

PRÁCTICA N° 6: ESTUDIO DE TRANSITORIOS RC, RL y RLC

Objetivos: Utilización de un osciloscopio digital para estudiar los transitorios más sencillos.

Material: Osciloscopio digital e impresor gráfico, generador de baja frecuencia, componentes R, C (47nF) y L (bobina de 10000 espiras).

1. TRANSITORIOS RC, RL y RLC

Se entiende por "transitorio" de un circuito eléctrico el tiempo que transcurre desde la conexión o desconexión de algún componente hasta alcanzar el régimen estacionario de corrientes y diferencias de potencial. El caso que estudiaremos en esta práctica es el más usual consistente en la conexión o desconexión del generador:

Transitorio de conexión: $\varepsilon(t) = 0, t \leq 0$ y $\varepsilon(t) = \varepsilon, t > 0$ (1)

Transitorio de desconexión: $\varepsilon(t) = \varepsilon, t \leq 0$ y $\varepsilon(t) = 0, t > 0$

a) Transitorio RC: carga y descarga de un condensador

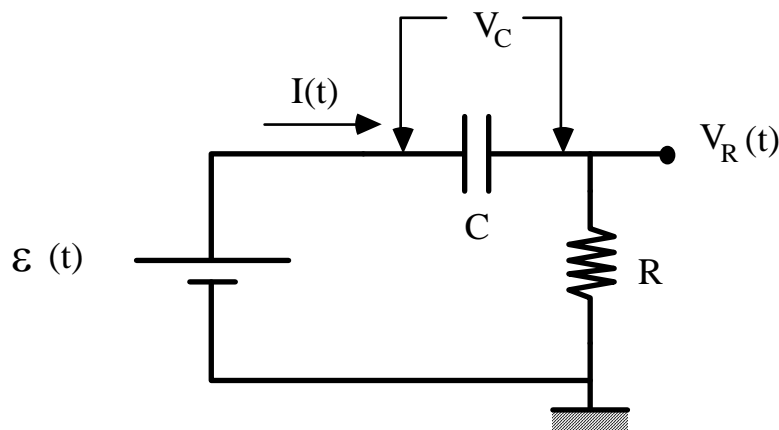


Figura 1

De acuerdo con la figura 1, nos planteamos calcular $I(t)$ al conectar o desconectar el generador en $t=0$. Suponemos para ello que el condensador se encuentra inicialmente descargado ($Q(t)=0$ y $V_C(t)=0$ en $t \leq 0$). Teniendo en cuenta la ley de Ohm y que la carga almacenada por el condensador en cada instante de tiempo es $Q(t)$, tendremos:

$$Q(t) = \int_0^t I dt \quad V_C = \frac{Q}{C} \quad (2)$$

Así pues, la diferencia de potencial proporcionada por el generador ($\varepsilon(t)$ definida en la ecuación 1, que indistintamente puede corresponder al transitorio de conexión o de desconexión) es igual, en cualquier instante de tiempo, a la diferencia de potencial en los bornes del condensador ($V_C(t)$) más la diferencia de potencial en los bornes de

la resistencia ($V_R(t)$), es decir, $\varepsilon(t) = V_C(t) + V_R(t)$. Derivando esta ecuación, y recordando que $V_R(t) = R I(t)$, encontramos que la corriente $I(t)$ que circula por el circuito satisface la siguiente ecuación diferencial:

$$R \frac{dI}{dt} + \frac{I}{C} = \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (3)$$

La solución de dicha ecuación es:

$$I(t) = \pm \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = \pm \frac{\varepsilon}{R} e^{-t/\tau} \quad (4)$$

donde el signo + corresponde al transitorio de conexión del generador, y el signo - al transitorio de desconexión. $\tau = RC$ es la constante de tiempo del transitorio RC.

En la ecuación anterior se ha considerado el caso ideal en el que toda la resistencia del circuito está concentrada en R. En realidad, el generador de fem suele tener una resistencia interna r que hay que tener en cuenta si no es pequeña comparada con el valor de R. En ese caso la corriente sería:

$$I(t) = \pm \frac{\varepsilon}{R+r} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{con } \tau = (R+r)C \quad (4)_{\text{bis}}$$

b) Transitorio RL: conexión y desconexión de una autoinducción

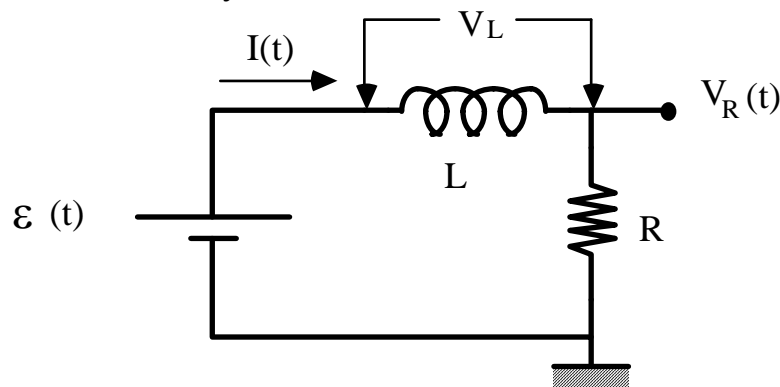


Figura 2

De acuerdo con la figura 2, nos planteamos ahora calcular la corriente $I(t)$ que circula al conectar o desconectar el generador en $t=0$. Teniendo en cuenta las características de una autoinducción, $V_L(t)$ será:

$$V_L = L \frac{dI}{dt} \quad (5)$$

Donde L es el coeficiente de autoinducción de la bobina. La tensión proporcionada por el generador ($\varepsilon(t)$ definida en la ecuación 1, que indistintamente puede corresponder al transitorio de conexión o de desconexión) es igual, en cualquier instante de tiempo, a la diferencia de potencial en los bornes de la bobina ($V_L(t)$) más

la diferencia de potencial en los bornes de la resistencia ($V_R(t)=R I(t)$), es decir, $\varepsilon(t)=V_L(t)+V_R(t)$. Por lo tanto, la corriente $I(t)$ satisface la siguiente ecuación diferencial:

$$L \frac{dI}{dt} + RI = \varepsilon(t) \quad (6)$$

La solución para el caso de conexión del generador es:

$$I(t) = \frac{\varepsilon}{R} \left(1 - e^{-\frac{Rt}{L}} \right) = \frac{\varepsilon}{R} \left(1 - e^{-t/\tau} \right) \quad (7)$$

y para el caso de desconexión:

$$I(t) = \frac{\varepsilon}{R} \left(1 - e^{-t/\tau} \right) \quad (8)$$

siendo $\tau = L/R$ en este caso la constante de tiempo del transitorio RL .

En realidad hay que considerar como en el apartado anterior la resistencia interna de la fem r , y sobre todo la resistencia de la bobina R_B . Si despreciamos el valor de r frente a R_B y R , podemos escribir como solución para el transitorio de conexión:

$$I(t) = \frac{\varepsilon}{R + R_B} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \text{ con } \tau = L/(R + R_B) \quad (7)\text{bis}$$

c) Transitorio RLC serie: oscilaciones amortiguadas

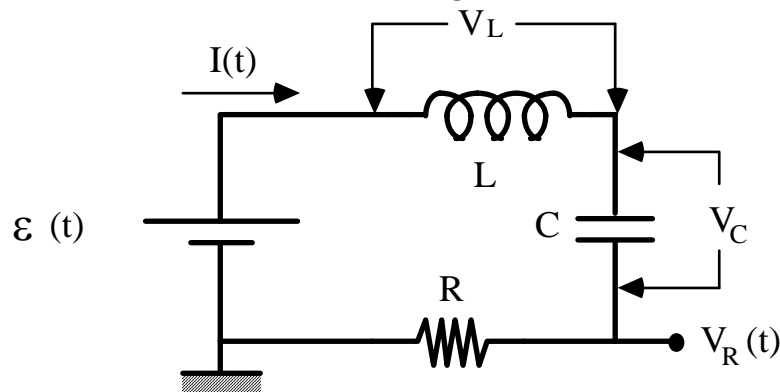


Figura 3

De acuerdo con la figura 3, nos planteamos calcular la corriente $I(t)$ que circula por el circuito al conectar o desconectar el generador. Igual que en los apartados anteriores, la tensión proporcionada por el generador ($\varepsilon(t)$ definida en la ecuación 1, que indistintamente puede corresponder al transitorio de conexión o de desconexión) es igual, en cualquier instante de tiempo, a la diferencia de potencial en los bornes de la bobina ($V_L(t)$), más la diferencia de potencial en los bornes del condensador ($V_C(t)$), más la diferencia de potencial en los bornes de la resistencia ($V_R(t)=R I(t)$), es decir, $\varepsilon(t)=V_L(t)+V_C(t)+V_R(t)$. Derivando esta ecuación, encontramos que la corriente $I(t)$ satisface la siguiente ecuación diferencial:

$$L \frac{d^2I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{I}{C} = \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (9)$$

cuya solución es:

$$I(t) = \pm \frac{\varepsilon}{L(\alpha_1 - \alpha_2)} \left(e^{\alpha_1 t} - e^{\alpha_2 t} \right) \quad (10)$$

donde la solución + corresponde al caso de conexión del generador y la solución - al caso de desconexión, y donde α_1 y α_2 son las raíces de la ecuación:

$$LC\alpha^2 + RC\alpha + 1 = 0 \quad (11)$$

$$\alpha_{1,2} = \frac{-RC \pm \sqrt{R^2C^2 - 4LC}}{2LC} \quad (12)$$

donde el signo + corresponde a α_1 , y el signo - corresponde a α_2 .

Si estas raíces resultan ser complejas, entonces se obtiene que la ecuación (10) se reduce a:

$$I(t) = \pm \frac{\varepsilon}{L\Omega} e^{-t/\tau} \text{sen}\Omega t \quad (13)$$

siendo:

$$\Omega \equiv \frac{\sqrt{4LC - R^2C^2}}{2LC} \quad \text{y} \quad \tau = 2L/R \quad (14)$$

lo que corresponde a una variación sinusoidal amortiguada exponencialmente con un tiempo característico τ . En los casos en que $R^2C^2 \ll 4LC$ se tendrá que $\Omega \cong \sqrt{1/LC}$, coincidiendo con la frecuencia propia de resonancia del circuito RLC serie.

En las expresiones (13) y (14) habrá que tener en cuenta el valor no despreciable de la resistencia de la bobina, y cambiar R por $(R+R_B)$.

2. MONTAJE EXPERIMENTAL

La figura 4 es el esquema del montaje experimental que nos va a permitir analizar los transitorios comentados anteriormente.

Los procesos de conexión y desconexión del generador se simulan mediante la función onda cuadrada del generador de funciones disponible. Dicha onda cuadrada genera un proceso de "conexión" cada vez que pasa de 0 voltios a V_0 , y uno de desconexión cuando pasa de V_0 a 0 voltios. El período de dicha onda cuadrada debe ser lo bastante largo para que se alcance el régimen estacionario entre conexión y desconexión, y por otra parte lo bastante corto para que se vea correctamente el transitorio en el osciloscopio. Los elementos usados en esta práctica han sido diseñados para que cumplan estos dos requisitos siempre que se trabaje a la frecuencia del generador (que define el período de la señal cuadrada proporcionada por el generador) indicada en cada caso.

Dado que el osciloscopio es en esencia un voltímetro, para observar $I(t)$ se medirá la diferencia de potencial $V_R(t)$ generada en la resistencia R, que resulta ser proporcional a $I(t)$ ($V_R(t) = R I(t)$).

La impedancia Z será distinta en cada caso: Z será igual al condensador para el transitorio RC, a la bobina para el transitorio RL, y a la bobina en serie con el condensador para el transitorio RLC.

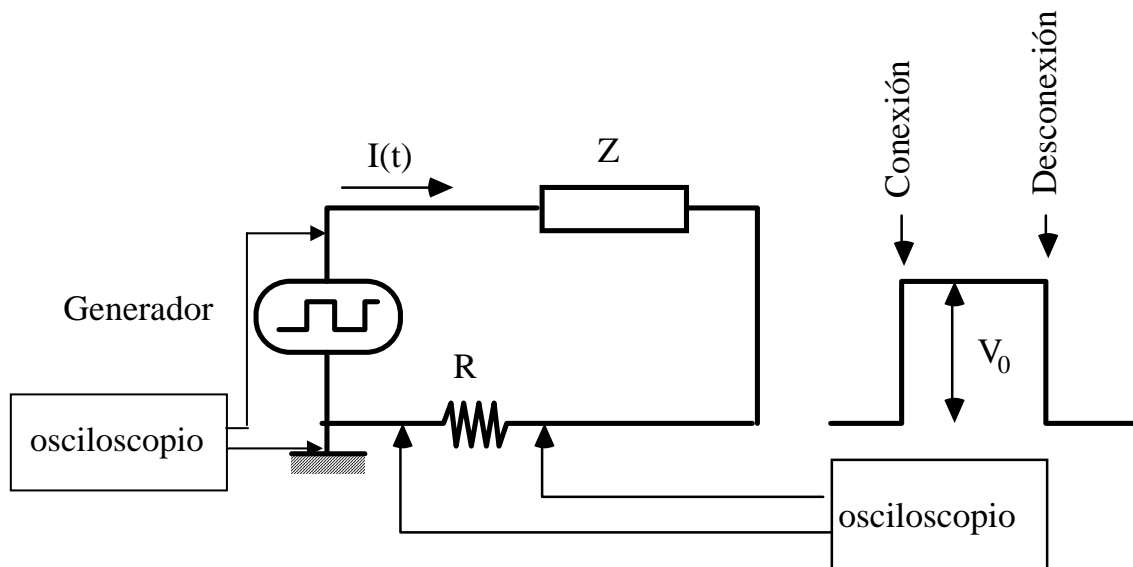


Figura 4

3. MEDIDAS

3.1. TRANSITORIO RC

Montar el circuito de la figura 1 ($R=470 \Omega$ y $C=47 \text{ nF}$) de acuerdo con el esquema general de la figura 4 (la impedancia Z en este caso es el condensador). Utilizar el canal libre del osciloscopio para medir la señal del generador, **anotando el valor de ϵ medido**. Si comparamos la señal del generador con la del transitorio (utilizando el modo dual), se pueden hacer los ajustes necesarios para observar este último correctamente. Podremos ajustar la frecuencia del generador ($\sim 1000 \text{ Hz}$), la amplitud V_0 y los controles del osciloscopio hasta obtener en su pantalla una imagen clara y grande del transitorio (figura 5). Se recomienda que el cero de V_R coincida con la línea horizontal más baja del retículo de la pantalla, y que se observe lo más ampliada posible la zona de variación exponencial, sin que la imagen se salga de escala. Así mismo, resulta cómodo, para hacer las comprobaciones y cálculos posteriores, ajustar el valor de ϵ para que el máximo del transitorio (V_R en $t = 0$) corresponda con un número exacto de divisiones grandes. Imprimir la gráfica de acuerdo con las instrucciones del Apéndice "osciloscopio digital y su impresor gráfico".

Anotar las escalas utilizadas en el osciloscopio, así como la frecuencia del generador y la amplitud de su señal cuadrada medida en el propio osciloscopio (ϵ) (Tened en cuenta la sensibilidad de cada escala a la hora de considerar el error correspondiente). Anotar, así mismo, los valores de R y C .

Repetir la medida cambiando el valor de la resistencia ($R= 1.8 \text{ k}\Omega$ y $18 \text{ k}\Omega$). Observar cómo afecta el hecho de cambiar la resistencia al tiempo que se tarda en alcanzar el estado estacionario. En este caso el estado estacionario es una corriente nula (y por tanto V_R también nulo), ya que el condensador se comporta como un circuito abierto en corriente continua (ver ecuación (4)). Se apreciará que en cada caso puede resultar conveniente reajustar los controles del osciloscopio e incluso

bajar la frecuencia del generador para que el transitorio se imprima bien: observar que la frecuencia del generador está ligada con el tiempo entre la conexión y la desconexión que simulamos con el generador de señal, por lo que del valor de dicha frecuencia dependerá que la señal haya alcanzado el estado estacionario, y en consecuencia que podamos separar los dos transitorios de conexión y desconexión.

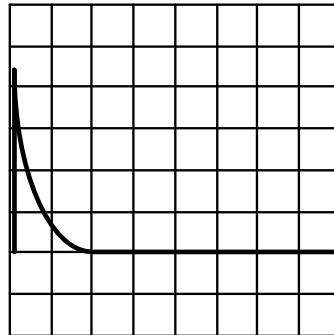


Figura 5. Conexión de un circuito RC

3.2. TRANSITORIO RL

Montar el circuito de la figura 2 ($R=470\ \Omega$ y la bobina de 10000 espiras) de acuerdo con la figura 4 (la impedancia Z en este caso es la bobina). Utilizar, como en el caso anterior, el canal libre del osciloscopio para visualizar la señal del generador. Ajustar la frecuencia del generador ($\sim 20\ \text{Hz}$), la amplitud y los controles del osciloscopio para obtener una imagen clara (figura 6). A frecuencias bajas conviene utilizar el control de sincronismo externo: para ello debe conectarse un cable coaxial entre la salida marcada TTL del generador de funciones y el borne "TRIG.INP" del osciloscopio, pulsando el conmutador "EXT". Ajustar el transitorio de manera que empiece en el punto inferior izquierda del retículo de la pantalla ($V_R = 0$), ajustando las escalas horizontal y vertical para que la zona de variación exponencial se observe lo más ampliada posible sin que la imagen se salga de la pantalla. Por comodidad conviene ajustar ϵ para que el valor máximo del transitorio coincida con un número exacto de divisiones. Medir el valor de ϵ para las comprobaciones posteriores. Imprimir la imagen del transitorio y anotar las escalas del osciloscopio, y la frecuencia y amplitud de la señal cuadrada del generador, así como el valor de R_B (el cual se puede medir con un polímetro, desconectando previamente la bobina del circuito).

Repetir la medida cambiando la resistencia ($R= 1.8\ \text{k}\Omega$ y $18\ \text{k}\Omega$). Observar cómo afecta el hecho de cambiar la resistencia al tiempo que se tarda en alcanzar el estado estacionario. En este caso el estado estacionario para el transitorio de conexión es una corriente continua constante (ver ecuación (7)), y para el de desconexión es una corriente nula (ver ecuación (8)), ya que una bobina (sin resistencia interna) es un cortocircuito en régimen permanente de corriente continua. Se apreciará que en cada caso puede resultar conveniente reajustar los controles del osciloscopio e incluso bajar la frecuencia del generador para que el transitorio se imprima bien: observar que la frecuencia del generador está ligada con el tiempo entre la conexión y la desconexión que simulamos con el generador de señal, por lo que del valor de dicha frecuencia dependerá que la señal haya alcanzado el estado estacionario, y en consecuencia que podamos separar los dos transitorios de conexión y desconexión.

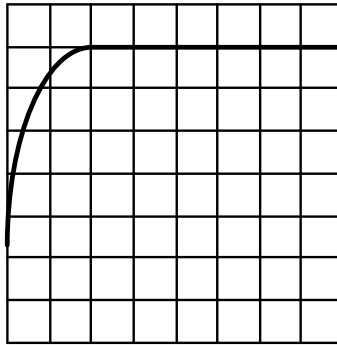


Figura 6. Conexión de un circuito RL

3.3. TRANSITORIO RLC

Montar el circuito de la figura 3 (con $R=470\ \Omega$), de acuerdo con el montaje de la figura 4 (la impedancia Z es el condensador conectado en serie con la bobina). En el segundo canal del osciloscopio mediremos la señal del generador. Ajustar la frecuencia del generador ($\sim 18\ \text{Hz}$) y los demás controles para obtener una imagen clara del transitorio (figura 7). De nuevo, en este caso, puede ser una ayuda emplear la opción del osciloscopio de control de sincronismo exterior utilizada en el apartado anterior. Conviene centrar el transitorio: para ello podemos utilizar la opción GRD (ó GD) del canal correspondiente del osciloscopio para centrar la señal de barrido en la pantalla. Ajustaremos el inicio del transitorio a la izquierda, y las escalas horizontal y vertical para ver lo más ampliada posible la zona de oscilaciones. Imprimir dicha imagen y los parámetros correspondientes.

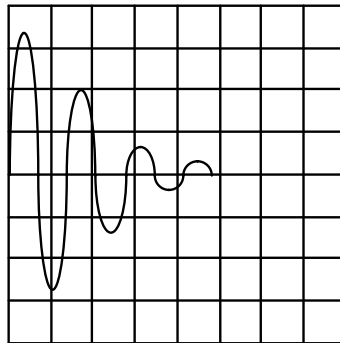


Figura 7. Conexión de un circuito RLC

Repetir las medidas cambiando la resistencia ($R=1.8\ \text{k}\Omega$ y $18\ \text{k}\Omega$). Observar como afecta el hecho de cambiar la resistencia al tiempo que se tarda en alcanzar el estado estacionario (en este caso el estado estacionario es una corriente igual a 0, ya que un condensador no "deja" pasar la corriente continua). Se apreciará que en cada caso puede resultar conveniente reajustar los controles del osciloscopio e incluso bajar la frecuencia del generador para que el transitorio se imprima bien: observar que la frecuencia del generador está ligada con el tiempo entre la conexión y la desconexión que simulamos con el generador de señal, por lo que del valor de dicha frecuencia dependerá que la señal haya alcanzado el estado estacionario, y en consecuencia que podamos separar los dos transitorios de conexión y desconexión.

4. CUESTIONES

- a) Obtener a partir de la gráfica del transitorio RC el valor de τ , teniendo en cuenta que para $t = \tau$ la señal se atenúa en $1/e$. De la constante de tiempo τ se puede obtener C, conocido el valor de R y comparar con el valor nominal. Analizar cómo varía τ con el valor de R. Ver la cuestión (d).
- b) Obtener a partir de la gráfica del transitorio RL el valor de τ . Tened en cuenta que en este caso para $t = \tau$, V_R alcanza un valor aproximado de un 60% de su valor máximo (ecuación 7_{bis}). Deducir el valor de L a partir de la constante de tiempo experimental. Analizar cómo varía τ con el valor de R.
- c) Analizar el transitorio RLC con las ecuaciones (13) y (14). Tomar en cuenta el valor de L deducido del apartado anterior para comprobar el valor de la frecuencia angular de oscilación Ω y el del amortiguamiento exponencial de las oscilaciones. Observar que la frecuencia de oscilación se puede medir a partir del periodo de las oscilaciones T ($\Omega=(2\pi)/T$), y que la constante de amortiguamiento τ se puede medir utilizando la envolvente de los máximos y mínimos de la curva. Para ello se puede representar el logaritmo neperiano de los valores máximos y mínimos (en módulo) de V en función de t (escala semilogarítmica), y del ajuste se pueden obtener los parámetros característicos. Analizar el papel de la resistencia R. ¿Hay algún valor de R para el que se produce amortiguamiento crítico o sobreamortiguamiento? Comentar, teniendo en cuenta la ecuación (14).
- d) Tomar en cuenta el hecho de que el generador de onda cuadrada no es ideal y tiene una impedancia interna de 50Ω , lo que significa que debe considerarse la presencia de una resistencia suplementaria de 50Ω en serie con los demás elementos.

APÉNDICE: OSCILOSCOPIO DIGITAL E IMPRESOR GRÁFICO

Desde un punto de vista práctico, un osciloscopio digital funciona esencialmente como un osciloscopio normal analógico, con la posibilidad extra de congelar la imagen dado que la misma puede memorizarse.

Los controles suplementarios de que dispone el osciloscopio digital HM 205-3 respecto al equivalente analógico son:

- STOR: activa la digitalización de la señal: 200 puntos/div.
- DOT J: activa la unión entre puntos consecutivos de la digitalización mediante una línea recta.
- SINGLE: al activar esta función el osciloscopio graba la señal sincronizada con un disparo del barrido interno y la muestra en pantalla; cada vez que se pulsa el control RESET se borra la señal y se graba una nueva. Si este control está desactivado, entonces automáticamente se graban las señales de forma consecutiva.
- HOLD: congela la imagen del canal I y/o II.

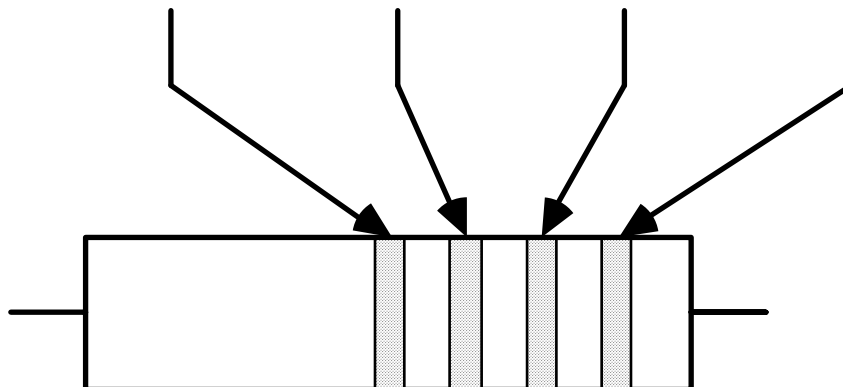
En relación al impresor gráfico y a su empleo en conjunción con el osciloscopio digital, deben seguirse las siguientes instrucciones:

- 1) Encender la impresora. Una vez encendida no debe apagarse hasta finalizar la práctica, para evitar la repetición innecesaria del autotest.

- 2) Activar al función "STOR" del osciloscopio (si estaba desactivada) y dejarla activa durante toda la práctica.
- 3) Ajustar las escalas de los ejes verticales para que el tamaño del ciclo sea lo más grande posible sin salirse del cuadrado central 8x8 de la pantalla, manteniendo dichas escalas en su posición de "calibradas". Sólo la señal comprendida dentro de este cuadrado se imprimirá.
- 4) Imprimirlo pulsando el mando "PRINT" del impresor gráfico.
- 5) Conviene anotar en cada impresión las escalas de los ejes X e Y, y los comentarios necesarios para luego identificar correctamente cada gráfica al realizar los cálculos.

APÉNDICE: CÓDIGO DE COLORES PARA RESISTENCIAS

| COLOR | 1º dígito | 2º dígito | factor | tolerancia |
|----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| plata | - | - | 10^{-2} | $\pm 10\%$ |
| oro | - | - | 10^{-1} | $\pm 5\%$ |
| negro | - | 0 | 10^0 | - |
| marrón | 1 | 1 | 10^1 | - |
| rojo | 2 | 2 | 10^2 | - |
| naranja | 3 | 3 | 10^3 | - |
| amarillo | 4 | 4 | 10^4 | - |
| verde | 5 | 5 | 10^5 | - |
| azul | 6 | 6 | 10^6 | - |
| violeta | 7 | 7 | 10^7 | - |
| gris | 8 | 8 | 10^8 | - |
| blanco | 9 | 9 | 10^9 | - |



El valor resultante al aplicar este código de colores viene dado en ohmios.

3. Medimos el valor de las distintas resistencias que emplearemos a lo largo de la práctica con el multímetro (error del 1%).

$R_B = 1366 \pm 14 \Omega$ (bobina)

$R_1 = 467 \pm 5 \Omega$

\leftrightarrow

$R_1^o = 470 \pm 5\% \Omega$

$R_2 = 1782 \pm 18 \Omega$

\leftrightarrow

$R_2^o = 1800 \pm 5\% \Omega$

$R_3 = 17,94 \pm 0,18 k\Omega$

\leftrightarrow

$R_3^o = 18 \pm 5\% k\Omega$

amarillo-violeta-naranja-dorado

naranja-gris-rojo-dorado

naranja-gris-naranja-dorado

Bobina:

12.10.000 espiras

2,2 - 4,4 kV

1350 - 1380

\rightarrow valor L

$L = 7,0 \pm 0,1$

$r_{int} = 4,0 \pm 0,1$

$r_{ext} = 7,0 \pm 0,1$

$S = 30 \pm 5 \text{ cm}^2$

Los valores nominales son compatibles con los experimentales.

Realizamos medidas de comprobación del calibrado del osciloscopio, ya que el botón de calibrado de la escala temporal está estropeado. En efecto, descubrimos un error sistemático debido a la calibración errónea:

| f (Hz) | T (μ s) | f.T |
|--------|--------------|-------------------|
| 559 | 300 ± 20 | $0,503 \pm 0,011$ |
| 1.000 | 510 ± 10 | $0,510 \pm 0,010$ |
| 1.876 | 270 ± 10 | $0,506 \pm 0,018$ |

f.T debería ser del orden de 1 si el display del generador y la escala de tiempos del osciloscopio estuviesen correctamente calibrados. En nuestro caso, el error sistemático

(factor de conversión \times de) se debe al osciloscopio ya que al pulsar el botón 'STORE', la escala de tiempos se corrige:

$f_{gen} = 1118 \text{ Hz} \leftrightarrow f_{osc} = 1110 \pm 20 \text{ Hz}$ (valores compatibles).

Por ello, decidimos cambiar el osciloscopio.

3.1 Transitorio RC

Montamos el circuito RC alimentado por un generador con una función de onda cuadrada, que simula la conexión y desconexión de un circuito. Conectamos un canal de los osciloscopio entre los bornes de la bobina (canal 2) y otro al generador (canal 1). Para cada resistencia medimos el valor de E (amplitud de la onda cuadrada), su frecuencia y período, tras ajustar dichos valores de manera que el transitorio en V_R baje toda la pantalla, se observe la variación exponencial claramente y que haya llegado visiblemente al estado estacionario (depende de f). Una vez ajustada la escala y posición de la señal en el osciloscopio para que el altavoz de la pantalla corresponda con 0 y V_{max} , se pulsa el botón 'PRINT' para imprimir la gráfica (con nuestro osciloscopio, la escala de los ejes la imprime automáticamente, no hay que apuntarla; y disponemos de cursores para medidas precisas).

Este proceso se repite para cada resistencia, ajustando E , f y los controles del osciloscopio para obtener una imagen clara, y se estudiará cómo hay que variar f para distintas R de manera que se alcance el estado estacionario.

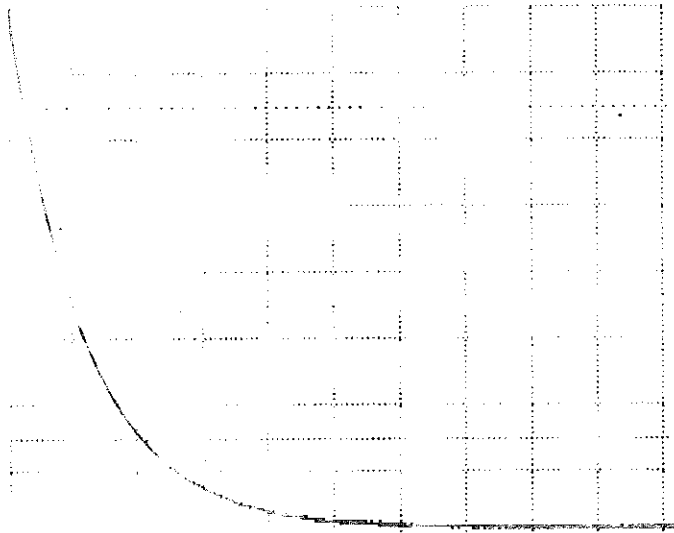
En cada medida tomamos los valores de f , T (osciloscopio), E y $t_{1/2}$, que corresponde al corte de la curva con el eje x si la gráfica está centrada. $V_{max}/2 = V_{max} \cdot e^{-t_{1/2}/\tau} \rightarrow t_{1/2} = \tau \ln 2$, de manera que podemos calcular τ . También se calculará la frecuencia experimental $f_e = \frac{1}{T}$ y se comparará con el valor del generador.

Las gráficas impresas representarán el tiempo en el eje horizontal y V_R (d.d.p. entre la resistencia) en el vertical.

Comenzamos con el circuito R1C:

$$\tau_{teo} = 22,9 \pm 0,5 \mu s$$

| $f \pm 1 \text{ Hz}$ | $T \text{ (ms)}$ | $f_c \text{ (Hz)}$ | $E \text{ (V)}$ | $t_{1/2} \text{ (}\mu s\text{)}$ | $\tau \text{ (}\mu s\text{)}$ |
|----------------------|-------------------|--------------------|-----------------|----------------------------------|-------------------------------|
| 1114 | $0,305 \pm 0,002$ | 1104 ± 2 | $1,78 \pm 0,02$ | $15,67 \pm 0,02$ | $22,6 \pm 0,03$ |



DATE 81-01-1990
TIME 00 06 45

SIGNALPARAMETER:

CH2 - VOLTS/DIV = 0,20
TIMEBASE-SEC/DIV = 200ns
TRIGGERLEVEL CH2 AUTO
PRETRIGGER 0%
DELTA CURSOR CH2 1,0000
ADD CH1,CH2 OFF

PRINTPARAMETER:

ZOOMRANGE - CH2 0-9
HARDCOPY SOURCE NM 400

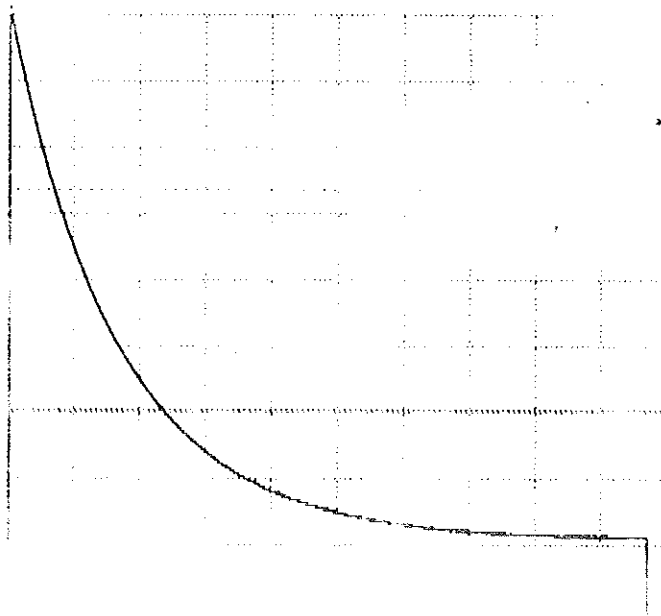
REMARKS:



Figura 3.1.1. Transitorio de conexión R1C.

El error en $t_{1/2}$ se ha tomado teniendo en cuenta las variaciones para las que el cursor no cambiaba visiblemente de posición (estimación de la sensibilidad).

Circuito R2C (tabla con misma columna que arriba) $\tau_{teo} = 84 \pm 2 \mu s$
1031 $0,98 \pm 0,01$ 1020 ± 10 $1,70 \pm 0,02$ $55,65 \pm 0,05$ $80,23 \pm 0,07$



DATE 81-01-1990
TIME 00 20 54

SIGNALPARAMETER:

CH2 - VOLTS/DIV = 0,20
TIMEBASE-SEC/DIV = 500ns
TRIGGERLEVEL CH2 AUTO
PRETRIGGER 0%
DELTA CURSOR CH2 0,5000
ADD CH1,CH2 OFF

PRINTPARAMETER:

ZOOMRANGE - CH2 0-9
HARDCOPY SOURCE NM 400

REMARKS:

8 3 7 0 0 1 0 0 0

Figura 3.1.2. Transitorio de conexión R2C

no hemos podido aumentar más la amplitud porque la gráfica se parpadeara (inestable)

Circuito R3C

$Z_{00} = 840 \pm 20 \mu s$

101 9,85 ± 0,01 101,52 ± 0,10 3,04 ± 0,02 563 ± 5 812 ± 7

DATE: 91-01-1990
TIME: 00:15:04

SIGNAL PARAMETERS

CH2 - VOLTS 0.01 50
TIMEBASE - 2.00 0.1 100
TRIGGERLEVEL 74% 400
PRETRIGGER 0%
DELTA CURSOR DEL
ADD CH1 0.00 0.00

PRINTER PARAMETERS

MODE - 9 9
SOURCE - RM 400

REMARKS

HAMEG

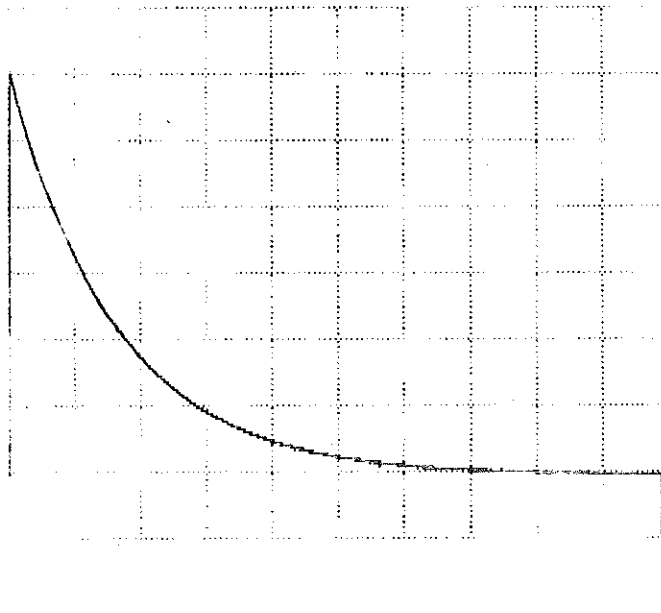


Figura 3.1.3 Transitorio de conexión R3C.

En los tres casos se observa que la frecuencia esperada f_e según la medida de T en el osciloscopio es compatible con el valor del display del generador (en el primer caso hay más dispersión). Para cálculos posteriores utilizaremos los f_e , ya que provienen de una medida directa, un error como somos capaces de estimar, mientras que del valor del display solo conocemos su sensibilidad (1Hz), pero no si tiene un error porcentual añadido (habría que consultar el manual del fabricante).

En cuanto a los transitorios, las gráficas son similares en los tres casos se aprecia el rápido salto de 0 a V_{max} y un posterior decaimiento exponencial. Esta figura se repite invertida en 'y' a continuación lo que correspondería al transitorio contrario (conexión ↔ desconexión). Se observa que ^{el tiempo} para alcanzar el estado estacionario es mayor cuanto mayor es la resistencia, por lo que era necesario aumentar el período de la onda cuadrada para separar ambos transitorios. Esto se observa en las crecientes escalas del eje x (tiempo) a mayores resistencias, así como en los valores de $t_{1/2}$ \uparrow Z crecientes, especialmente en R_3 .

Los valores de Z_{00} han sido calculados sin tener en cuenta la impedancia del generador, y no solapan sus barras de error con los valores experimentales, pero están a menos de dos barras de error, lo que es aceptable. Para mejorar estos datos podemos tomar más medidas de $V(t)$, representarlo en el Kplot y obtener Z a partir de un ajuste. En cuanto al valor teórico, habría que sumarle a R_i el valor de 50 Ω de impedancia del generador.

Se ajusta en cada caso de manera que la señal se vea clara y proporcionada en la pantalla.

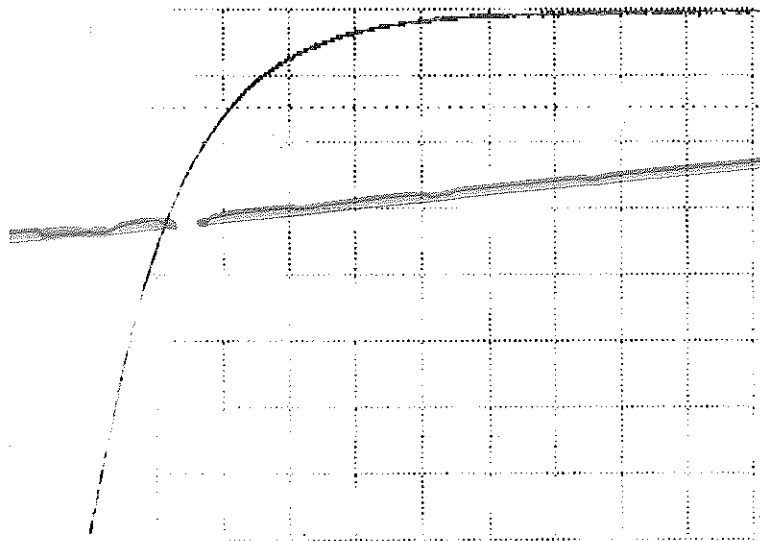
En el circuito RE, el estado estacionario corresponde a una intensidad nula, pues el condensador actúa como corto circuito en régimen de corriente continua, y solo en variaciones de E (conexión/desconexión) "deja pasar" corriente.

3.2. Transitorio RL

$$L_{teo} = \mu_0 N^2 S / l \approx 5,4 \pm 1,1 \text{ H}$$

Conectamos la bobina de 10.000 espiras y el sincronismo externo TTL-TRIG.INP y pulsamos "EXT" para controlar el disparo de bámbido a bajas frecuencias.

| Circuito R ₁ L: T(ms) | f _e (Hz) | E (V) | t _{1/2} (ms) | T (ms) |
|----------------------------------|---------------------|--------------|-----------------------|-------------|
| 16 | 61,1 ± 0,1 | 16,37 ± 0,03 | 6,2 ± 0,1 | 2,31 ± 0,14 |



DATE 01-01-1990
TIME 01:24:32

SIGNALPARAMETER:

CH2 - VOLTS/DIV = 0.20
TIMEBASE-SEC/DIV = 2ms
TRIGGERLEVEL EXT = 0.7
PRETRIGGER = 0%
DELTA CURSOR CH2 = 0.2010
ADD CH1,CH2 OFF

PRINTPARAMETER:

ZOOMRANGE - CH2 0-5
HARDCOPY SOURCE MM 400

REMARKS:

AMEG



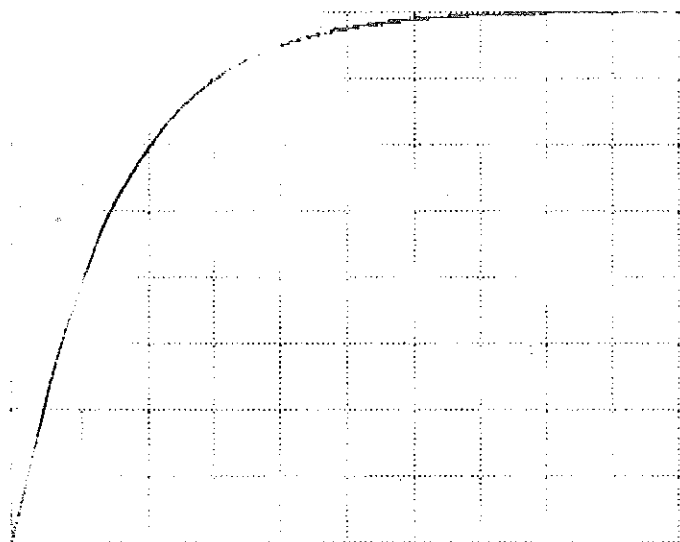
Figura 3.2.1. Transitorio de conexión R₁L.

TIS

Circuito R₂L:

$$L_{teo} \approx 1,7 \pm 0,3 \text{ ms}$$

| | | | | | |
|----|---------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 10 | 0,100 ± 0,002 | 10,0 ± 0,2 | 7,04 ± 0,05 | 1,00 ± 0,02 | 1,44 ± 0,03 |
|----|---------------|------------|-------------|-------------|-------------|



DATE 01-01-1990
TIME 01:14:06

SIGNALPARAMETER:

CH2 - VOLTS/DIV = 0.50
TIMEBASE-SEC/DIV = 1ms
TRIGGERLEVEL EXT = 0.33
PRETRIGGER = 0%
DELTA CURSOR OFF
ADD CH1,CH2 OFF

PRINTPARAMETER:

ZOOMRANGE - CH2 0-9
HARDCOPY SOURCE H1 400

REMARKS:

AMEG



Figura 3.2.2. Transitorio de conexión R₂L.

Circuito R₃L:

$$\tau_{teo} = 0,28 \pm 0,06$$

213 $4,72 \pm 0,03$ $211,9 \pm 0,4$ $4,4 \pm 0,1$ $0,17 \pm 0,01$ $0,245 \pm 0,014$



DATE: 01-01-1990
TIME: 00:47:51

SIGNAL PARAMETER:

CH2 - VOLTS/DIV = 0.5V
TIMEBASE - SEC/DIV = 0.5ms
TRIGGER LEVEL CH2 = 0.840V
PRETRIGGER = 0%
DELTA CURSOR = 4.925ms
ADD CH1,CH2 = OFF

PRINTER PARAMETER:

ZOOM RANGE - CH2 0-9
HARDCOPY SOURCE HM 100

REMARKS:



Figura 3.2.3 Transitorio de desconexión R₃L.

En los tres casos, la frecuencia nominal y experimental son compatibles. Las gráficas de los transitorios de conexión son similares, y el estado estacionario corresponde a un efecto nulo de autoinducción de la bobina y un Vanax = cte. El tiempo en alcanzar dicho estado viene "retardado" por la inducción de la bobina, que genera una corriente en sentido contrario. El transitorio de desconexión es invertido, pues se pasa de Vanax a 0 en el estado estacionario, y la bobina "intenta reducir" la rápida caída. En la figura 3.2.3 se observan ambos transitorios (no podemos compararlos solo en lazo por no haber escala y amplitudes adecuadas).

También observamos para R₂ y R₁ que las ondas, a las bajas frecuencias, no eran perfectamente cuadradas, lo cual se corrigió pulsando el botón AC/DC que "resta" las derivaciones.

El valor $\tau/2$ (corte con eje t) corresponde con $\tau/2$ de manera similar al apartado RC. En este caso, $\tau/2 = Z \ln 2 = \frac{L}{R} \ln 2$. El valor de τ_{teo} depende del número de espiras y su densidad (5/c), $R+R_{ext}$ será como de la resistencia del circuito R, del generador r y de la bobina R₃. $\tau_{teo} = \frac{L}{R+R_{ext}}$

La diferencia del circuito RL, en este caso el tiempo que se tarda en alcanzar el estado estacionario es menor a mayor resistencia, lo que indica que el efecto de autoinducción es muy pequeño (su contribución) si las resistencias del circuito son grandes. Esto se aprecia a partir de los valores sucesivos de $\tau/2$ y Z la medida que disminuye R, por lo que para R₂ y R₁ ha sido necesario bajar la frecuencia respecto a R₃ para observar correctamente el estado estacionario sin solapamiento.

Los valores de τ experimental concuerdan con el valor teórico, cuyo error predominante es la determinación de la superficie, puesto que no se disponía de pie de rey y era difícil determinar el radio exterior además de haber aproximado el radio como media del text y int, por lo que es razonable que aparezca una desviación sistemática.

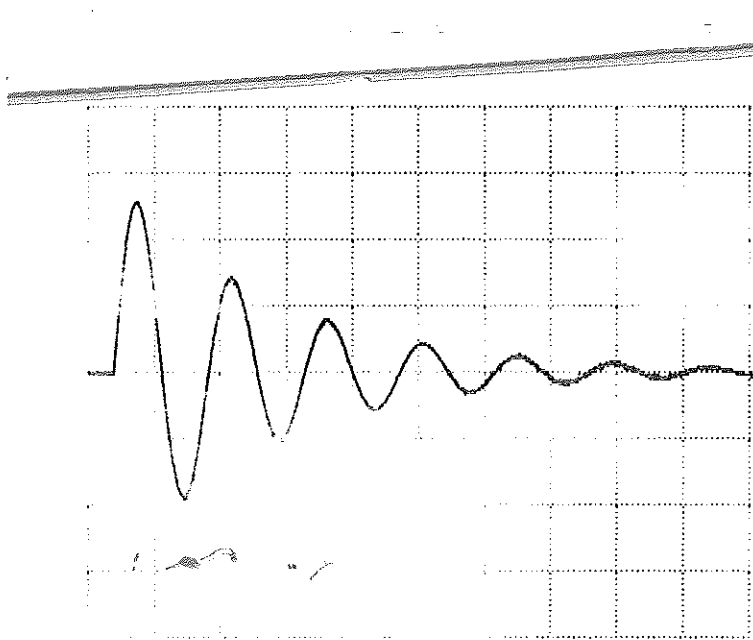
3.3. Transitorio RLC

$$T_{teo} = \frac{4\pi LC}{\sqrt{4CL - R^2C^2}}$$

Conectamos el circuito RLC con sincronismo externo y cambiando la señal utilizando la opción GD. Se observan oscilaciones amortiguadas en la señal.

Circuito R1C:

| $f \pm 1Hz$ | $T(ms)$ | $f_2(Hz)$ | $E(V)$ | $6TR(ms)$ | $T_{teo} = 3,2 \pm 0,6 ms$ |
|-------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|----------------------------|
| 17 | $59,14 \pm 0,1$ | $16,84 \pm 0,03$ | $6,52 \pm 0,04$ | $17,45 \pm 0,05$ | $2,908 \pm 0,008$ |



DATE 01-01-1990
TIME 01:43:38

SIGNALPARAMETER:

CH2 - VOLTS/DIV = 0.10
TIMEBASE-SEC/DIV = 2ms
TRIGGERLEVEL EXT = -0.220V
PRETRIGGER = 0%
DELTA CURSOR = OFF
ADD CH1,CH2 = OFF

PRINTERPARAMETER:

ZOOMRANGE - CH2:0-9
HARDCOPY SOURCE = HM 408

REMARKS:

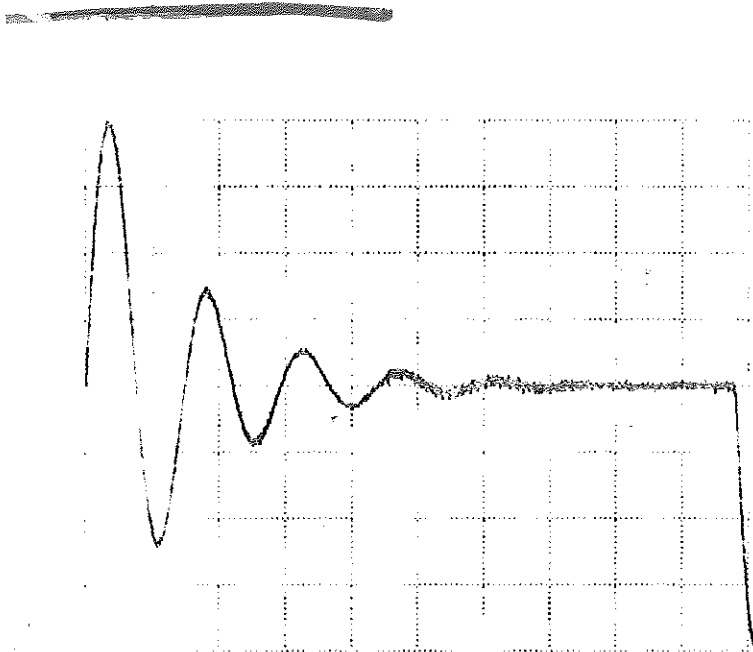


Figura 3.3.1. Transitorio de conexión R1C.

Medimos varios periodos y dividimos para reducir el error.

Circuito R2LC:

| | | | | $3TR$ | $T_{teo} = 3,2 \pm 0,6 ms$ |
|----|------------------|------------------|-----------------|-----------------|----------------------------|
| 25 | $39,27 \pm 0,06$ | $25,46 \pm 0,04$ | $2,86 \pm 0,02$ | $8,74 \pm 0,02$ | $2,913 \pm 0,007$ |



DATE 01-01-1990
TIME 01:54:17

SIGNALPARAMETER:

CH2 - VOLTS/DIV = 0.10
TIMEBASE-SEC/DIV = 2ms
TRIGGERLEVEL EXT = -0.064V
PRETRIGGER = 0%
DELTA CURSOR = OFF
ADD CH1,CH2 = OFF

PRINTERPARAMETER:

ZOOMRANGE - CH2:0-9
HARDCOPY SOURCE = HM 408

REMARKS:

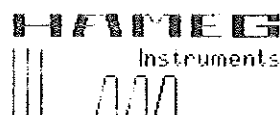


Figura 3.3.2. Transitorio de conexión R2LC.

En este caso, tomamos medidas ^{con el cursor} de todos los picos del voltaje para comprobar posteriormente el decaimiento exponencial de la amplitud V_r con el tiempo.

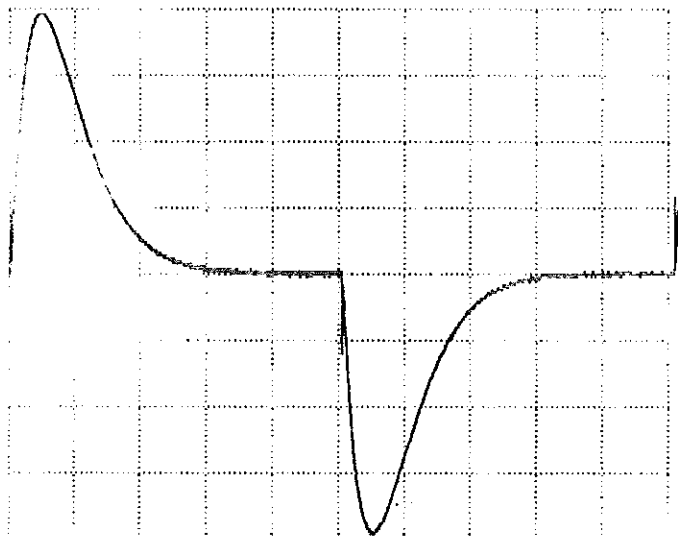
| $t \pm 0,02 \text{ ms}$ | $V_r \pm 0,004 \text{ V}$ |
|-------------------------|---------------------------|
| 0,65 | 0,408 |
| 2,12 | - 0,240 |
| 3,59 | 0,148 |
| 5,04 | - 0,084 |
| 6,49 | 0,056 |
| 7,96 | - 0,028 |
| 9,42 | 0,020 |
| 10,91 $\pm 0,04$ | - 0,008 |
| 12,28 $\pm 0,04$ | 0,008 |
| 13,85 $\pm 0,04$ | - 0,004 |
| 15,23 $\pm 0,06$ | 0,004 |

Las últimas medidas, debido al ruido de la señal y la baja amplitud (casi totalmente amortiguadas), tienen un error relativo muy grande.

Los valores de T_{20} tienen mucho error debido al error de L , pero los valores se superponen sus errores. Si utilizamos el valor de L de 3.2,
 $T_{R1} = 2,93 \pm 0,06 \text{ mH}$
 $T_{R2} = 2,86 \pm 0,06 \text{ mH}$, valor que ajustan con más precisión a lo esperado.

| Circuito | R_3 LC: | T (ms) | f_c (Hz) | ϵ (V) |
|---------------------------|-----------|------------------|----------------|-----------------|
| $f = 1 \text{ kHz}$ 99 | | $10,18 \pm 0,05$ | $98,2 \pm 0,5$ | $2,98 \pm 0,02$ |

→ No hay oscilaciones
 ↳ muy amortiguado



DATE: 01-01-1990
 TIME: 02:15:12

SIGNALPARAMETER:

CH2 - VOLTS/DIV: = 0.5V
 TIMEBASE-SEC/DIV: = 1ms
 TRIGGERLEVEL EXT: = -0.0040
 PRETRIGGER: 0%
 DELTA CURSOR: OFF
 ADD CH1,CH2: OFF

PRINTERPARAMETER:

ZOOMRANGE - CH2: 0-9
 HARD COPY SOURCE: HM 408

REMARKS:



Figura 3.3.3 Transitorios de conexión y desconexión R₃LC.

En los tres casos, las frecuencias experimentales son compatibles con las marcadas en el generador, aproximadamente

Las gráficas correspondientes a R_1 y R_2 son similares, de hecho las oscilaciones observables tienen el mismo periodo, aunque a mayor R mayor decaimiento de la amplitud en función del tiempo, con lo que se llega antes al estado estacionario (con corriente 0 debido a que el condensador actúa como cortocircuito en régimen de continua).

Para R_3 , el estado estacionario se alcanza sin oscilación alguna, lo que previsiblemente se deba a un rápido amortiguamiento por el elevado valor de R_3 . En la gráfica se observan ambos transitorios (que son una reflexión en el eje horizontal el uno respecto a otro).

En efecto, si calculamos (según la ecuación (12)) Z para R_3/LC , este valor es real, lo que implica que no hay sobreamortiguamiento, pero que para las otras dos resistencias, el valor es mayor y se producen oscilaciones amortiguadas. En las que sí llega a apreciarse una oscilación.

$$\approx 4LC - R^2C^2$$

R_1 $1 \cdot 10^{-6}$ → valores reales, no hay sobreamortiguamiento, pero
 R_2 $5 \cdot 10^{-7}$ → R cada vez más pequeñas, que implica Z y decaimiento más rápido
 R_3 $1 \cdot 10^{-7}$

El tiempo que tarda en alcanzarse el estado estacionario es menor a mayores resistencias, con lo que se aumenta la frecuencia de la onda cuadrada, para observar mejor los transitorios a mayores R , como se observa en las tablas. Esto concuerda con la ley $Z \propto \frac{1}{R}$, $Z = L/2R$.

En este circuito, al haber corriente continua, el estacionario es 0 por el condensador, pero en la conexión el condensador y la bobina se retroalimentan y provocan que la corriente vaya variando con el tiempo ($u > 0$), con lo que se da la oscilación el condensador no cortocircuita. La amortiguación de la señal viene dada por la presencia de resistencias en el circuito, que disipan energía.

El periodo de las oscilaciones en R_1 y R_2 se puede comparar con la aproximación $T_{teo} = 2\pi\sqrt{LC}$, cuando se cumple que $R^2C^2 \ll 4LC$, tomando R como $R_1 + R_2$.

$$(R_1 + R_2)^2 C^2 \approx 7 \cdot 10^{-9} \ll 1,0 \cdot 10^{-6}$$

$$(R_1 + R_2)^2 C^2 \approx 2 \cdot 10^{-9} < 1,0 \cdot 10^{-6}$$

La aproximación será más válida en el caso de R_1 . (< error relativo)

El hecho de que el amortiguamiento sea mayor a mayor resistencia, como se ha explicado y apreciado, se corresponde a la ecuación (14), en la que se observa la dependencia de Z con la inversa de R . $Z = \frac{2L}{R}$
 El valor experimental de Z se puede obtener mediante el ajuste R de la curva de amplitudes por ordenador.
 El valor teórico se puede calcular con L_{eo} .

4a) RC

Impedancia del generador: $r = 50 \Omega$

$C_{nom} = 47 nF$

| R | Z (μs) | Zteo (μs) | Zr (μs) | C (nF) |
|----------------|---------------|------------------|----------------|------------|
| R ₁ | 22,61 ± 0,03 | 21,3 ± 0,5 | 24,3 ± 0,5 | 43,7 ± 0,4 |
| R ₂ | 80,23 ± 0,07 | 84 ± 2 | 86 ± 2 | 43,8 ± 0,4 |
| R ₃ | 892 ± 7 | 840 ± 20 | 850 ± 20 | 45,1 ± 0,4 |

Se observa que el valor de Z medido (a partir de $t_{1/2}$) es mayor a mayor R, siguiendo la ecuación Z CC R, $Z = RC$. No obstante, el valor teórico esperado Zr a partir de la medida de R y los valores nominales de r y C difiere considerablemente del experimental. Considerando que r no tiene error, podemos calcular C y compararlo con el valor nominal mediante $C = Z/R$. Los valores obtenidos tienen una desviación sistemática respecto al nominal, por lo que podemos concluir que el valor de C nominal tiene un error mayor del 1nF estimado en los cálculos de Zteo. Una manera más fiable de estimar estos parámetros es mediante un ajuste por mínimos cuadrados a partir de varios puntos y no sólo uno, como es el caso de $t_{1/2}$.

Según 4bis, $V_R = R \cdot I = \frac{\epsilon}{1 + \frac{t}{\tau}} e^{-t/\tau} \approx V_0 \cdot e^{-t/\tau} + V_{min}$ (2 parámetros) inicialmente se observa error

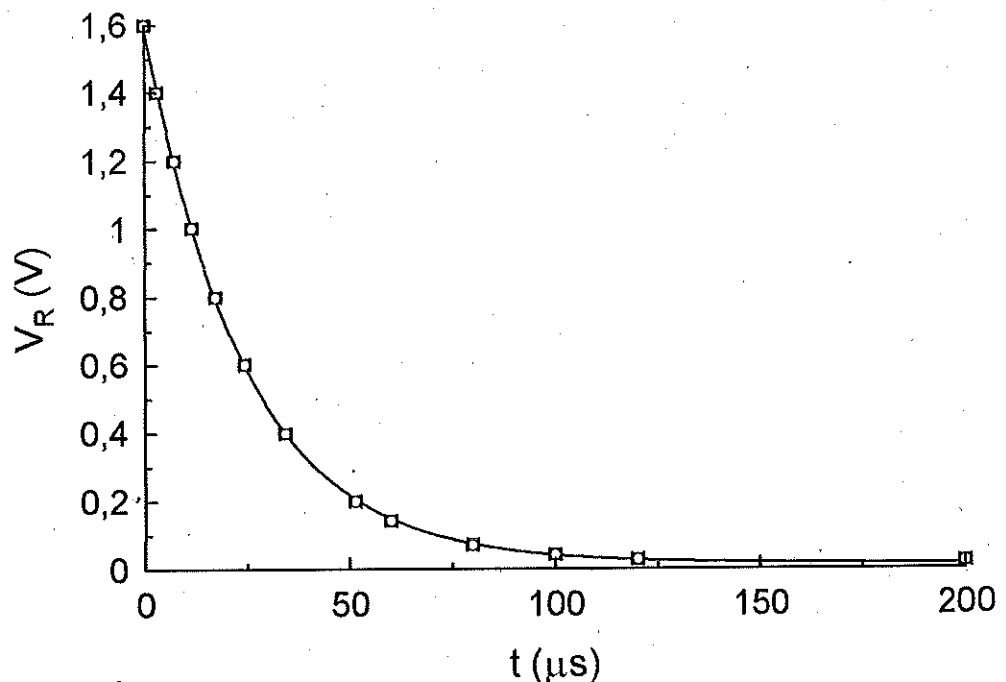


Figura 4a: Tensión en los bornes de una resistencia en un circuito RC alimentado por un generador de función de onda cuadrada (transitorio de conexión).

Ecuación: $V_R = V_0 \exp(-t/\tau) + V_{min}$

Resultados del ajuste: $mcc = 0,9999$

$V_0 = 1,576 \pm 0,007 \text{ V}$ (1,561 - 1,591) (95%)

$\tau = 24,3 \pm 0,3 \mu s$ (23,7 - 25,0)

$V_{min} = 0,015 \pm 0,005 \text{ V}$ (0,005 - 0,026)

Al realizar dicho ajuste para R_1 , el valor de τ sí es compatible con τ_1 :

$$\tau_{aj} = 24,3 \pm 0,3 \mu s \leftrightarrow \tau_r = 24,3 \pm 0,5 \mu s \rightarrow C = 47,0 \pm 0,7 nF \leftrightarrow G = 47 nF \checkmark$$

(De ahora en adelante siempre tendremos en cuenta a r).

En consecuencia, podemos afirmar que el procedimiento experimental más preciso es el ajuste por mínimos cuadrados, pues empleas varias medidas, y los valores obtenidos sí son compatibles. Además, el ajuste te permite corregir el incógnito centrado de la gráfica entre 0 y V_R dependiendo un grado más de libertad (parámetro de error de cero).

Si repetimos el proceso para R_2 y R_3 , es probable que obtuviésemos valores más cercanos al valor nominal que el obtenido a partir de t/τ . Si calculamos $E = V_0 (1 + \frac{r}{R}) = 1,745 \pm 0,019 V$, es consistente con el Exp. \checkmark
 $= 1,78 \pm 0,02 V$.

$$4b) L = \tau_0(L+r+R_0) \quad \tau_r = L/(r+R_0)$$

| R | τ (ms) | τ_r (ms) | L (H) | $L_{teo} = 5,4 \pm 1,1 H$ |
|-------|-------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| R_1 | $2,31 \pm 0,14$ | $2,9 \pm 0,6$ | $4,3 \pm 0,3$ | |
| R_2 | $1,49 \pm 0,03$ | $1,7 \pm 0,3$ | $4,61 \pm 0,13$ | \checkmark |
| R_3 | $0,245 \pm 0,014$ | $0,28 \pm 0,08$ | $4,7 \pm 0,3$ | ¿ |

Se observan valores compatibles, cuyas barras de error se solapan, debido al error predominante de L. Se podría mejorar con un pic de ref. De nuevo, a partir del ajuste podemos determinar τ con mayor fiabilidad, según 7bis: $V_R = R \cdot I = RE / (r+R+R_0) \cdot [1 - \exp(-t/\tau)] \approx V_0 [1 - e^{-t/\tau}] + V_{min}$

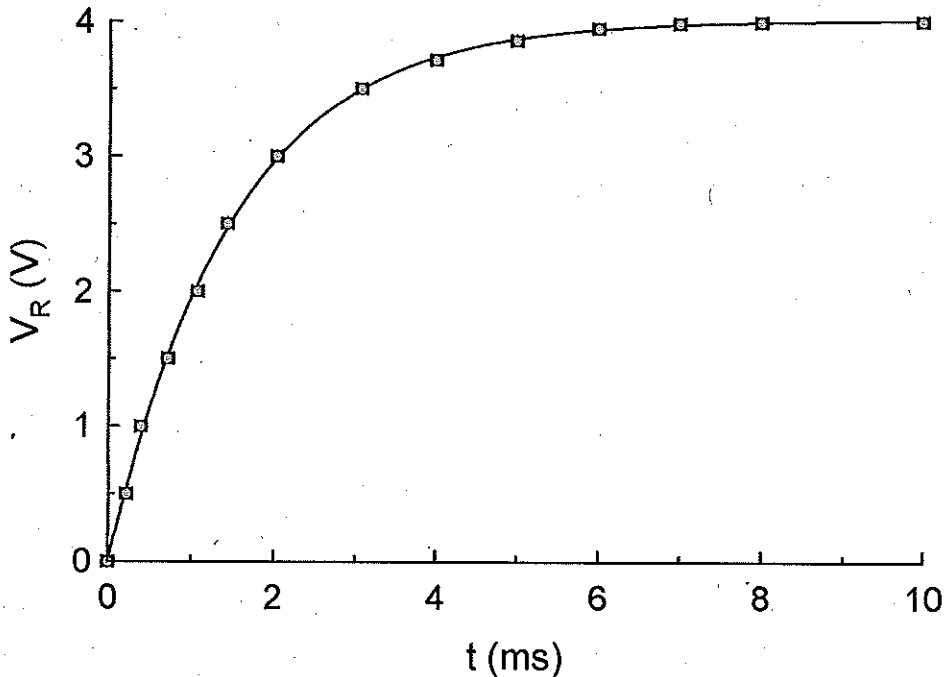


Figura 4b: Tensión en los bornes de una resistencia en un circuito RL alimentado por un generador de función de onda cuadrada (transitorio de conexión).

Ecuación: $V_R = V_0 [1 - \exp(-t/\tau)] + V_{min}$

Resultados del ajuste: $mcc = 0,9998$

$V_0 = 4,01 \pm 0,03 V$ (3,95 - 4,07)

$\tau = 1,49 \pm 0,03 ms$ (1,44 - 1,55)

$V_{min} = 0,00 \pm 0,02 V$ (-0,05 - +0,05)

Datos Figura 4a

| t (μ s) | d(t) | V _R (V) | d(V _R) |
|--------------|------|--------------------|--------------------|
| 0,0 | 1,4 | 1,600 | 0,014 |
| 2,8 | 1,4 | 1,400 | 0,014 |
| 7,1 | 1,4 | 1,200 | 0,014 |
| 11,4 | 1,4 | 1,000 | 0,014 |
| 17,1 | 1,4 | 0,800 | 0,014 |
| 24,3 | 1,4 | 0,600 | 0,014 |
| 34,3 | 1,4 | 0,400 | 0,014 |
| 51,4 | 1,4 | 0,200 | 0,014 |
| 60,0 | 1,4 | 0,143 | 0,014 |
| 80,0 | 1,4 | 0,071 | 0,014 |
| 100,0 | 1,4 | 0,043 | 0,014 |
| 120,0 | 1,4 | 0,029 | 0,014 |
| 200,0 | 1,4 | 0,021 | 0,014 |

Datos Figura 4c

| t (ms) | d(t) | V _R (V) | d(V _R) |
|--------|------|--------------------|--------------------|
| 0,65 | 0,02 | 0,408 | 0,004 |
| 2,12 | 0,02 | 0,24 | 0,004 |
| 3,59 | 0,02 | 0,148 | 0,004 |
| 5,04 | 0,02 | 0,084 | 0,004 |
| 6,49 | 0,02 | 0,056 | 0,004 |
| 7,96 | 0,02 | 0,028 | 0,004 |
| 9,42 | 0,02 | 0,02 | 0,004 |
| 10,91 | 0,04 | 0,008 | 0,004 |
| 12,28 | 0,04 | 0,008 | 0,004 |
| 13,85 | 0,04 | 0,004 | 0,004 |
| 15,23 | 0,06 | 0,004 | 0,004 |

Datos Figura 4b

| t (ms) | d(t) | V _R (V) | d(V _R) |
|--------|------|--------------------|--------------------|
| 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,04 |
| 0,21 | 0,07 | 0,50 | 0,04 |
| 0,39 | 0,07 | 1,00 | 0,04 |
| 0,71 | 0,07 | 1,50 | 0,04 |
| 1,07 | 0,07 | 2,00 | 0,04 |
| 1,43 | 0,07 | 2,50 | 0,04 |
| 2,04 | 0,07 | 3,00 | 0,04 |
| 3,07 | 0,07 | 3,50 | 0,04 |
| 4,00 | 0,07 | 3,71 | 0,04 |
| 5,00 | 0,07 | 3,86 | 0,04 |
| 6,00 | 0,07 | 3,95 | 0,04 |
| 7,00 | 0,07 | 3,98 | 0,04 |
| 8,00 | 0,07 | 3,99 | 0,04 |
| 10,00 | 0,07 | 4,00 | 0,04 |

- a ordenador?

El valor de Z obtenido para el circuito RL tiene un margen de incertidumbre que engloba al obtenido mediante $t_{1/2}$, y que les es compatible con Z_0 . En principio, el valor del ajuste es más fiable.

$$E_{aj} = V_0 \cdot (1 + (r + R_0)/R) = 7,19 \pm 0,15 \text{ V, compatible con } E_{exp} = 7,04 \pm 0,05 \text{ V}$$

Por tanto, la mejor estimación de L será:

$$L = Z_{aj} \cdot (R + r + R_0) = 4,77 \pm 0,14 \text{ H}$$

Este valor es compatible con los tres calculados a partir de $t_{1/2}$, pero tiene mayor fiabilidad al haberse tomado varios puntos. Además, se acerca más al teórico.

En cuanto a Z , hemos comprobado que disminuye cuanto mayor es la resistencia, pues sigue una ley $Z \propto 1/R$, $Z = L/R$, lo cual se ha comprobado experimentalmente verificando que L es constante para varios R . En cuanto al error de cero, esta vez es insignificante, pues visiblemente se aprecia que 0 y V_{max} están mejor ajustadas que en el circuito RC.

4c)

$$\text{Según (13) y (14), } V_R = R \cdot I = R \cdot E / \omega \cdot e^{-t/\tau} \sin \omega t, \quad Z = 2L / (R + r + R_0) \\ \omega = \sqrt{4LC - (R + r + R_0)^2} / 2LC$$

Si ω es real, el comportamiento sería el de una oscilación armónica amortiguada, como sucede para RC y RL. Si ω es complejo, el sistema estará sobreamortiguado y no habrá oscilaciones. Si $\omega = 0$, el amortiguamiento es crítico y el sistema alcanzará el estado estacionario en el menor tiempo posible. Tomando el valor de L a partir del ajuste:

| R | $\omega_{exp} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ | $\omega \text{ (s}^{-1}\text{)}$ | $\omega_{aprox} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ |
|-------|--|----------------------------------|--|
| R_1 | 2161 ± 6 | 2100 ± 40 | 2110 ± 40 |
| R_2 | 2157 ± 5 | 2090 ± 40 | |
| R_3 | \emptyset | 530 ± 150 | |

justo
aprox
fórmula entera

Para R_1 y R_2 , los valores obtenidos son compatibles con ω_{exp} , y es válida la aproximación $\omega = 1/\sqrt{LC}$ ya que $R^2 C^2 \ll 4LC$, como se ha detallado antes.

Para R_3 , el valor es compatible con lo esperado. El hecho es que no se observan oscilaciones, con lo que el valor sería cercano a $\omega = 0 \text{ s}^{-1}$, que correspondería al amortiguamiento crítico. Teóricamente, a partir de los datos experimentales de C , L y R , se esperaría el amortiguamiento crítico para un valor mayor del R , sobre los $18,73 \text{ k}\Omega$ y no $17,94 \text{ k}\Omega$. Por tanto, para R_3 todavía no se ha llegado al amortiguamiento crítico, como era de esperar, y no se llega a ver más del 1/4 de oscilación debido al rápido amortiguamiento.

Una manera fiable de medir Z y obtener L de nuevo es representando el decaimiento exponencial de la amplitud en las oscilaciones amortiguadas RLC. Según los datos medidos con el osciloscopio, el ajuste a $|V_R| = R|I| = \frac{\epsilon \cdot R}{Z\omega} e^{-t/\tau} \left| \sin \frac{\omega t + \pi/2}{\omega} \right| \approx V_0 \cdot e^{-t/\tau}$.

A partir del valor $Z_{aj} = 2,84 \pm 0,03 \text{ ms}$, podemos calcular L :
 $Z = 2L/(R+r+R_0) \rightarrow L = Z(R+R_0+r)/2$

$L_{aj} = 4,54 \pm 0,10 \text{ H}$, valor compatible con el calculado anteriormente.
 $L_{ant} = 4,77 \pm 0,14 \text{ H}$.

A partir de V_0 podemos despejar también L :

$$L_{aj} = \frac{\epsilon \cdot R}{\omega \cdot V_0}, \text{ donde } \epsilon, R \text{ y } \omega \text{ son datos experimentales}$$

$L_{aj} = 4,61 \pm 0,07 \text{ H}$, valor consistente con los restantes y con el esperado según las dimensiones de L .

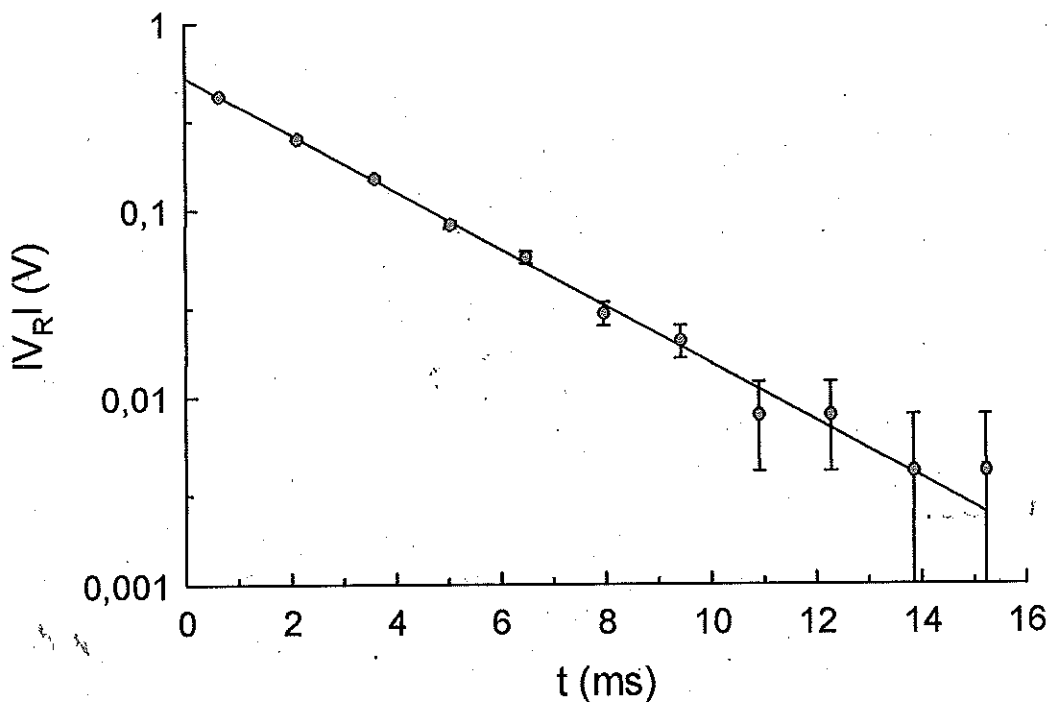


Figura 4c: Amplitud en los picos de la tensión en los bornes de una resistencia en un circuito RLC (oscilaciones amortiguadas) alimentado por un generador de función de onda cuadrada. Escala semi-logarítmica (eje vertical).

Ecuación: $|V_R| = V_0 \exp(-t/\tau)$

Resultados del ajuste: $mcc = 0,9998$

$V_0 = 0,512 \pm 0,004 \text{ V}$ (0,503 - 0,521)
 $\tau = 2,84 \pm 0,03 \text{ ms}$ (2,77 - 2,91)

1000 us
 ¿será?
 ¿algunas magnitudes?

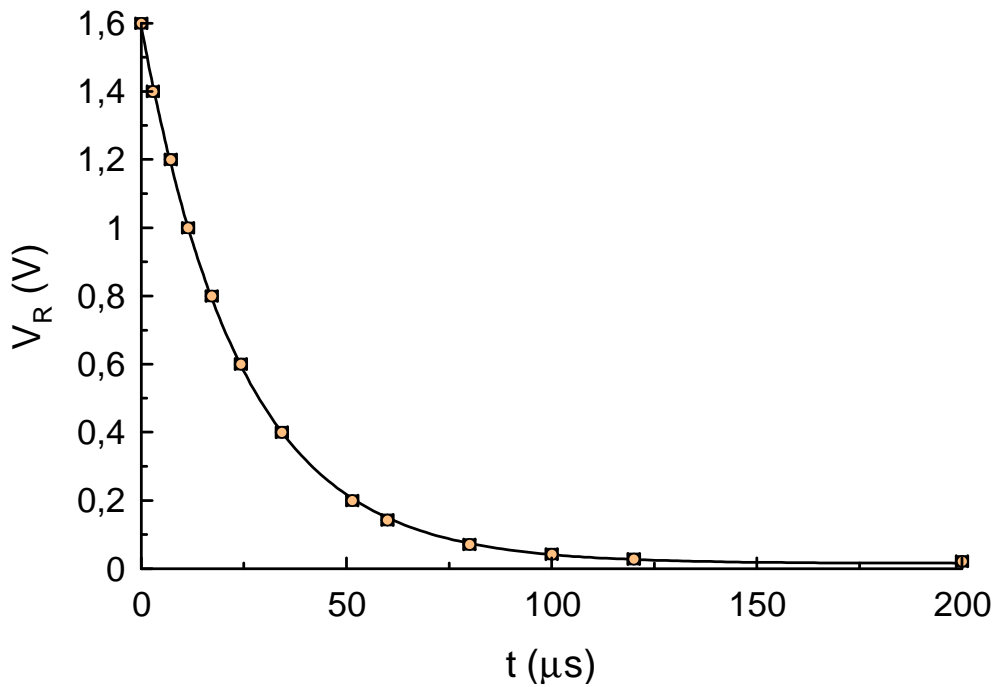


Figura 4a: Tensión en los bornes de una resistencia en un circuito RC alimentado por un generador de función de onda cuadrada (transitorio de conexión).

Ecuación: $V_R = V_0 \exp(-t/\tau) + V_{\min}$

Resultados del ajuste: $mcc = 0,9999$

| | | |
|--|-------------------|----------|
| $V_0 = 1,576 \pm 0,007 \text{ V}$ | $(1,561 - 1,591)$ | (95%) |
| $\tau = 24,3 \pm 0,3 \mu\text{s}$ | $(23,7 - 25,0)$ | |
| $V_{\min} = 0,015 \pm 0,005 \text{ V}$ | $(0,005 - 0,026)$ | |

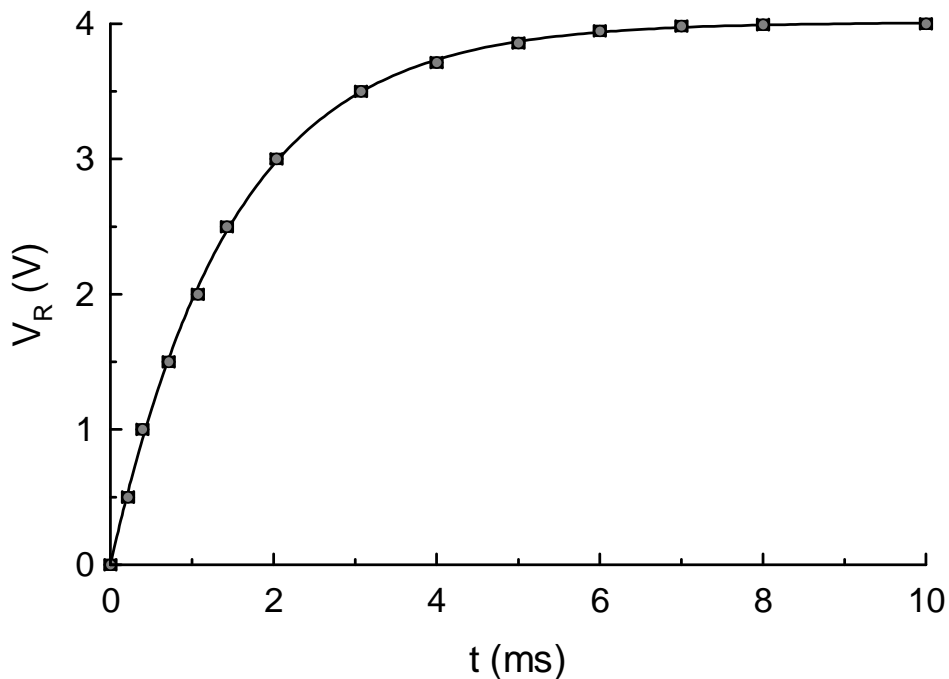


Figura 4b: Tensión en los bornes de una resistencia en un circuito RL alimentado por un generador de función de onda cuadrada (transitorio de conexión).

Ecuación: $V_R = V_0 [1 - \exp(-t/\tau)] + V_{\min}$

Resultados del ajuste: $mcc = 0,9998$

| | |
|--------------------------------------|-------------------|
| $V_0 = 4,01 \pm 0,03 \text{ V}$ | $(3,95 - 4,07)$ |
| $\tau = 1,49 \pm 0,03 \text{ ms}$ | $(1,44 - 1,55)$ |
| $V_{\min} = 0,00 \pm 0,02 \text{ V}$ | $(-0,05 - +0,05)$ |

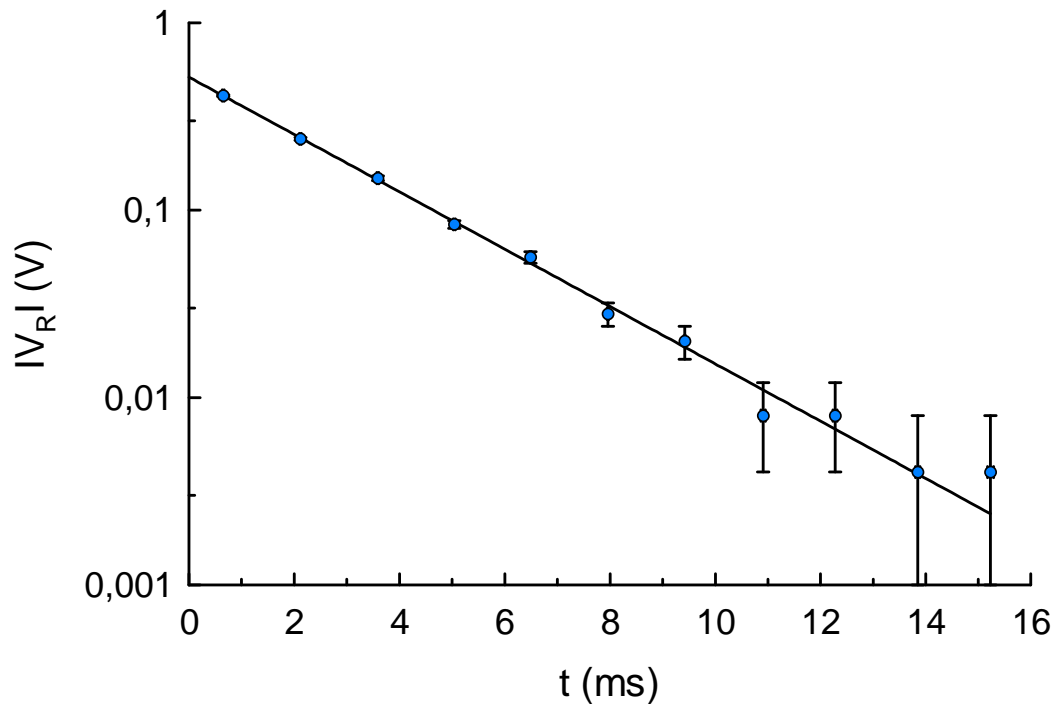


Figura 4c: Amplitud en los picos de la tensión en los bornes de una resistencia en un circuito RLC (oscilaciones amortiguadas) alimentado por un generador de función de onda cuadrada.

Escala semi-logarítmica (eje vertical).

Ecuación: $|V_R| = V_0 \exp(-t/\tau)$

Resultados del ajuste: $mcc = 0,9998$

$V_0 = 0,512 \pm 0,004 \text{ V}$ (0,503 – 0,521)

$\tau = 2,84 \pm 0,03 \text{ ms}$ (2,77 – 2,91)