en el análisis teórico y experimental.

En la memoria de la práctica deberá incluir el listado del fichero de entrada ".CIR y el listado de la parte del fichero ".OUT" con los resultados del análisis OP.

ENTRADA		SALIDA	CARACTERÍSTICA DEL AMPLIFICADOR		
f [Hz]	A_e[V]	A_s[V]	$Av=v_s/v_e$ [u.n]	$Av=20\log(v_s/v_e)$ [dB]	Desfase: $\phi_s-\phi_e$
50		5			
100		5			
170		5			
220		5			
350		5			
600		5			
900		5			
1.2K		5			
2.1K		5			
3.2K		5			
5.1K		5			
8K		5			
12K		5			
20K		5			
32K		5			
50K		5			
80K		5			

Tabla 9-4. Resultados para la caracterización experimental de la ganancia en tensión de pequeña señal del circuito amplificador.

B. Análisis de pequeña señal del circuito amplificador

Para el análisis del comportamiento del circuito funcionando como amplificador se deberá realizar un análisis AC en función de la frecuencia para poder así calcular la función de transferencia del circuito o ganancia en tensión.

De los resultados de este análisis incluya en la memoria de la práctica las representaciones gráficas correspondientes a:

- Gráfica 1: Ganancia en tensión en unidades naturales en función de la frecuencia.
- Gráfica 2: Ganancia en tensión en unidades logarítmicas en función de la frecuencia.
- Gráfica 3: Desfase de la señal de salida respecto de la entrada en función de la frecuencia.

C. Análisis transitorio del circuito amplificador

Finalmente, para poder visualizar formas de onda se realizará un análisis transitorio del circuito. Excite el circuito con una señal senoidal de frecuencia 8KHz y amplitud necesaria para obtener a la salida una señal similar de amplitud $5V_{pico\text{-}pico}$. Es importante hacer notar que la amplitud de la señal de entrada necesaria puede calcularse a partir de la curva de ganancia obtenida en el apartado anterior (análisis AC). A partir de los resultados del análisis transitorio represente gráficamente las señales a la entrada y a la salida e incluya dicha gráfica en la memoria de la práctica.

10 Emisor – Receptor AM

10.1 Objetivo de la práctica

El objetivo de esta práctica es que el alumno utilice los dispositivos electrónicos estudiados a lo largo de la asignatura para la realización de circuitos electrónicos específicos de comunicaciones.

En el desarrollo de la práctica se trabajará con un emisor – receptor de radio basado en modulación de amplitud (AM). En particular, se utilizará el modulador AM de ley cuadrática y el demodulador AM detector de envolvente. En este sentido el alumno deberá familiarizarse con los conceptos de onda moduladora, onda portadora y onda modulada, e identificar las formas de onda asociadas a cada una de ellas.

10.2 Introducción teórica.

La propagación de señales de información a través de medios de transmisión es muy dependiente de las características específicas de dicho medio, de ahí que sea necesario adecuar las señales de información a transmitir a las características del canal de comunicaciones que será utilizado como medio de transmisión. Este proceso de adaptación de las señales de información al medio de transmisión es lo que se conoce como *Modulación* de la señal.

En el extremo contrario, en recepción, será necesario hacer la operación contraria, es decir, recuperar la señal de información a partir de la onda modulada. Este proceso se conoce como proceso de *Demodulación* de la señal.

El proceso de modulación y demodulación de la señal es necesario desde el punto de vista de poder realizar la transmisión de señales a través del canal de comunicaciones de forma eficiente. Este proceso de modulación consiste en un desplazamiento de la *Banda Base* de la señal de información hacia frecuencias más altas que resultan más adecuadas para la transmisión, y en recepción, se requiere el correspondiente desplazamiento a la banda original para la recuperación de la señal de información o mensaje.

En la Figura 10.1 se representan los bloques básicos de un sistema de comunicaciones que estará compuesto como mínimo por los siguientes componentes:

- Emisor: Dispositivo encargado de la generación de la señal de información o mensaje a transmitir.
- Modulador: Dispositivo encargado de la adaptación de la señal de información a las características especiales del Canal de Comunicaciones.

- Canal de comunicaciones o Medio de transmisión: Será el medio encargado de soportar la transmisión de la señal de información (radio, cable de pares, coaxial, guiaondas, fibra óptica, etc.).
- Demodulador: Módulo encargado de recuperar la señal de información a partir de la señal recibida a la salida del Canal de Comunicaciones.
- Receptor: Es el destinatario de la señal de información o mensaje.

En la Figura 10.1 se identifican la señal de información generada por el emisor, x(t), la onda portadora, $x_c(t)$, la onda modulada que se inyecta al canal de comunicaciones, y_{tx} (t), la onda modulada recibida a la salida del canal de comunicaciones, $y_{rx}(t)$, y la onda demodulada recibida, y(t).

El objetivo del sistema de comunicaciones es que la señal recibida y(t) sea una réplica exacta de la señal de información x(t) cuales quieran que sean las características del Canal de Comunicaciones.

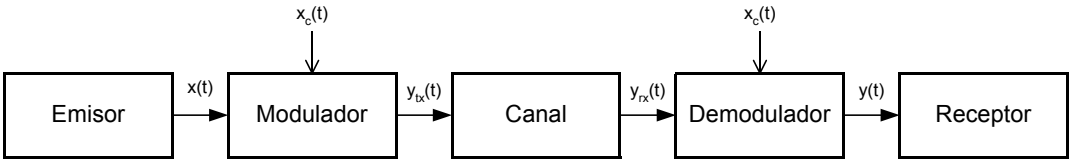


Figura 10.1. Diagrama de bloques de un Sistema de Comunicaciones genérico

Las señales sinusoidales constituyen las ondas portadoras por excelencia en los distintos tipos de modulación. Una onda portadora sinusoidal queda definida unívocamente por su amplitud, frecuencia y fase como se muestra en la siguiente ecuación:

$$x_c(t) = A_c \cdot \cos(\omega_c t + \varphi) \qquad \text{Ecuación [10.1]}$$

Donde A_c es la amplitud de la onda portadora, ω_c es la pulsación angular de la portadora que está relacionada con la frecuencia de la onda a través de la expresión $\omega_c = 2\pi f_c$, y φ es la fase de la señal portadora.

El proceso de modulación de la señal consiste en la variación de alguno de estos parámetros de la onda portadora, $x_c(t)$, en función de la señal de información x(t), dando así lugar a los diferentes tipos de modulación analógica:

- Modulación de amplitud. La amplitud de la onda portadora varía en función de la señal de información: A_c=F(x(t)).
- Modulación de frecuencia. La frecuencia de la onda portadora varía en función de la señal de información: f_c=F(x(t)).
- Modulación de fase. La fase de la onda portadora varía en función de la señal de información: φ=F(x(t)).

El resultado del proceso de modulación es la onda modulada, $y_{tx}(t)$, que es la que se inyecta en el canal de comunicaciones, transmitiéndose de forma más eficiente que la señal de información en banda base, x(t).

10.2.1 La Modulación en Amplitud AM

Considérese la onda portadora de la Ecuación [10.2], y una señal de información u onda moduladora x(t).

Se define la *Modulación de Amplitud* como el proceso por el cual se varía la amplitud de la onda portadora en función de la señal de información x(t). El resultado del proceso de modulación es la señal modulada $y_{tx}(t)$, expresada en la Ecuación [10.2].

$$x_c(t) = A_c \cdot \cos(\omega_c t) \qquad \text{Ecuación [10.2]}$$

$$y_{tx}(t) = \left[A_c + A_m x(t)\right]\cos(\omega_c t) \qquad \text{Ecuación [10.3]}$$

Donde A_m es un coeficiente relativo a la modulación.

Se considera que la señal de información está normalizada ($|x(t)|_{max} \leq 1$) y que no tiene componente continua ($\overline{x(t)} = 0$). Es importante hacer notar que para que no se produzca sobremodulación ha de cumplirse la condición:

$$A_c - \left(A_m \cdot |x(t)|_{max}\right) \geq 0 \Rightarrow A_c \geq A_m \cdot |x(t)|_{max} \qquad \text{Ecuación [10.4]}$$

La Ecuación [10.2] suele expresarse de forma más compacta como la Ecuación [10.5], siendo el parámetro *m* el *Índice o Profundidad de la Modulación*

$$y_{tx}(t) = A_c\left[1 + m \cdot x(t)\right]\cos(\omega_c t) \qquad \text{Ecuación [10.5]}$$

$$m = \frac{A_m}{A_c} \qquad \text{Ecuación [10.6]}$$

Es fácil observar como la señal de información viaja en la amplitud de la onda portadora, o dicho de otro modo, la señal de información viaja en la envolvente de la onda modulada y(t).

Ejemplo: Modulación por un tono.

Supóngase que la señal de información u onda moduladora viene dada por un tono, y por tanto $x(t) = \cos(\omega_m t)$, siendo f_m la frecuencia del tono de la señal de información. La onda portadora vendrá dada por $x_c(t) = A_c \cos(\omega_c t)$, y así puede ya calcularse la onda modulada y(t) a partir de la expresión [4], obteniéndose:

$$y_{tx}(t) = A_c\left[1 + m \cdot \cos(\omega_m t)\right]\cos(\omega_c t) = \qquad \text{Ecuación [10.7]}$$

$$= A_c \cos(\omega_c t) + \frac{A_c m}{2}\left[\cos((\omega_c + \omega_m)t) + \cos((\omega_c - \omega_m)t)\right]$$

En la Figura 10.3 se representan gráficamente las formas de onda de la señal de información, la portadora y la señal modulada.

10.2.2 Modulador de Ley Cuadrática

El principio de operación del modulador de ley cuadrática está basado en tres procesos:

- el proceso de suma de las ondas portadora, $x_c(t)$, y moduladora, x(t);
- el proceso de creación de los productos de intermodulación mediante un elemento no lineal;
- un filtrado paso banda para extraer los productos de intermodulación deseados.

En la Figura 10.2 se muestra el esquema de bloques del modulador de ley cuadrática.

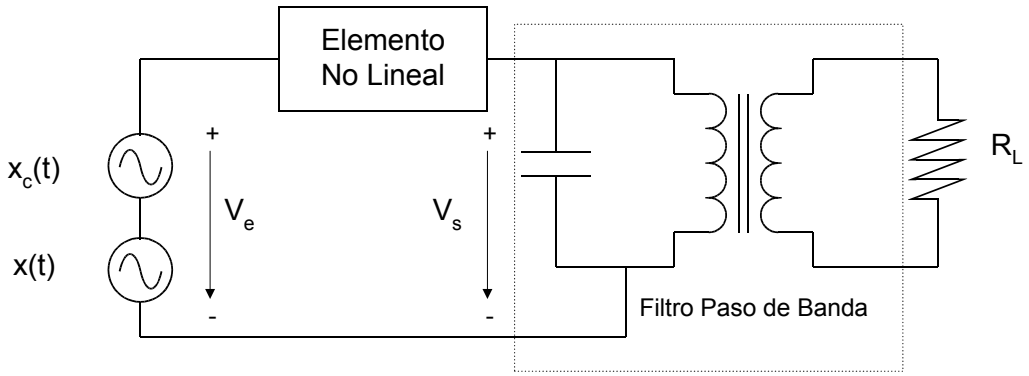


Figura 10.2. Esquema de bloques del Modulador AM de ley cuadrática.

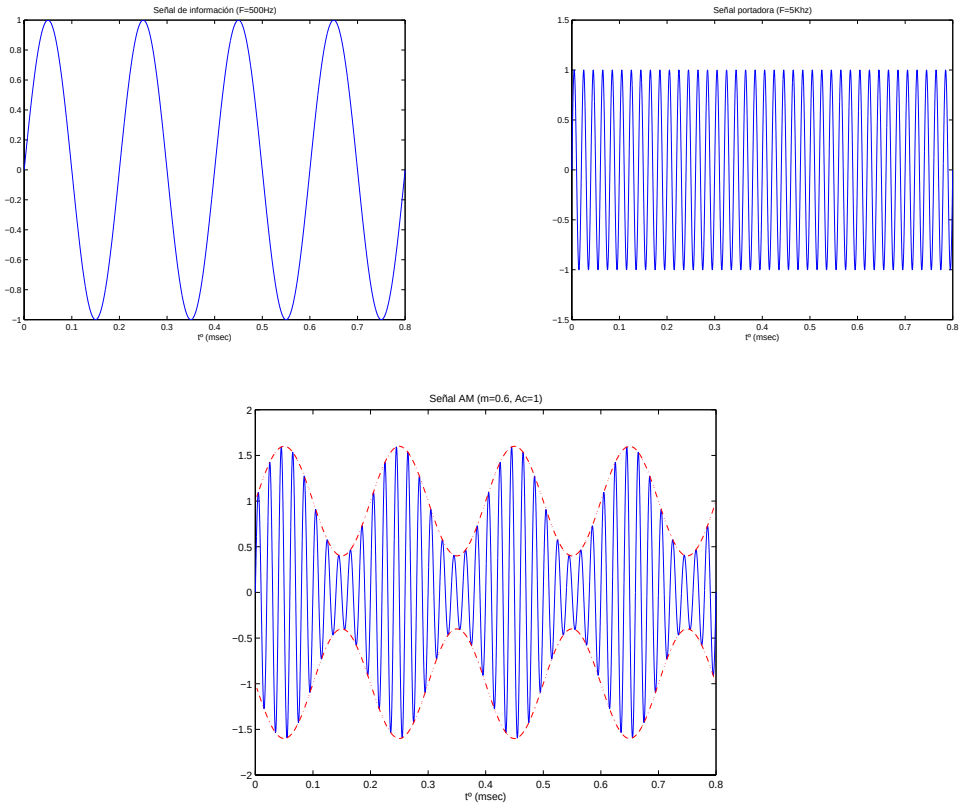


Figura 10.3. Formas de onda de las señales moduladora, portadora y modulada AM.

Los elementos no lineales más comúnmente empleados en este tipo de circuitos electrónicos son los diodos semiconductores y los transistores. El filtrado suele realizarse con filtros de sintonía simple o doble mediante circuitos tanque.

De forma general, un dispositivo no lineal de ley cuadrática presenta una característica de transferencia que puede aproximarse por:

$$v_s(t) = a_1 \cdot v_e(t) + a_2 \cdot v_e^2(t) \qquad \text{Ecuación [10.8]}$$

Donde $v_e(t)$ y $v_s(t)$ representan las señales de voltaje a la entrada y a la salida del elemento no lineal, respectivamente; y a_1 y a_2 son constantes características del elemento no lineal.

La señal de entrada al elemento no lineal $v_e(t)$ vendrá dada por la suma de las ondas moduladora x(t) y portadora $x_c(t)$:

$$v_e(t) = x(t) + A_c \cos(\omega_c t) \qquad \text{Ecuación [10.9]}$$

La respuesta del elemento no lineal a la entrada v_e se muestra en la Ecuación [10.10].

$$v_S(t) = a_1 A_c \left[1 + 2\frac{a_2}{a_1} x(t) \right] \cos(\omega_c t) + \qquad \text{Ecuación [10.10]}$$
$$+ a_1 x(t) + a_2 x^2(t) + a_2 A_c^2 \cos^2(\omega_c t)$$

El primer término de la Ecuación [10.10] corresponde a la señal modulada AM deseada con un índice de modulación $m = \frac{2a_2}{a_1}$. Los demás términos corresponden a los productos de intermodulación no deseados. El filtro paso banda a la salida del modulador es el encargado de seleccionar la señal modulada AM deseada y eliminar los productos de intermodulación no deseados, estando este filtro sintonizado a la frecuencia de la onda portadora f_c.

10.2.3 Demodulador de señales AM: El detector de envolvente

La modulación AM no es una modulación muy eficiente en cuanto a potencia se refiere ya que parte de la potencia emitida no está relacionada con la información a transmitir sino con la portadora. Sin embargo, la principal ventaja de esta modulación es la sencillez de la demodulación, es decir, la simplicidad de la detección de la señal de información a partir de la onda modulada recibida. Esta sencillez del demodulador redunda un equipos de abonado con un menor coste.

El circuito más simple de demodulador AM es el detector de envolvente (Figura 10.4), el cual logra extraer la señal de información y(t) a partir de la señal modulada recibida $y_{rx}(t)$.

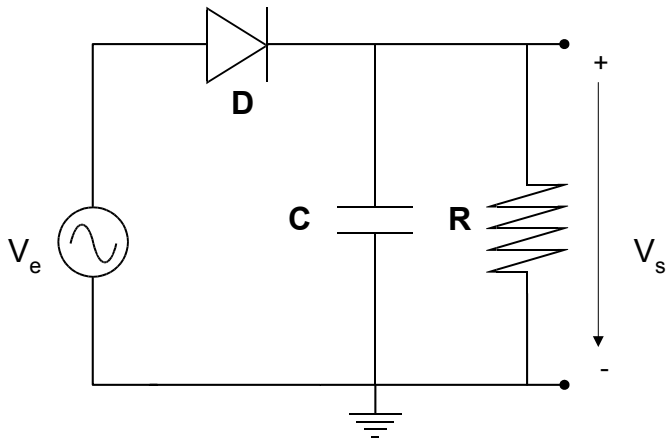


Figura 10.4. Circuito demodulador de AM basado en detección de envolvente.

El principio de funcionamiento del detector de envolvente es sencillo. Para valores de $y_{rx}(t)$ positivos el diodo se comporta como un cortocircuito y el condensador se carga hasta el valor de pico de la señal modulada. Cuando los valores de la señal $y_{rx}(t)$ se hacen negativos, el diodo se comporta como un circuito abierto y el condensador se descarga a través de la resistencia, siguiendo la envolvente de la onda. Ha de llegarse a una solución de compromiso ya que la constante de carga y descarga del condensador no puede ser ni muy alta ni muy baja. En el caso de tener una constante RC muy alta el condensador se descargará muy lentamente y por tanto dicha descarga no podrá seguir las variaciones de máxima pendiente de la envolvente de la onda modulada. En el caso contrario de constantes RC muy bajas, el condensador se descargará muy rápidamente y este hecho se traduce en un fuerte rizado en la señal de información recuperada y(t) que hace disminuir la calidad de la señal. Una buena solución de compromiso es diseñar la constante RC según:

$$f_m = \frac{1}{RC}$$ Ecuación [10.11]

donde f_m representa la frecuencia máxima que puede contener la señal de información o señal moduladora x(t).

10.3 Realización práctica

El circuito emisor – receptor de AM que se estudiará en la práctica se muestra en la Figura 10.5. El emisor consiste en un modulador AM de ley cuadrática, mientras que el receptor es un demodulador AM basado en detección de envolvente.

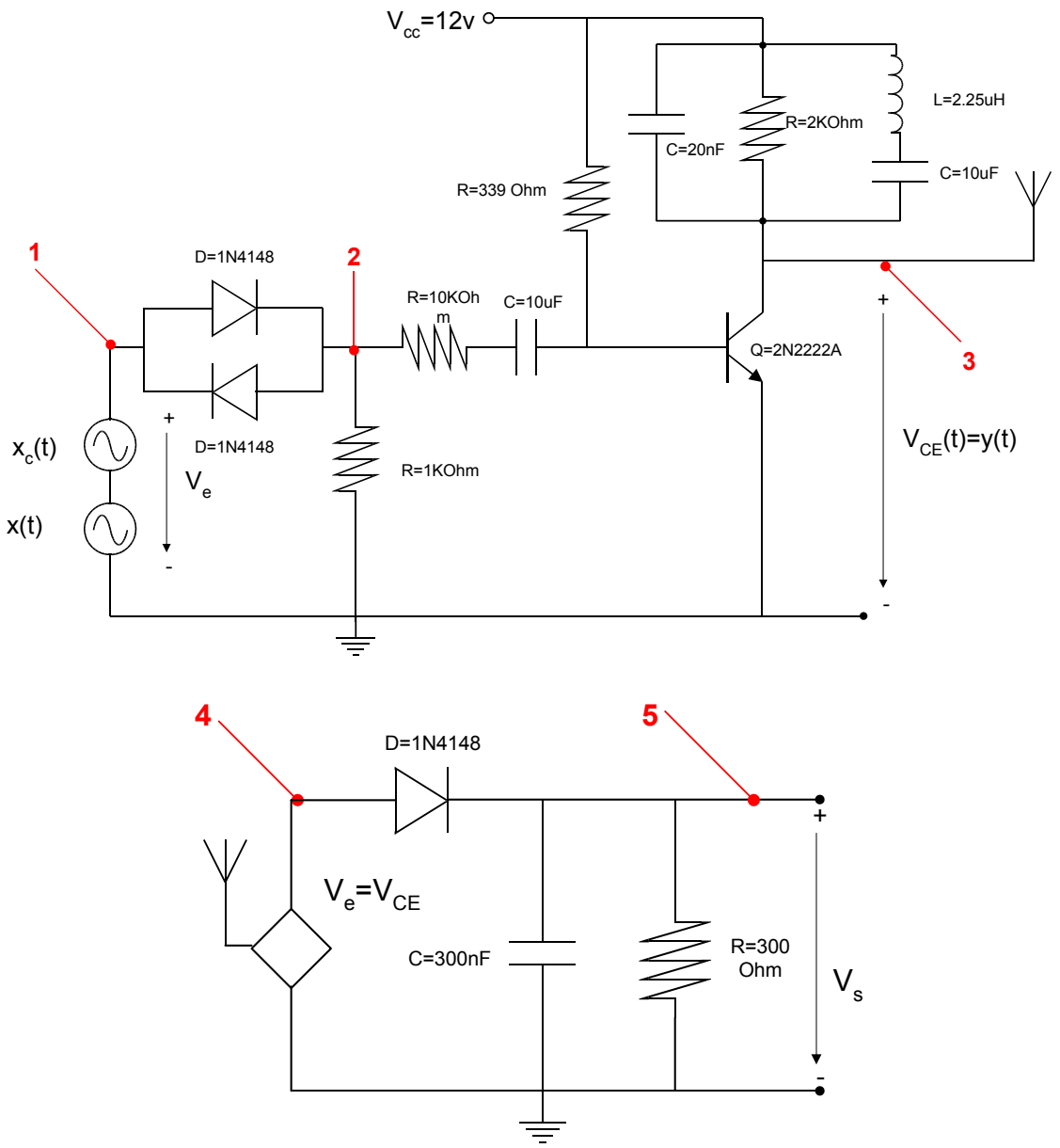


Figura 10.5. Circuito emisor y receptor.

10.3.1 Caracterización mediante simulación SPICE del circuito emisor – receptor de AM

Simular mediante SPICE el comportamiento del conjunto emisor – receptor de AM, para lo cual:

- Calcule el *punto de polarización* (.PO) del circuito y refleje en la memoria de la práctica el valor de tensión en cada uno de los nodos del circuito.
- Realice un *análisis de alterna* (.AC) al emisor de AM para obtener la función de transferencia de la señal de salida $V_{CE}(t)$ (onda modulada), con respecto a la señal de entrada x(t) (onda moduladora), y poder así observar la característica de filtrado paso – banda del modulador AM. Represente en la memoria de la práctica el módulo de la función de transferencia (tanto en unidades naturales como en dB) y la fase de la función de transferencia.
- Finalmente, realice un *análisis transitorio* (.TRAN) para las señales especificadas en la Figura 10.5. Visualice las formas de onda de las señales moduladora, portadora y modulada, que deberán ser similares a las presentadas en la Figura 10.3.

Señal moduladora	x(t)	Suma de 2 tonos: Tono 1: 5KHz Amplitud=0.6V Tono 2: 10KHz Amplitud=0.6
Señal portadora	$x_c(t)$	f=750KHz. Amplitud=1.5

Tabla 10-1. Señales de entrada al modulador AM

Represente en la memoria de la práctica las formas de onda de la señal existente en los nodos 1,2,3,4 y 5 del circuito de la figura Figura 10.5. A la vista de los resultados intente dar una explicación del funcionamiento del circuito en base a la explicación teórica de la introducción de la práctica.

10.3.2 Demostración experimental de emisión y recepción de señales radio AM[#]

Para la demostración experimental de emisión y recepción de señales radio moduladas en amplitud se utilizará el emisor AM de la placa de circuito impreso que se proporciona con el material de prácticas. El esquema circuital de este emisor AM es idéntico al que se muestra en la Figura 10.4 con la diferencia que este emisor AM permite seleccionar la onda moduladora entre dos fuentes de señal generadas bien por el Generador de Funciones o bien por un micrófono.

Como receptor de señales AM se utilizará un aparato de radio convencional.

A. Emisión y recepción de un tono simple

En primer lugar y para calibrar y sintonizar el sistema de comunicaciones radio con modulación en amplitud se emitirá y recibirá un tono simple. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Genere con un Generador de Funciones la señal portadora $x_c(t)$, que deberá ser una onda senoidal de frecuencia aproximadamente igual a 800KHz y amplitud $6V_{pico\text{-}pico}$. Inyecte esta señal en el circuito emisor debidamente alimentado a 12V, y visualice con el osciloscopio la señal que se obtiene en el colector del transistor (nodo 3 del circuito de la Figura 10.5) que se corresponde con la onda modulada y(t).
- A continuación varíe la frecuencia de la onda portadora hasta que la amplitud de la onda modulada, y(t) que visualiza en el osciloscopio, sea máxima. En este momento mida la frecuencia de esta señal con el osciloscopio y con el display del generador de funciones y anótela para reflejarla en la memoria de la práctica, ya que ésta será la frecuencia de la portadora a la que se realizará la emisión AM.
- Una vez se ha sintonizado debidamente la portadora con la característica del filtro paso banda se introduce la señal de información, o señal moduladora, que en este caso consistirá en un tono simple, es decir, una onda senoidal de frecuencia igual a 1.5KHz y amplitud $6V_{pico\text{-}pico}$. Genérela con otro Generador de Funciones y mídala con el osciloscopio para cerciorarse que es correcta. A continuación inyéctela en el circuito emisor y mida con el osciloscopio la onda modulada $y_{tx}(t)$ que se emite. Refleje esta medida en la memoria de la práctica y explique la forma de onda que se observa.

¿Qué ocurre si aumenta un poco la amplitud de la señal moduladora? Refleje en la memoria de la práctica la medida de la onda modulada en este caso y explique el porqué del fenómeno observado.

Vuelva a fijar la amplitud de la onda moduladora en $6V_{pico\text{-}pico}$ y utilice un latiguillo cualquiera como antena para la emisión de la señal de onda modulada.

Una vez que se está emitiendo la señal modulada al espectro radioeléctrico se deberá de recibir ésta mediante un demodulador AM. Para esto, se utilizará un aparato de radio convencional.

Sintonice el receptor radio en la banda AM y a la frecuencia de la portadora que se está realizando la emisión y que se midió anteriormente. Deberá escuchar en el aparato de radio el tono que se está emitiendo como señal moduladora.

[#] La emisión supone la ocupación del dominio público radio eléctrico. La realización de esta práctica tiene fines exclusivamente educacionales para lo cual se ha minimizado el alcance de la emisión. Cualquier otro uso del sistema transmisor explicado deberá cumplir la normativa vigente según los términos recogidos en la Ley 11/1998, de 24 de Abril, General de Telecomunicaciones.

¿Qué ocurre si varia un poco arriba y abajo la frecuencia de la señal moduladora? Continúe midiendo con el osciloscopio la señal modulada que se emite, refléjela en la memoria de la práctica e intente justificar los fenómenos observados.

B. Emisión y recepción de señal de voz

Para finalizar se realizará la emisión y recepción de una señal de voz. Para ello cambie de posición el "jumper" que selecciona la entrada de señal moduladora y con el circuito emisor debidamente alimentado y sintonizado.

En el aparato de radio deberá de escuchar la señal de voz que se está introduciendo por el micrófono y que está siendo emitida por el emisor AM. Intente ver que alcance máximo tiene el sistema de comunicaciones radio que se ha implementado.

11 El transistor de efecto de campo JFET como amplificador

11.1 Objetivo de la práctica

En esta práctica se pretende dar una visión general del transistor de efecto de campo de unión, estudiar sus parámetros característicos y sus zonas de funcionamiento,

Por último se empleará el FET en una configuración de amplificador para poder analizar las ventajas e inconvenientes que presentan frente a los transistores bipolares.

11.2 Introducción teórica.

Existen dos tipos de transistores de efecto de campo (FETs – *Field Effect Transistors*), utilizados en circuitos integrados analógicos: el transistor FET de unión (JFET: Junction Field Effect Transistor) y el transistor FET de Unión Metal - Óxido – Semiconductor (MOSFET: *Metal-Oxide-Semiconductor FET*).

Los circuitos electrónicos que utilizan transistores FETs son generalmente más costosos y caros que sus análogos bipolares, sin embargo presentan una serie de características que mejoran sus prestaciones y que justifican su utilización, como por ejemplo, el hecho de que presenten unas altas impedancias de entrada.

Esta práctica se centrará en la caracterización y utilización como amplificador del JFET. Un transistor JFET es un dispositivo de tres terminales: puerta (G, *Gate*), fuente (S, *Source*) y drenador (D, *Drain*).

La puerta es el electrodo de control y el voltaje aplicado a ésta modula o controla la corriente eléctrica que circula entre la fuente y el drenador. El semiconductor que une los terminales de fuente y drenador constituye lo que se conoce como canal del dispositivo, y en función de que éste sea tipo p o tipo n, dará lugar a transistores JFET de canal p o JFET de canal n, respectivamente. En la Figura 11.1 se muestra un esquema de la estructura de un transistor JFET de canal n.

11.2.1 Modelo de gran señal del transistor JFET

Considérese un transistor JFET de canal n. Las curvas características de transferencia del dispositivo pueden obtenerse fácilmente a partir de la estructura del dispositivo que se muestra en la Figura 11.2.

A. $V_{GS}=0$

En primer lugar considérese que los tres terminales del JFET están puestos a tierra. En este caso, en las dos uniones p-n de puerta-canal se crea una zona de deplexión uniforme libre de portadores, siendo el voltaje que cae en cada unión el potencial de contacto ψ_0.

Si a continuación se aplica un voltaje positivo al drenador $V_{DS}>0$, se establecerá una corriente eléctrica, I_D, que fluye desde el drenador hasta la fuente y que es proporcional a la magnitud del voltaje V_{DS} aplicado. Se dice, por tanto, que el transistor JFET está funcionando en su Zona Resistiva o Lineal.

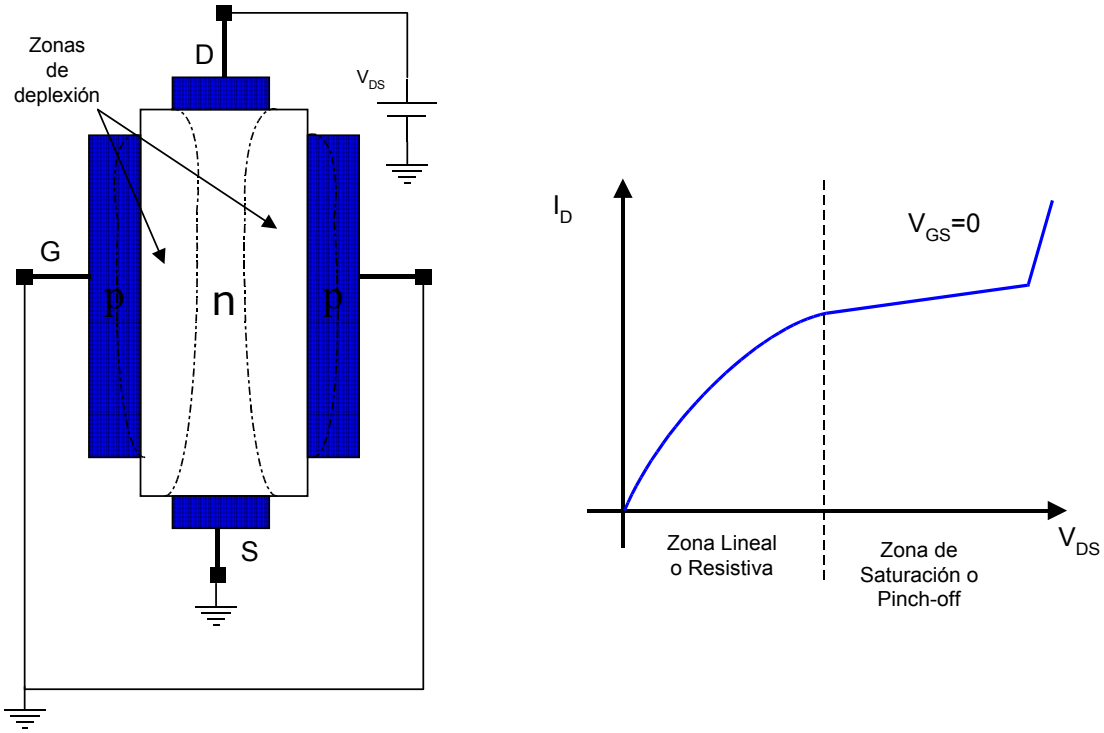


Figura 11.1. Transistor JFET de canal n: estructura del transistor JFET, curva característica de transferencia para $V_{GS}=0$.

El potencial V_{DS} aplicado produce un gradiente de voltaje a lo largo del canal del JFET que hace que las uniones puerta-canal estén polarizadas en inversa y por tanto, que las zonas de deplexión sean más anchas en el extremo del drenador que en el extremo de la fuente.

Si el voltaje V_{DS} aplicado aumenta llega un momento en que las dos zonas de deplexión en el canal se juntan, produciendo el efecto de *estrangulamiento* del canal. El voltaje necesario para estrangular el canal se conoce como voltaje de "pinch-off", V_p; y se define como el voltaje de puerta necesario para estrangular el canal. En un transistor JFET de canal n este voltaje será negativo, mientras que en un transistor de canal p será positivo.

Una vez que el canal está estrangulado, la corriente de drenador se mantiene prácticamente constante con el voltaje V_{DS} aplicado hasta que se llega al voltaje de ruptura de la unión. Esta zona de funcionamiento del JFET se denomina Zona de Saturación o Zona de *pich-off*, para distinguirla de la zona de saturación de los transistores bipolares.

B. $V_{GS}<0$

Considérese ahora el caso de aplicar un voltaje negativo a la puerta del transistor JFET para polarizar en inversa las dos uniones puerta–canal. Como puede observarse ahora en la Figura 11.2, la condición de estrangulamiento del canal se conseguirá para valores menores de V_{DS}.

Para el caso particular de $V_{DS}=0$, el canal se estrangula para un voltaje de puerta igual al voltaje de pinch-off, $V_{GS}=V_p$, y en consecuencia no circulará corriente por el canal. En este caso se dice que el transistor JFET está cortado. En los casos en que $0<V_{GS}<V_p$ la condición de estrangulamiento del canal vendrá dada por la expresión:

$$V_{GS} - V_{DS} = V_p \qquad \text{Ecuación [11.1]}$$

Para $V_{DS}<V_{GS}-V_p$, el JFET operará en su región de funcionamiento lineal o resistiva, y para $V_{DS}>V_{GS}-V_p$, el JFET operará en su región de saturación o "pinch-off". Esta será la zona de interés del transistor JFET para trabajar en aplicaciones de amplificación, estando dada la corriente de drenador por la Ecuación [11.2].

$$I_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2 \left(1 + \lambda V_{DS}\right) \qquad \text{Ecuación [11.2]}$$

I_{DSS} es el máximo valor de la corriente de drenador y que ocurre cuando $V_{GS}=0$; y λ es un parámetro similar al voltaje Early de los transistores bipolares y que describe el efecto de que la resistencia que presenta el transistor JFET en su zona de pinch-off no es infinita.

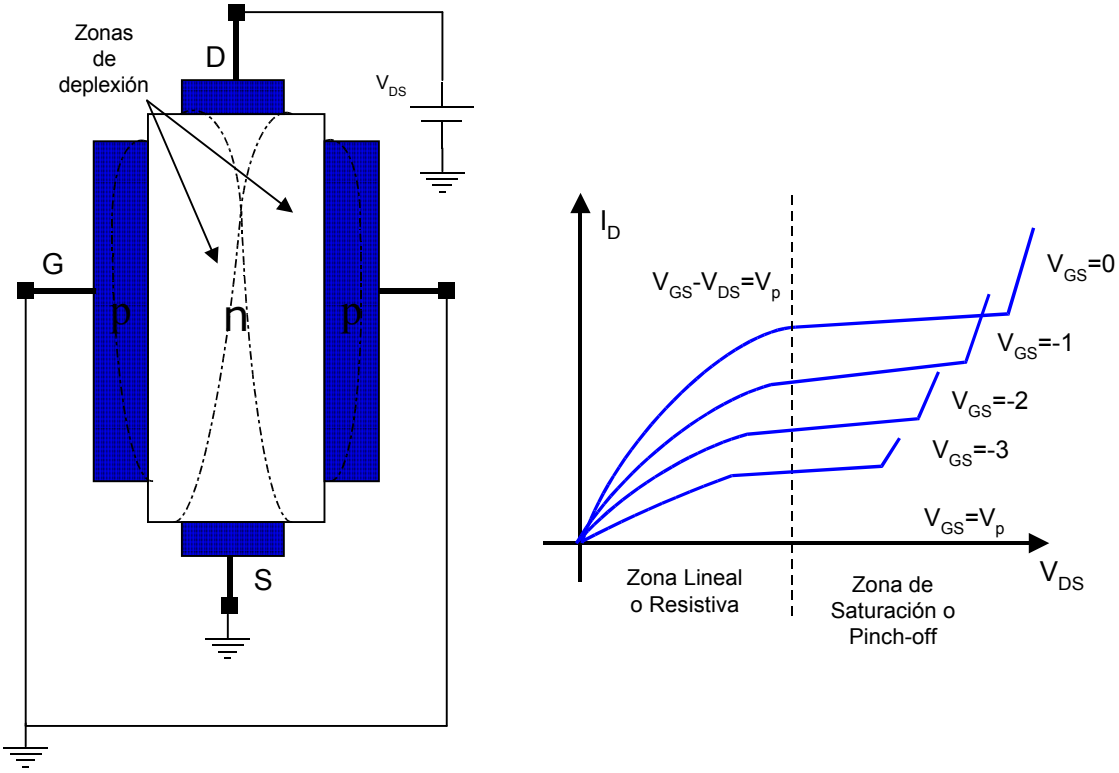


Figura 11.2. (a) Transistor JFET con el canal estrangulado, y (b) Curvas características de transferencia del JFET de canal n.

Es importante destacar que debido a que las uniones puerta–canal están polarizadas en inversa, la corriente de puerta es prácticamente nula, lo que se traduce en que el transistor JFET presenta una resistencia de entrada muy alta, característica muy importante en las aplicaciones como amplificador.

Los símbolos circuitales de los transistores JFET así como el criterio de signos para corrientes y voltajes se representan en la Figura 11.3.

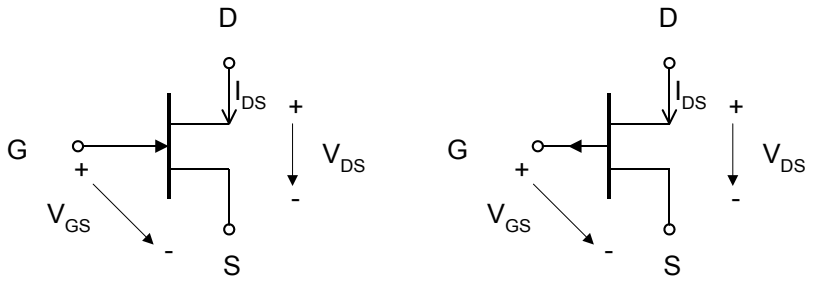


Figura 11.3. Transistor JFET: (a) de canal p y (b) de canal n.

11.2.2 Modelo de pequeña señal del transistor JFET

Un modelo de pequeña señal, análogo al estudiado para el transistor bipolar, puede obtenerse para el transistor JFET. El JFET, en aplicaciones de pequeña señal, casi siempre funciona en la zona de pinch-off o zona de saturación, por lo que el circuito equivalente que se utiliza es para esta región de funcionamiento.

En la Figura 11.4 se representa el circuito equivalente de pequeña señal simplificado del JFET en la región de funcionamiento de saturación.

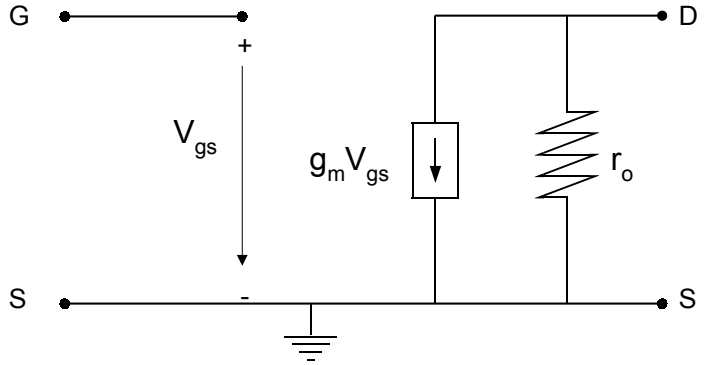


Figura 11.4. Circuito equivalente simplificado de pequeña señal del transistor JFET.

La transconductancia de pequeña señal g_m se obtiene como:

$$g_m = \frac{dI_D}{dV_{GS}} = -\frac{2I_{DSS}}{V_p}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right) \qquad \text{Ecuación [11.3]}$$

La resistencia de salida r_0 se calcula mediante la expresión:

$$\frac{1}{r_0} = \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} = \lambda I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2 \cong \lambda I_D \qquad \text{Ecuación[11.4]}$$

11.3 Realización práctica.

En el desarrollo de la práctica se va a trabajar con el transistor JFET de canal n BF245C, cuyas características se adjuntan en el Anexo de la práctica.

En primer lugar se obtendrán los parámetros característicos I_{DSS} y V_p del JFET y que determinarán su funcionamiento. A continuación se utilizará como amplificador en configuración de fuente común.

11.3.1 Caracterización experimental del JFET y su utilización como amplificador.

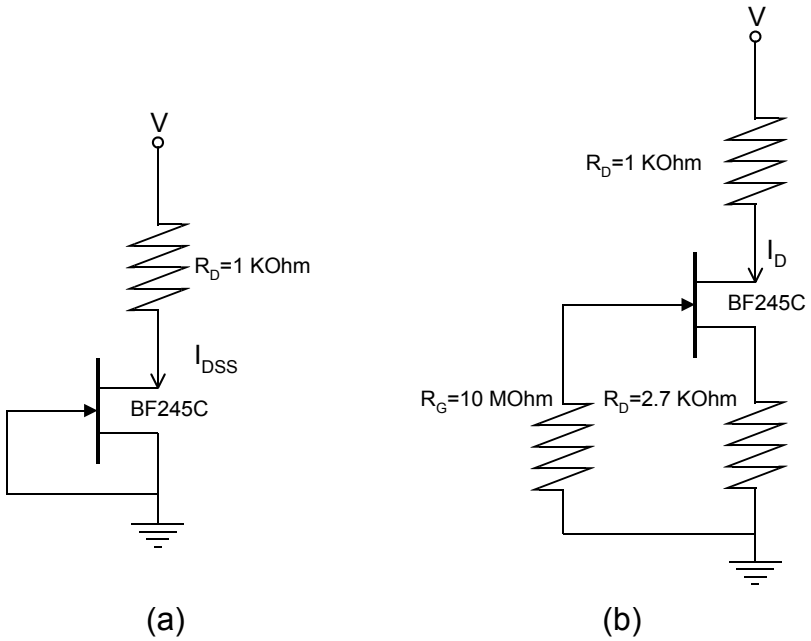


Figura 11.5. Montaje del JFET para la medida de la corriente I_{DDS} (a), y para medida del voltaje de *pinch-off* (b)

A. Medida de la corriente I_{DSS}

En la introducción teórica se ha definido la corriente I_{DSS} como la corriente que circula por el drenador cuando V_{GS}=0V.

Para medirla monte en la placa de pruebas el circuito que se muestra en la Figura 11.5a. y mida la corriente de drenador a partir de la caída de tensión en la resistencia R_D. Esta corriente medida es I_{DSS}, que es característica del JFET. Anótela y refleje el valor medido en la memoria de la práctica.

La identificación de cada pata del dispositivo se encuentra especificada en el anexo. Preste especial atención en su conexionado.

B. Obtención del voltaje de pinch-off.

Monte ahora en la placa de pruebas el circuito de la Figura 11.5b. Una vez polarizado el circuito podrá medir la corriente de drenador I_D y calcular el voltaje V_p en la Ecuación [11.2] tomando λ=0. Para este calculo deberá de hacer uso del valor de I_{DSS} obtenido en el apartado anterior.

Una vez calculado V_p, anótelo y refléjelo en la memoria de la práctica. Es importante recordar que ya que el transistor JFET BF245C es un transistor de canal n, el voltaje V_p será negativo.

Por último compare los resultados obtenidos experimentalmente de I_{DSS} y V_p con los proporcionados por el fabricante en la hoja de características del Anexo.

C. Utilización de JFET como amplificador.

Primeramente monte en la placa de pruebas el circuito de la Figura 11.6, donde se muestra el esquema de un circuito amplificador basado en JFET en configuración de fuente común. Alimente el circuito adecuadamente y excite el circuito con una señal de entrada sinusoidal de frecuencia 8KHz y 0.2V de amplitud.

Visualice con el canal I del osciloscopio la señal a la entrada del circuito y con el canal II la señal a la salida del circuito y refleje dicha medida en la memoria de la práctica.

Calcule la ganancia en tensión del circuito $A_v=v_o/v_i$ para cada una de las frecuencias de la Tabla 11-1, y represente en la memoria de la práctica la gráfica de la ganancia de tensión en función de la frecuencia. Utilice escala logarítmica en el eje de abcisas para poder representar correctamente todos los valores de frecuencias.

F [Hz]	100	220	600	1.2K	3.2K	8K	20K	50K	100K	220K	600K	1.2M	3M
Av=vo/vi													

Tabla 11-1. Ganancia en tensión del circuito amplificador en función de la frecuencia.

Repita la medida de la ganancia del circuito amplificador en función de la frecuencia pero eliminando del circuito de la Figura 11.6 el condensador C_S. Represente gráficamente esta nueva ganancia en función de la frecuencia en la memoria de la práctica y discuta los resultados obtenidos.

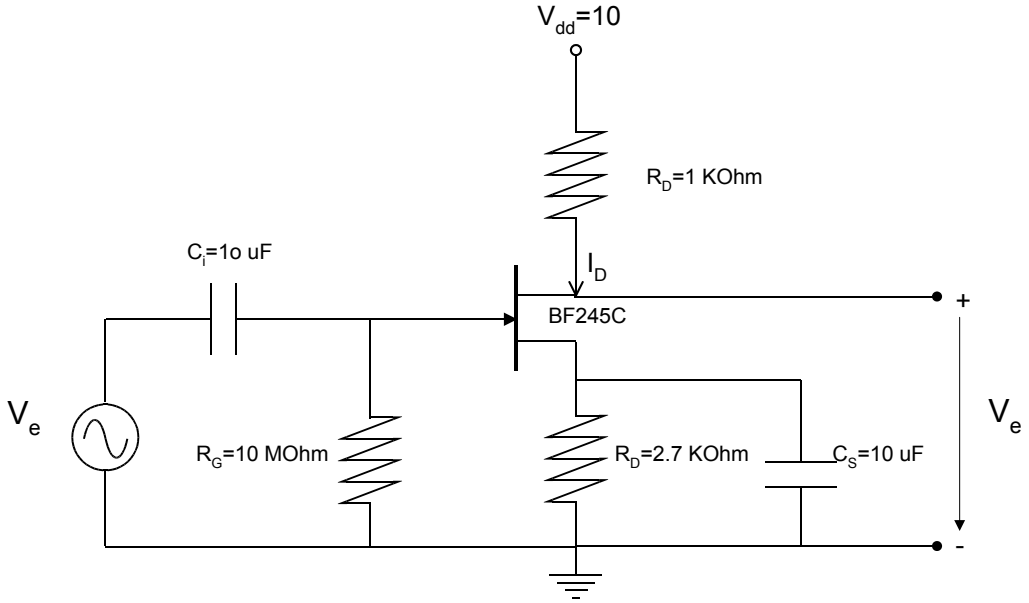


Figura 11.6. Montaje del JFET como amplificador en configuración de fuente común.

11.3.2 Caracterización teórica del circuito amplificador con JFET.

Calcule teóricamente la ganancia en tensión del circuito amplificador mostrado en la Figura 11.6, con y sin condensador C_S. Para ello considere:

- I_{DSS} y V_p del transistor JFET obtenidos anteriormente mediante caracterización experimental.
- Los datos de polarización del circuito.
- El modelo de pequeña señal del JFET ($\lambda=10^{-2}V^{-1}$).

Compare y verifique que las ganancias obtenidas en los dos casos se corresponden con las obtenidas experimentalmente en el apartado 2.1.c de la práctica.

11.3.3 Caracterización mediante simulación SPICE del circuito amplificador con JFET.

Finalmente simule mediante el programa SPICE el comportamiento del circuito amplificador con JFET de la Figura 11.6. Realice las simulaciones tanto para el circuito con el condensador C_S como para el circuito sin condensador C_S.

El modelo que deberá utilizar para el transistor BF245C será el siguiente:

```
.model BF245C  NJF(Beta=1.5m Betatce=-.5 Rd=1 Rs=1 Lambda=3.8m Vto=-3.099
+              Vtotc=-2.5m Is=33.57f Isr=322.4f N=1 Nr=2 Xti=3 Alpha=311.7
+              Vk=243.6 Cgd=3.35p M=.3622 Pb=1 Fc=.5 Cgs=3.736p Kf=13.56E-18
+              Af=1)
*              National       pid=50         case=TO92
*              88-08-01 rmn   BVmin=30
```

Analice la polarización de los dos circuitos (con y sin C_s), mediante un *.OP*. Realice un ánalisis *.AC* para calcular las ganancias en tensión de los circuitos y un análisis transitorio para visualizar las formas de onda a la entrada y a la salida del amplificador.

En la memoria de la práctica deberá entregar los listados de los ficheros ".CIR", el resultado de los puntos de polarización de los circuitos, las curvas de ganancia en tensión en función de la frecuencia, y un análisis transitorio de cada circuito para una señal de entrada de 8KHz y 0.2V de amplitud.

C. Hoja de características técnicas del BF245C

N-channel silicon field-effect transistors BF245A; BF245B; BF245C

FEATURES

- Interchangeability of drain and source connections
- Frequencies up to 700 MHz.

APPLICATIONS

- LF, HF and DC amplifiers.

DESCRIPTION

General purpose N-channel symmetrical junction field-effect transistors in a plastic TO-92 variant package.

CAUTION
The device is supplied in an antistatic package. The gate-source input must be protected against static discharge during transport or handling.

PINNING

PIN	SYMBOL	DESCRIPTION
1	d	drain
2	s	source
3	g	gate

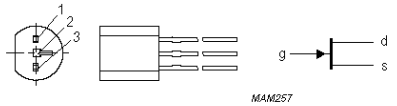


Fig.1 Simplified outline (TO-92 variant) and symbol.

QUICK REFERENCE DATA

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
V_{DS}	drain-source voltage		–	–	±30	V
V_{GSoff}	gate-source cut-off voltage	I_D = 10 nA; V_{DS} = 15 V	–0.25	–	–8	V
V_{GSO}	gate-source voltage	open drain	–	–	–30	V
I_{DSS}	drain current	V_{DS} = 15 V; V_{GS} = 0				
	BF245A		2	–	6.5	mA
	BF245B		6	–	15	mA
	BF245C		12	–	25	mA
P_{tot}	total power dissipation	T_{amb} = 75 °C	–	–	300	mW
$\|y_{fs}\|$	forward transfer admittance	V_{DS} = 15 V; V_{GS} = 0; f = 1 kHz; T_{amb} = 25 °C	3	–	6.5	mS
C_{rs}	reverse transfer capacitance	V_{DS} = 20 V; V_{GS} = –1 V; f = 1 MHz; T_{amb} = 25 °C	–	1.1	–	pF

LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_{DS}	drain-source voltage		–	±30	V
V_{GDO}	gate-drain voltage	open source	–	–30	V
V_{GSO}	gate-source voltage	open drain	–	–30	V
I_D	drain current		–	25	mA
I_G	gate current		–	10	mA
P_{tot}	total power dissipation	up to T_{amb} = 75 °C;	–	300	mW
		up to T_{amb} = 90 °C; note 1	–	300	mW
T_{stg}	storage temperature		–65	+150	°C
T_j	operating junction temperature		–	150	°C

Note

1. Device mounted on a printed-circuit board, minimum lead length 3 mm, mounting pad for drain lead minimum 10 mm × 10 mm.

THERMAL CHARACTERISTICS

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	VALUE	UNIT
$R_{th\ j\text{-}a}$	thermal resistance from junction to ambient	in free air	250	K/W
	thermal resistance from junction to ambient		200	K/W

STATIC CHARACTERISTICS

T_j = 25 °C; unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
$V_{(BR)GSS}$	gate-source breakdown voltage	I_G = –1 μA; V_{DS} = 0	–30	–	V
V_{GSoff}	gate-source cut-off voltage	I_D = 10 nA; V_{DS} = 15 V	–0.25	–8.0	V
V_{GS}	gate-source voltage	I_D = 200 μA; V_{DS} = 15 V			
	BF245A		–0.4	–2.2	V
	BF245B		–1.6	–3.8	V
	BF245C		–3.2	–7.5	V
I_{DSS}	drain current	V_{DS} = 15 V; V_{GS} = 0; note 1			
	BF245A		2	6.5	mA
	BF245B		6	15	mA
	BF245C		12	25	mA
I_{GSS}	gate cut-off current	V_{GS} = –20 V; V_{DS} = 0	–	–5	nA
		V_{GS} = –20 V; V_{DS} = 0; T_j = 125 °C	–	–0.5	μA

Note

1. Measured under pulse conditions: t_p = 300 μs; $\delta \leq 0.02$.