
CIRCUÍTOS DE CORRENTE ALTERNA

Docencia de laboratorio, Grao en enxeñería Civil e Robótica. EPSE de Lugo. USC.

Neste experimento investigaremos o comportamento, así como as principais propiedades e características, de tres configuracións serie: RL , RC e RLC . A parte analítica do experimento confrontarase coas medidas obtidas co osciloscopio e o multímetro.

Índice

1. Obxectivos	3
2. Material dispoñible no laboratorio	3
3. Material que debe traer o alumno	3
4. Fundamentos teóricos	3
4.1. Desfase entre dúas sinais	4
4.2. Diagramas de fasores	6
4.2.1. Elemento resistivo	7
4.2.2. Elemento inductivo	7
4.2.3. Elemento capacitivo	8
4.2.4. Resumo	9
4.2.5. Combinación serie dos elementos RLC	9
4.3. Representación das magnitudes físicas mediante números complexos	10
4.3.1. Exemplo de como resolver circuitos serie de CA	11
4.4. Estado de resonancia nun circuito RLC serie	12
5. Parte experimental	13
5.1. Análise do comportamento dun circuito RL	13
5.2. Análise do comportamento dun circuito RC	15
5.3. Circuito RLC e resonancia	16
5.3.1. Análise do comportamento dun circuito RLC	16
5.3.2. Estudo do estado resonante do circuito RLC	16
A. Programa Python que recolle datos porto serie e os representa dinamicamente	18

1. Obxectivos

- Estudar o comportamento de distintas combinacións serie RLC .
- Verificar experimentalmente as leis que os rexén.
- Aprender a utilizar o osciloscopio para obter medidas de interese nun circuío.
- Estudar como varía o comportamento dun circuío serie RLC fronte frecuencia e detectar o estado singular de resonancia.

2. Material dispoñible no laboratorio

- Aparellos de medida: osciloscopio e multímetro.
- Xerador de funcións de amplitude e frecuencia variable.
- Fontes de alimentación de corrente continua.
- Paca de inserción.
- Clasificador con elementos pasivos necesarios.
- Placa Arduino e un ordenador.
- Folla Excel coas expresións analíticas necesarias para resolver os circuítos analiticamente.

3. Material que debe traer o alumno

- Guión da práctica, lapis e papel.
- Un pendrive (por comodidade pero non obrigatorio).

4. Fundamentos teóricos

Os circuítos de corrente alterna sinusoidal (CA) son de gran importancia tecnolóxica na sociedade actual. Non temos máis que pensar que a totalidade da enerxía eléctrica que se xera en todo o mundo, tanto para as industrias como para uso doméstico, é deste tipo. Unha das causas polas que se impuxo a CA fronte a corrente continua (CC) foi a simplicidade mecánica dun xerador de CA. Este dispositivo funciona mediante a rotación dunha bobina dentro dun campo magnético estático a velocidade angular constante ω . Debido a este movemento, indúcese unha forza electromotriz (f.e.m.) que varía sinusoidalmente co tempo:

$$V(t) = V_m \sin(\omega t), \quad (1)$$

onde V_m é voltaxe máximo ou valor de pico (Figura 1) e $\omega = 2\pi f$ é a frecuencia angular (rad/s), sendo f a frecuencia expresada en Hertzios (Hz).

Resulta interesante preguntarse se existiría un valor de voltaxe (ou de corrente) continuo e que produza un ritmo de xeración de calor, nunha resistencia, igual ao valor de tensión

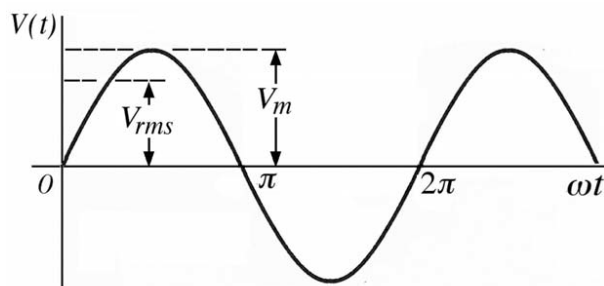


Figura 1: Valor máximo (V_m) e valor eficaz (V_{rms}) dunha sinal sinusoidal.

(corrente) de CA. A resposta é afirmativa, e a este valor chamámoslle valor eficaz (raíz cadrática media). Se o achamos para correntes alternas sinusoidais obtemos que:

$$V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}. \quad (2)$$

Nas especificacións de voltaxe dunha fonte alterna, sempre se fai referencia á voltaxe eficaz. Así, cando dicimos que a voltaxe da rede doméstica é de 220 V, isto corresponde a unha voltaxe pico de $220 \cdot \sqrt{2} = 311$ V.

Nota: O multímetro, en corrente alterna, mide valores eficaces.

4.1. Desfase entre dúas sinais

Cando dúas ondas teñen a *mesma* frecuencia pero os seus valores máximos e mínimos suceden en tempos distintos, dise que están desfasadas. O ángulo comprendido entre dous puntos análogos (φ) das ondas denomínase ángulo de desfase e pode calcularse a partir da medida de tempo t (Figura 2) realizada directamente no osciloscopio mediante unha proporción directa:

$$\phi = \frac{2\pi \cdot t}{T}(\text{rad}) = \frac{360 \cdot t}{T}(\text{graus}), \quad (3)$$

onde T é o período da sinal (igual para as dúas). Se $\phi < 0$ implica un atraso e se $\phi > 0$ implica un adianto ($\theta = \omega \cdot t + \phi$ onde $\omega = \frac{2\pi}{T}$)

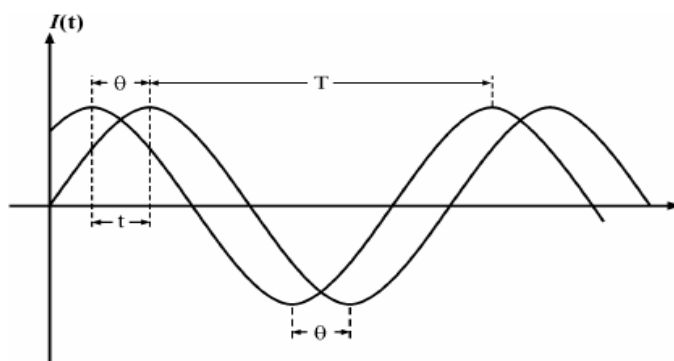


Figura 2: Desfase entre dúas sinais sinusoidais.

Outra maneira de medir o desfase entre as dúas sinais é empregar a función XY do osciloscopio. Conectamos as sinais de interés ao canal 1 e 2 e na pantalla aparecerá unha figura de Lissajous (a forma dependerá da frecuencia das sinais e do desfase).

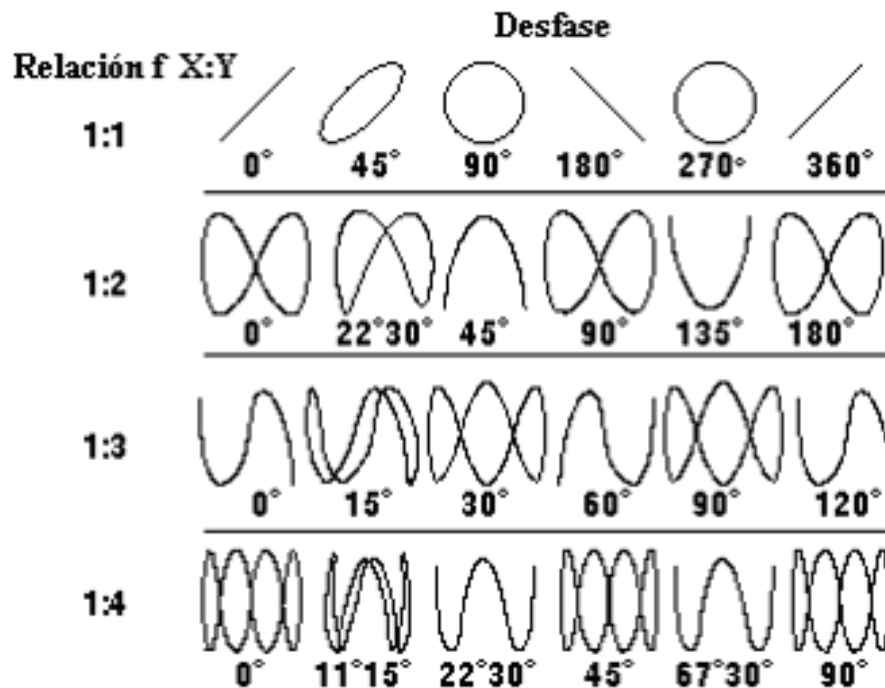


Figura 3: *Figuras de Lissajous.*

Para sinais harmónicas da mesma frecuencia obteremos unha elipse con distinta xeometría (primeira fila da Figura 3). Medindo os parámetros **a** e **b** mostrados na Figura 4 podemos obter o desfase como,

$$\sin \phi = \frac{a}{b}. \quad (4)$$

Para medir os valores de **b** (altura máxima do lóbulo) podemos utilizar o desprazamento horizontal, sen embargo, para medir **a** (intersección da elipse co eixe Y) temos que asegurarnos que a elipse esta ben centrada (comprobamos que ás sinais están perfectamente mondados sobre o eixe X antes de compoñelas en modo XY) e na mesma escala vertical.

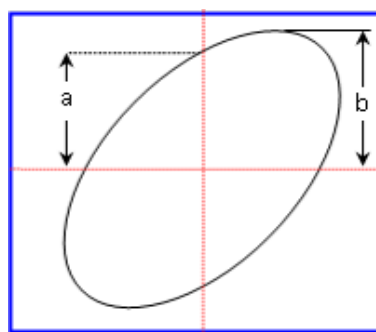


Figura 4: *Medida do desfase con figuras de Lissajous.*

Na seguinte figura danse algúns exemplos que atopamos no noso experimento (sinais da mesma frecuencia pero con desfase):

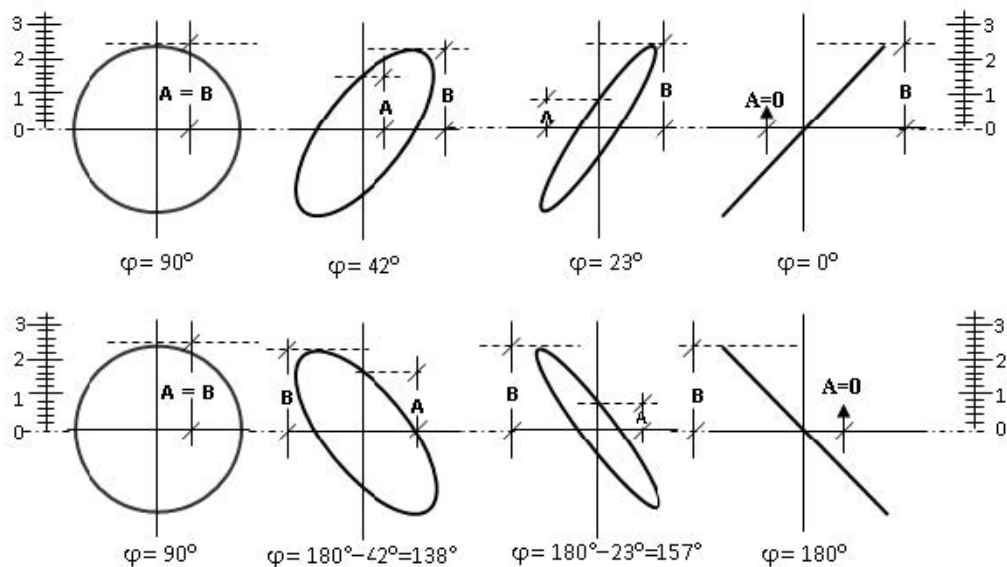


Figura 5: Figuras de Lissajous para sinais con relación de frecuencias 1:1.

4.2. Diagramas de fasores

Unha maneira práctica de representar e visualizar o comportamento relativo da corrente e o voltaxe alterno nun circuíto é mediante un diagrama de fasores. Un fasor é un vector xiratorio cunha frecuencia angular constante ω , no sentido contrario ás agullas do reloxo (Figura 6), e que ten as seguintes propiedades:

1. O seu módulo é proporcional ao valor máximo da cantidade representada.
2. A súa proxección sobre o eixo vertical (se adoptamos o criterio de usar sinais sinusoidais) dá o valor instantáneo real da devandita cantidade .

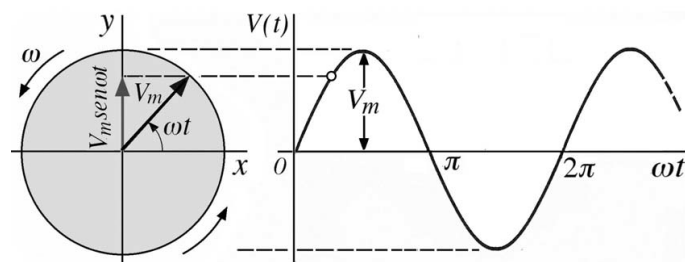


Figura 6: Representación fasorial dun voltaxe alterno.

Nun circuíto de corrente alterna, que é unha combinación de elementos activos (xeradores e motores) e elementos pasivos (resistencias, bobinas e condensadores), a descrición fasorial proporciona unha visión xeométrica clara do papel de cada un dos elementos no circuíto.

4.2.1. Elemento resistivo

Consideremos unha resistencia como único elemento do circuito (Figura 7), de modo que a caída de potencial (voltage) a través dela é:

$$V_R = V_m \text{sen}(\omega t), \quad (5)$$

onde V_m é o voltage máximo.

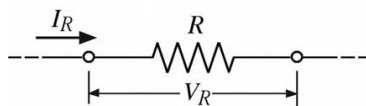


Figura 7: Elemento resistivo (R).

A corrente na resistencia é:

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_m \text{sen}(\omega t)}{R} = I_m \text{sen}(\omega t), \quad (6)$$

onde I_m é o valor máximo da corrente, $I_m = V_m/R$.

As ecuacións anteriores indican que nunha resistencia a corrente I_R e o voltage V_R acadan os seus valores cero e pico ao mesmo tempo. Logo, nunha resistencia a corrente e o voltage **están en fase**. Os seus fasores presentan a mesma dirección e sentido rotando coa mesma frecuencia angular (Figura 8). Dada esta condición, en diante, será indistinto referirse a I_R ou a V_R **como elemento de referencia**.

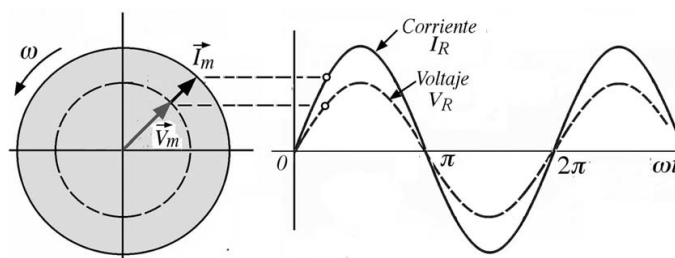


Figura 8: Nunha resistencia V_R e I_R están en fase.

Mentres isto é certo para unha resistencia, veremos que nas bobinas e nos condensadores a corrente e o voltage están desfasados.

4.2.2. Elemento inductivo

Consideremos a parte dun circuito (Figura 9) que contén unha bobina ideal de autoinductancia L (Henrios).

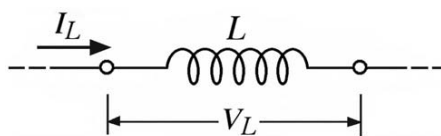


Figura 9: Elemento inductivo (L).

O voltaxe instantáneo na bobina é:

$$V_L = V_m \operatorname{sen}(\omega t). \quad (7)$$

E esta relacionado coa corrente de acordo á expresión:

$$V_L = V_m \operatorname{sen}(\omega t) = L \frac{dI_L}{dt}. \quad (8)$$

Para obter a corrente, integramos a expresión anterior:

$$I_L = \frac{V_m}{L} \int \operatorname{sen}(\omega t) dt = -\frac{V_m}{\omega L} \cos(\omega t). \quad (9)$$

Empregando a identidade $\cos(\omega t) = -\operatorname{sen}(\omega t - \pi/2)$, a ecuación anterior pode expresarse

$$I_L = \left(\frac{V_m}{\omega L} \right) \operatorname{sen} \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (10)$$

Polo tanto, nunha bobina, a corrente atrasase en 90° con respecto á voltaxe (**entre os seus extremos**), ou ben o voltaxe adiantase en $\pi/2$ con respecto á corrente (Figura 10).

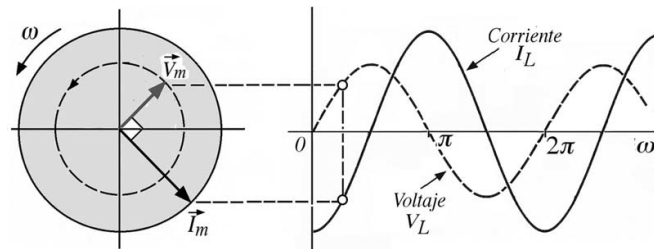


Figura 10: Nunha bobina I_L atrasase 90° con respecto a V_L .

A corrente máxima na bobina ven dada pola relación:

$$I_m = \frac{V_m}{\omega L} = \frac{V_m}{X_L}, \quad (11)$$

onde a $X_L = \omega L$ denomínase reactancia indutiva. A reactancia é análoga á resistencia e mídese nas mesmas unidades (Ohmios) pero *depende* da frecuencia.

4.2.3. Elemento capacitivo

Consideremos a parte dun circuío (Figura 11) que contén un condensador de capacidade C (Faradios). Se o voltaxe a través do condensador é $V_C = V_m \operatorname{sen}(\omega t)$, a carga instantánea nas placas é:

$$Q = CV_C = CV_m \operatorname{sen}(\omega t). \quad (12)$$

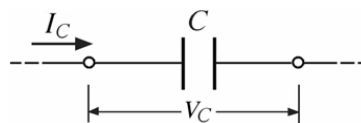


Figura 11: Elemento capacitivo (C).

Posto que a corrente no condensador é a variación da carga nas súas placas con respecto ao tempo (velocidade), temos:

$$I_C = \frac{dQ}{dt} = \omega C V_m \cos(\omega t). \quad (13)$$

Utilizando a identidade trigonométrica $\cos(\omega t) = \sin(\omega t + \pi/2)$, podemos escribir a ecuación anterior na forma

$$I_C = \omega C V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (14)$$

Logo, nun condensador a corrente adiantase 90° respecto ao voltaxe nos seus extremos, ou ben o voltaxe atrasase 90° con respecto á corrente (Figura 12).

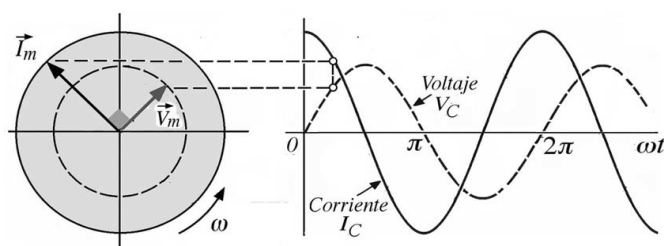


Figura 12: Nun condensador a corrente I_C adiantase 90° respecto a V_C .

A corrente máxima no condensador está dada pola relación:

$$I_m = \omega C V_m = \frac{V_m}{X_C}, \quad (15)$$

onde $X_C = 1/(\omega C)$ denomínase reactancia capacitiva (Ohmios). En xeral, fálase da impedancia dun circuío para incluír tanto as resistencias como reactancias.

4.2.4. Resumo

Elemento	Lei Ohm	I respecto V
Resistencia	$V_m = I_m R$	en fase
Bobina	$V_m = I_m X_L$	atrasase 90°
Condensador	$V_m = I_m X_C$	adiantase 90°

4.2.5. Combinación serie dos elementos RLC

Nun circuío serie RLC , a corrente I en cada elemento é a **mesma** para calquera instante e o voltaxe V_R na resistencia *está en fase con dita corrente* (Figura 8). Por outra banda, o voltaxe na bobina V_L adiantase respecto á corrente en 90° (Figura 10), mentres que o voltaxe no condensador V_C atrasase respecto da corrente en 90° (Figura 12).

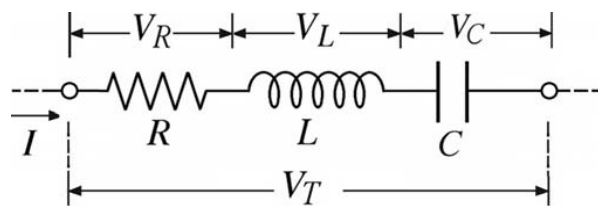


Figura 13: *Combinación serie dos elementos RLC.*

Tomando en conta a Figura 13, e usando a representación fasorial, o voltaxe resultante obtense mediante a expresión *vectorial*:

$$\bar{V}_T = \bar{V}_R + \bar{V}_L + \bar{V}_C. \quad (16)$$

Como indica a Figura 14(a), os fasores V_L e V_C apuntan en sentidos opostos e o fasor resultante entre eles é a diferenza: $V_{LC} = V_L - V_C$ (Figura 14(b)).

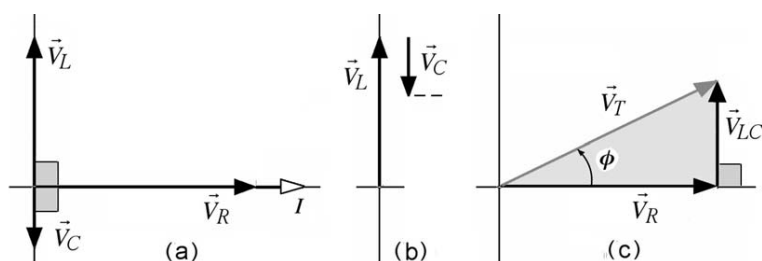


Figura 14: *Representación fasorial dun circuito serie RLC.*

Como en todo instante temporal, os fasores V_{LC} e V_R quedan en ángulo recto, Figura 14(c), o módulo do fasor voltaxe total será:

$$V_T = \sqrt{V_R^2 + V_{LC}^2} = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2}. \quad (17)$$

Substituíndo $V_R = IR$, $V_L = I X_L$ e $V_C = I X_C$, podemos escribir o voltaxe total en termos da corrente:

$$V_T = \sqrt{V_R^2 + V_{LC}^2} = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2} = IZ, \quad (18)$$

onde o módulo da impedancia total do circuito (Z) é:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad (19)$$

e o ángulo de desfase entre a corrente e o voltaxe (coincide co argumento da impedancia) ven dado por:

$$\tan(\phi) = \frac{X_L - X_C}{R}. \quad (20)$$

4.3. Representación das magnitudes físicas mediante números complexos

De acordo coa fórmula de Euler, podemos facer unha representación complexa das magnitudes estudadas anteriores dado que todas elas, nun circuito, varían sinusoidalmente e teñen a *mesma* frecuencia angular ω .

$$I(t) = I_O e^{j\omega t}, \quad V_R = V_{OR} e^{j\omega t}, \quad V_C = V_{OC} e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})}, \quad V_L = V_{OL} e^{j(\omega t + \frac{\pi}{2})}, \quad (21)$$

sendo $V_{OR} = I_O R$, $V_{OC} = I_O X_C$, $V_{OL} = I_O X_L$.

A impedancia é a relación entre a tensión nos extremos da agrupación de elementos do circuíto e a corrente que circula por ela:

$$Z = \frac{V_O}{I_O} = \frac{V(t)}{I(t)} = \frac{V_{ef}}{I_{ef}}. \quad (22)$$

De aquí pódese establecerse:

$$V_R = I(t) Z_R, \quad V_C = I(t) Z_C, \quad V_L = I(t) Z_L, \quad (23)$$

onde

$$I(t) = I_O e^{j\omega t}, \quad Z_R = R, \quad Z_C = X_C e^{-j\omega t}, \quad Z_L = X_L e^{j\omega t}. \quad (24)$$

Polo tanto, a representación fasorial permítenos empregar a álgebra de números complexos e obter expresións similares para as lei de Ohm e de Kirchhoff que as atopadas en CC (lembra que temos que operar segundo as regras dos números complexos!).

4.3.1. Exemplo de como resolver circuitos serie de CA

Na resolución de circuitos CA, os procedementos a utilizar son similares a os empregados en circuitos CC, considerando neste caso que as cantidades son expresadas como números complexos.

Co fin de simplificar a notación, escribiremos un complexo, $C = a + bi$, en forma polar como $M \angle \phi$, onde $M = \sqrt{a^2 + b^2}$ é o módulo e $\phi = \tan(b/a)$ é o argumento ou ángulo que forma o número complexo co eixo real.

Atendendo ao anteriormente exposto podemos escribir as impedancias como

$$Z_R = R \angle 0^\circ, \quad Z_C = \frac{1}{\omega C} \angle -90^\circ, \quad Z_L = \omega L \angle 90^\circ.$$

Se os tres elementos están conectados en serie a impedancia equivalente será, simplemente, a suma en forma binómica: $Z = R + j(\omega L - 1/(\omega C))$, a cal pode ser expresada como $Z = |Z| \angle \phi$, onde:

$$|Z| = \left[R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{e} \quad \phi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \right). \quad (25)$$

Se empregamos a primeira lei de Kirchhoff:

$$V_O = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2} \quad \text{e} \quad \phi = \arctan \left(\frac{V_L - V_C}{V_R} \right). \quad (26)$$

Empregando a lei de Ohm podemos escribir:

$$I_O = \frac{V_R}{X_R}, \quad I_O = \frac{V_L}{X_L}, \quad I_O = \frac{V_C}{X_C} \quad \text{xa que} \quad I_R = I_L = I_C = I_O, \quad (27)$$

$$\Rightarrow V_O = \sqrt{I_O^2 \cdot X_R^2 + (X_L - X_C)^2 \cdot I_O^2} \Rightarrow I_O = \frac{V_O}{\sqrt{X_R^2 + (X_L - X_C)^2}}, \quad (28)$$

sendo

$$\phi = \arctan \left(\frac{X_L - X_C}{X_R} \right). \quad (29)$$

4.4. Estado de resonancia nun circuito RLC serie

Nun circuito RLC serie existe unha frecuencia angular para a que se cumpre que $V_L = V_C$ (ou equivalentemente $X_L = X_C$), é dicir, o desfase é nulo ($\phi = 0$) e a corrente é máxima. Tamén podemos afirmar que un circuito está en resonancia cando o seu factor de potencia, $\cos \phi = 1$. Este estado aparece para unha determinada frecuencia, f_o , na que se igualan as reactancias da bobina e do condensador:

$$X_L = X_C \rightarrow 2\pi f_o L = \frac{1}{2\pi f_o C} \rightarrow f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (30)$$

Baixo condicións de resonancia, a tensión de entrada e a corrente están en fase. A impedancia non ten compoñente reactiva e cumpre que $Z = R$ (toma o mínimo valor), polo que a corrente en resonancia I_o toma o valor (máximo) de:

$$I_o = \frac{V}{R}. \quad (31)$$

Se tomásemos o caso ideal sen resistencia externa, unha bobina pura ($R_L = 0$) e un condensador en serie, teríamos que para a frecuencia de resonancia a impedancia $Z = 0$, co que a corrente toma un valor infinitamente grande. Logo, para o caso ideal a resonancia actúa como un cortocircuíto (físicamente a bobina sempre ten unha pequena resistencia que limita a I a un valor alto pero finito).

Dado que a corrente en resonancia é $I_o = V/R$, temos que:

$$V_R = I_o R = \frac{V}{R} R = V, \quad (32)$$

$$V_L = V_C = I X_L = I X_C, \quad (33)$$

facendo o cociente obteremos:

$$\frac{V_L}{V_R} = \frac{I_o X_L}{I_o R} = \frac{X_L}{R} = Q \rightarrow V_L = Q V_R, \quad (34)$$

$$\frac{V_C}{V_R} = \frac{I_o X_C}{I_o R} = \frac{X_C}{R} = \frac{X_L}{R} = Q \rightarrow V_C = Q V_R, \quad (35)$$

onde chamaremos a Q factor de calidade do circuíto. Polo tanto, na frecuencia de resonancia, a tensión xerada tanto no condensador como na bobina é Q veces a tensión da fonte V . Na seguinte Figura 15, amosamos un gráfico aproximado do comportamento da corrente fronte á frecuencia, onde se pode observar que existe un valor máximo I_0 para o cal a pulsación de resonancia é $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. Aquí, o sistema produce as mínimas perdas de enerxía. Outro aspecto de importancia a observar na Figura 15 é que, a maior resistencia no circuíto RLC , menor será o ancho da curva. **Este ancho é o que caracteriza o factor de calidade Q** , o cal é adimensional e o definimos coma o cociente entre a reactancia

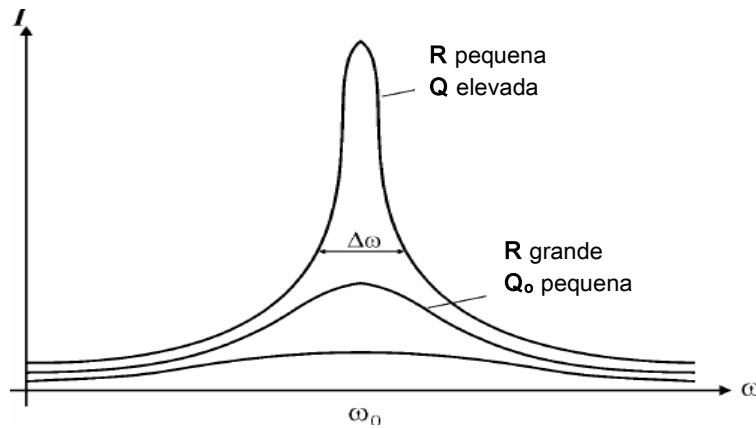


Figura 15: Curvas resoantes en función do seu factor de calidade Q .

indutiva e a resistencia baixo a frecuencia de resonancia:

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{L\omega_o}{R}. \quad (36)$$

5. Parte experimental

5.1. Análise do comportamento dun circuío RL

Neste apartado estudaremos o comportamento dun circuío (Figura 16) serie RL , tanto analiticamente como experimentalmente. Como primeiro paso, o grupo de traballo debe seleccionar do clasificador aportado as compoñentes pasivas que vas usar e mede os seus valores co polímetro. A continuación, realizaremos os seguintes pasos:

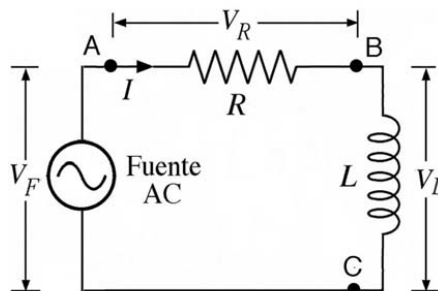


Figura 16: Circuío RL .

1. Estudar como resolver analiticamente o circuío que nos ocupa empregando as expresións da sección 4.3.1. Unha vez entendidas, coa axuda do Excel aportado, obtede os valores teóricos de todos os parámetros importantes do circuío. Para obter a solución, supoñemos que temos unha sinal de entrada sinusoidal cunha amplitude de 5 V e unha frecuencia de 10 000 Hz.
2. Montar o circuío (Figura 16) cos elementos pasivos seleccionados e as condicións establecidas no punto anterior (tipo de sinal, amplitude e frecuencia). A continuación, alimenta o circuío e mide directamente co osciloscopio (empregamos as canles CH1 e CH2) os valores experimentais das magnitudes de interese que poidas (amplitudes,

valores pico a pico, eficaces, desfases, frecuencia, período, etc.). Constrúe unha táboa cos valores teóricos e experimentais.

O profesor de laboratorio explicaravos como funciona o osciloscopio e o procedemento para obter as medidas das sinais. A continuación, no grupo de traballo colocará as sondas do aparello e realizará as medidas. Para facilitar o experimento, aportamos as seguintes pistas:

Pista 1 Na figura (Figura 17) amosamos a disposición das sondas do osciloscopio para realizar medidas no circuíto RL. É moi importante ter coidado coa conexión a terra das sondas do osciloscopio. O noso xerador de función e o osciloscopio están conectados a mesma terra de servizo do edificio (aparells aterrados e non flotantes), quedando establecido o punto de referencia común internamente, sendo a saída da fonte A marcada na Figura 17 o punto de terra (non o podemos cambiar!). É importante comprender isto porque se fixáramos a terra das sondas dos osciloscopio no punto B, produciríase un cortocircuíto entre A e B anulando a compoñente R e alterando o circuíto. Só poderíamos establecer puntos de referencias distintos se empregamos un osciloscopio *flotante* respecto da fonte (osciloscopio a baterías, *p. ex.*) ou se o aparello dispón dunha entrada diferencial.

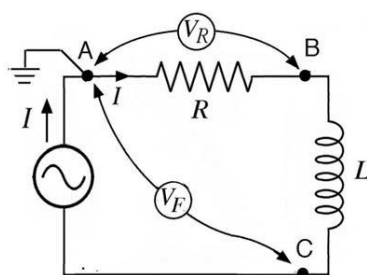


Figura 17: Colocación das sondas do osciloscopio no circuíto.

Pista 2 A diferenza de fase ϕ entre dúas sinais (ver Figura 18) determinámola medindo o desprazamento temporal δ en comparación co período L, dun ciclo mediante a seguinte relación lineal:

$$\phi = 360 \frac{\delta}{L}.$$

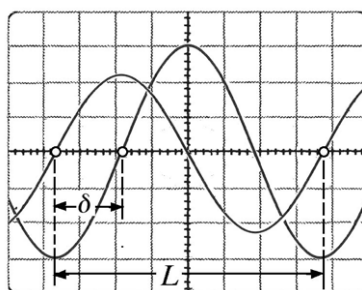


Figura 18: Visualización no osciloscopio de dúas sinais desfasadas.

Obter tamén o desfase empregando as figuras de Lissajous (Figura 5) indicando os parámetros medidos e demostrando que as medidas son equivalente.

3. Dado que non podo cambiar o punto de terra do circuíto, pero si o orden dos elementos, podería medir V_L e medir o desfase fronte a V_F ?
4. Son lóxicos os valores obtidos para as tensións nos elementos pasivos? son moi dispares? porque?
5. Podería medir a corrente que circula polo circuíto empregando o osciloscopio?, Para circuítos máis complexos, como farías para medir a corrente que circula por cada rama do circuíto mediante o uso do osciloscopio?
6. Reduce a frecuencia do circuíto a 1 kHz e emprega o polímetro para medir os *valores eficaces* das magnitudes $V_{F_{ef}}$ e $V_{R_{ef}}$. Coinciden os valores eficaces medidos co osciloscopio e co polímetro?. Se vou aumentando a frecuencia progresivamente, que ocorre coa medida visualizada no polímetro? Cal é a razón para este desacordo?
7. Fixando de novo a frecuencia de traballo do circuíto a 10 kHz e mido no osciloscopio os valores eficaces de $V_{F_{ef}}$, $V_{L_{ef}}$ e $V_{R_{ef}}$, verifícase a relación $V_{L_{ef}} = V_{F_{ef}} - V_{R_{ef}}$? Podes explicar isto?
8. Mantendo a amplitude de alimentación fixa, estudaremos o comportamento frecuencial do circuíto medindo as amplitudes V_F , V_R e o correspondente desfase entre ámbalas sinais función da frecuencia. Realiza as representacións gráficas das magnitudes de interese fronte a frecuencia: (V_R vs f), (V_L vs f), (I vs f), (Z vs f), (ϕ_F vs f).
9. Compara as representacións teóricas dos comportamento esperado (con ©Microsoft Excel ou equivalente) das magnitudes do apartado anterior e comparas coas gráficas experimentais. Analiza e extrae conclusións.
10. A partir do estudo anterior, como explicas o comportamento de V_R a medida que a sinal V_F que aumenta a súa frecuencia. Para que pode servir este circuíto? Visualiza V_R cando introduce unha sinal cadrada de frecuencia alta. Explica este comportamento.

5.2. Análise do comportamento dun circuíto RC

Repíte o análise anterior para un circuíto RC (Figura 19).

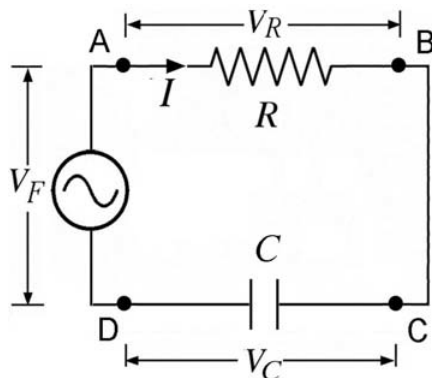


Figura 19: *Circuíto RC.*

5.3. Circuito RLC e resonancia

5.3.1. Análise do comportamento dun circuito RLC

1. Estudar como resolver analiticamente o circuito que nos ocupa empregando as expresións da sección 4.3.1. Unha vez entendidas, coa axuda do Excel aportado, obtede os valores teóricos de todos os parámetros importantes do circuito. Para obter a solución, supoñemos que temos unha sinal de entrada sinusoidal cunha amplitude de 5 V e unha frecuencia de 2000 Hz.
2. Montar o circuito RLC cos elementos pasivos seleccionados e as condicións establecidas no punto anterior (tipo de sinal, amplitude e frecuencia). A continuación, alimenta o circuito e mide directamente co osciloscopio (empregamos as canles CH1 e CH2) os valores experimentais das magnitudes de interese que poidas (amplitudes, valores pico a pico, eficaces, desfases, frecuencia, período, etc.). Constrúe unha táboa cos valores teóricos e experimentais.

Pista Na Figura 20 amosamos como colocar as sondas do osciloscopio sobre o circuito.

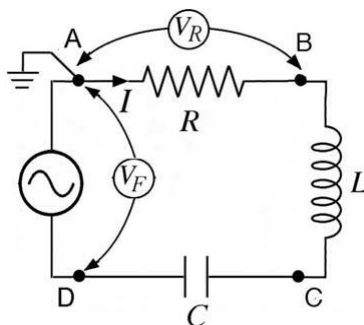


Figura 20: Colocación das sondas do osciloscopio.

3. Realiza un estudo similar ao realizado nos apartados anteriores.
4. A partir do estudo anterior, podo afirmar que o circuito RLC impide o paso (ou atenúa) tanto das sinais de frecuencias moi baixas como das moi altas?

5.3.2. Estudo do estado resonante do circuito RLC

1. Determina teoricamente a frecuencia de resonancia, f_o , do circuito. Emprega o osciloscopio para determinar f_o experimentalmente empregando as figuras de Lissajous (en modo XY). Compara valores e explica o procedemento experimental.
2. Realiza un estudo do comportamento frecuencial do circuito considerando vinte valores en torno á f_o (10 por enriba e 10 por abaixo, *p.ex.*). Controla que a amplitude permanece constante cando cambies a frecuencia no xerador. As magnitudes de interese que mediremos co osciloscopio son: V_R , I (indirectamente co osciloscopio ou directamente co polímetro) o **desfase** entre V_R (CH1) e V_F (CH2). Analiticamente obtén os valores de Z para cada frecuencia.
3. Empregando a folla ©Microsoft Excel obtén os valores teóricos de todas as magnitudes do circuito para cada frecuencia.

4. Constrúe as gráficas cos valores teóricos e experimentais de: $(V_R \text{ vs } f)$, $(I \text{ vs } f)$, $(Z \text{ vs } f)$, $(\phi_F \text{ vs } f)$.
5. Acha o factor de calidade Q , do circuíto. Analiza que implicación ten este parámetro nos valores do circuíto e quen condiciona fortemente o seu valor.
6. Que perigo corren as compoñentes do circuíto á frecuencia de resonancia? Cales son as afectadas e en que medida? Xustifica a túa resposta.
7. Que pasaría coa resposta da curva de V_R en función da frecuencia se o valor da resistencia aumentara a $1 \text{ k}\Omega$? Obtén as gráficas analiticamente $(V_R \text{ vs } f)$, $(I \text{ vs } f)$, $(Z \text{ vs } f)$, $(\phi_F \text{ vs } f)$ e comenta as diferencias atopadas respecto ao caso inicial.
8. Ao cambiar a R , modificaríase a frecuencia de resonancia? Por que?
9. Emprega a placa Arduino e o programa python (representación dinámica dos datos lidos dende o porto serie) para construír un osciloscopio moi básico. En primeiro lugar, manipula o xerador de funcións para conseguir unha sinal senoidal entre 0 e 4 V e cunha frecuencia baixa, 100 Hz (pregunta ao teu profesor de laboratorio). Asegúrate medindo co osciloscopio que esta sinal V_F esta no rango permitido para as entradas de Arduino antes de conectala a placa. A continuación, realiza un programa simple para Arduino mostree a sinal da fonte e os envíe polo porto serie para que os represente o programa python. De xeito voluntario, o alumnos poden ampliar as capacidades do programa python para que obteña datos da sinal almacenada: valor medio, período, etc. Esta actividade pode ser substituída por unha proposta realizada polos estudantes e sempre que se empregue a placa Arduino con sinais alternas.

Referencias

- [1] Jesús Fraile-Mora, *Circuitos Eléctricos. (Capítulo 2)*. Ed. Pearson, 2012.
- [2] Fdez-Vidal, Xosé R., *Apuntamentos para a materia de Física II*. Universidade de Santiago de Compostela, 2018.

A. Programa Python que recolle datos porto serie e os representa dinamicamente

```
1  #!/anaconda/bin/python python3
2  # -*- coding: utf-8 -*-
3
4  """
5  @author: Xose R. Fedez-Vidal
6  Departamento de Fisica Aplicada.
7  EPSE. Campus de Lugo.
8  USC
9  """
10 # importamos a libreria para manexar o porto serie.
11 #Para instalar o paquete: conda install pyserial
12 import serial
13 # importamos numpy
14 import numpy
15 #importamos a libreria matplotlib
16 import matplotlib.pyplot as plt
17 # conda install pip; e logo instalamos o
18 #paquete drawnow como: pip install drawnow
19 from drawnow import *
20
21
22 #Dicimoslle a matplotlib que queremos un
23 #modo interactivo para representar datos dinamicamente
24 plt.ion()
25
26 #Creamos o noso obxecto serie chamado
27 #arduinoData y asinamos a velocidade
28  #(do entorno IDE de Arduino miramos cal
29  #e o porto asignado a placa)
30 #Depende do sistema operativo empregado.
31 #Windows denota os portos serie como COM1, COM2, etc.
32 arduinoData = serial.Serial('/dev/ttyACM0', 9600)
33
34 #Variables globais de entrada e saída
35 tempS= []
36 tempE= []
37 cnt=0
38
39 #Creamos unha funcion que represente os datos
40 def makeFig():
41     #Asinamos o maximos e minimos do eixe y
42     plt.ylim(0, 5)
43     #Ponhemos o titulo
44     plt.title('Sinais E/S do DAC')
45     #ponhemos un grid na grafica
```

```

46 plt.grid(True)
47 #ponhemos as lendas de cada eixo
48 plt.ylabel('Saida (V)')
49 #representamos a saida
50 plt.plot(tempS, 'ro-', label='Saida')
51 #asinamos o lugar para a lenda
52 plt.legend(loc='upper left')
53
54 #Creamos un segundo eixo y e o mesmo que arriba
55 plt2=plt.twinx()
56 plt.ylim(0,5)
57 plt2.plot(tempE, 'b^-', label='Entrada')
58 plt2.set_ylabel('Entrada (V)')
59 plt2.ticklabel_format(useOffset=False)
60 plt2.legend(loc='upper right')
61
62 while True: # un bucle while infinito
63
64     #espera ata que haza un dato no porto serie
65     while (arduinoData.inWaiting()==0):
66         pass #non faigas nada
67
68     #lemos unha linha dende o porto serie e a float
69     tmp = arduinoData.readline().decode('ascii')
70     temp = float(tmp)
71
72     #lemos unha linha dende o porto serie e a float
73     tmp2 = arduinoData.readline().decode('ascii')
74     temp2 = float(tmp2)
75
76     #Construimos o array engadindo E e S
77     tempS.append(temp)
78     tempE.append(temp2)
79
80     # chamamos a drawnow para actualizar a nosa grafica viva
81     drawnow(makeFig)
82
83     #Pausa breve. Importante para que drawnow tenha tempo
84     plt.pause(.00001)
85
86     #Se temos mais de 150 puntos, eliminamos o primeiro do array
87     # Deste xeito sempre veremos os ultimos 150 puntos na grafica.
88     cnt=cnt+1
89     if(cnt>150):
90         tempE.pop(0)
91         tempS.pop(0)

```