

~~BRITO~~  
BRITO, 75  
228

MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA  
CENTRO TÉCNICO AEROESPACIAL  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA E QUÍMICA

PRÁTICAS DE FÍSICA  
II ANO FUNDAMENTAL

2º SEMI PERIODO — 2º SEMESTRE

LAWRENCE ROZIER HOLLAND  
ILDON GUILHERME BORCHARDT  
ALVARO FERREIRA GOMES

IDF/1973

Í N D I C E

D1 - Circuito RLC Série em Regime Estacionário

D2 - Ponte de Corrente Alternada

D3 - Difração de Ondas Eletromagnéticas: Microondas.

D4 - Laser a Gas

D5 - Determinação da Carga Específica do Eletron

D6 - Potenciais de Ionização

D7 - Efeito Fotoelétrico.

Departamento de Física  
São José dos Campos

1973

D1- CIRCUITO RLC SÉRIE EM REGIME ESTACIONÁRIO

1. INTRODUÇÃO.

Considere o circuito série RLC da Fig. 1, alimentado

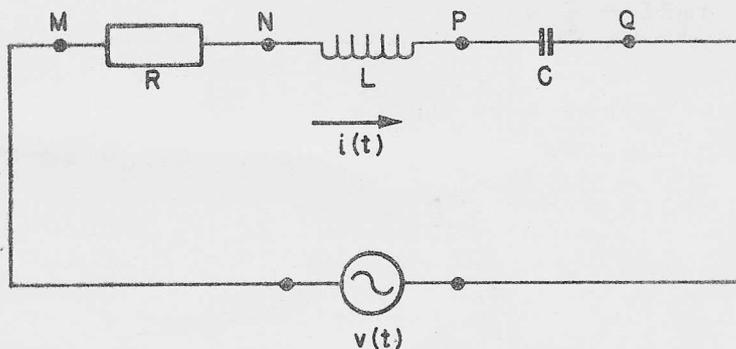


Fig. 1. Circuito RLC série em regime estacionário:  
 $v(t) = V_0 \cos \omega t$ .

por uma tensão instantânea  $v(t) = V_0 \cos \omega t$ .

Viu-se anteriormente que a equação diferencial do circuito é

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

$$\text{Se } v(t) = V_0 \cos \omega t \quad (2)$$

a solução particular de (1) para o regime estacionário, caso de oscilação forçada, é da forma

$$i(t) = I_0 \cos(\omega t - \phi) \quad (3)$$

onde  $I_0$  e  $\phi$  são constantes que dependem dos valores de R, L e C.

## 2. PARTE PRÁTICA.

2.1. Monte o circuito abaixo. CUIDADO: AS TENSÕES ENCONTRADAS PODEM SER PERIGOSAS.

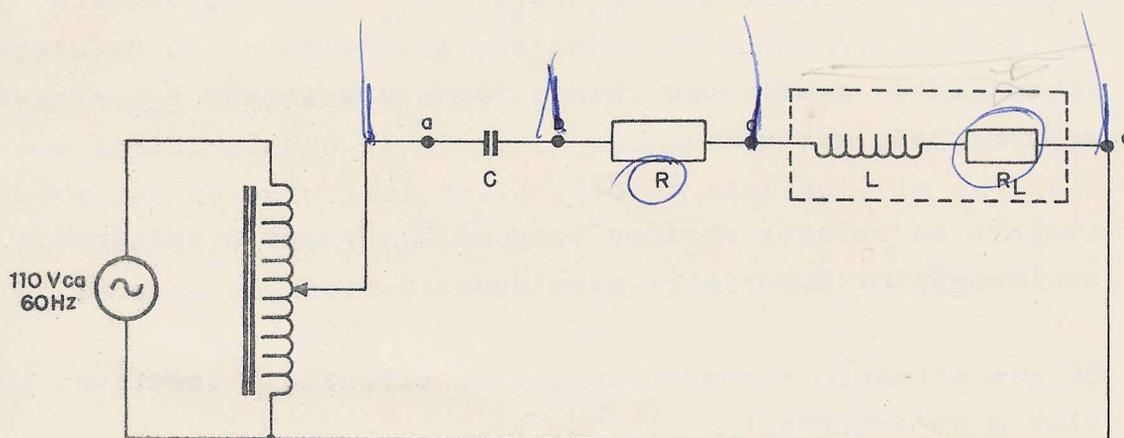


Fig. 4. O indutor entre c e d é constituído pelo primário de um transformador 110VCA - 6,3VCA.

$$C = 4\mu\text{F} \quad , \quad R = 330 \Omega.$$

- 2.2. Com o voltímetro CA fornecido meça as tensões  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  e  $V_{cd}$ , respectivamente para  $V_{ad} = 10 \text{ V}$ ,  $25 \text{ V}$  e  $80 \text{ V}$ , tabelando os resultados.
- 2.3. Anote observações relativas à temperatura dos elementos do circuito acima. Calcule a potência dissipada no resistor e capacitor, registrando no seu relatório os valores encontrados.
- 2.4. Construa numa folha quadriculada do caderno de laboratório os diagramas de fasores para cada um dos valores de  $V_{ad}$ , supondo R e C ideais.
- 2.5. Determine a partir dos diagramas 2.4 as defasagens entre a tensão e as correntes totais, pelo circuito, bem como a defasagem entre a tensão  $V_{cd}$  e a corrente total, pelo circuito.

	10 V	25	80
$V_{ab} =$	<del>5</del> V	9	55
$V_{bc}$	2,5 V	5	20
$V_{cd}$	12, V	28	110

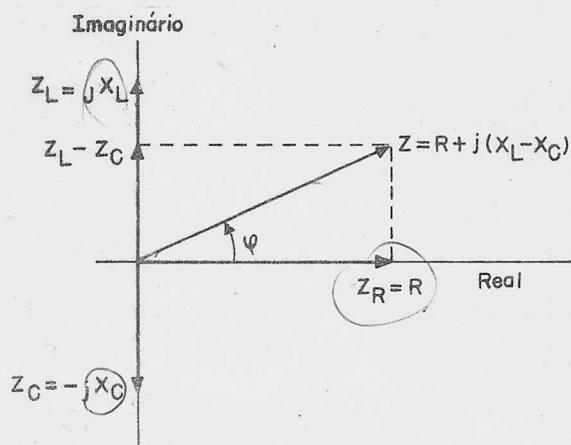
Como  $|V_L| > |V_C|$ ,  $\phi > 0$  o circuito tem um comportamento indutivo, i.ê., a tensão resultante está adiantada em relação à corrente. Se  $|V_L| < |V_C|$ ,  $\phi < 0$  o circuito teria um comportamento capacitivo, i.ê., a tensão resultante estaria atrasada com relação à corrente.

$$\text{Ora } V_R = RI, \quad V_L = jX_L I \quad \text{e} \quad V_C = -jX_C I$$

$$\text{portanto, } V = ZI = |R + j(X_L - X_C)| I.$$

O diagrama de impedâncias fornece igualmente a impedância resultante em função da impedância resistiva  $R = Z_R$ , impedância indutiva  $Z_L = j\omega L = jX_L$  e impedância capacitiva  $Z_C = -jX_C = -j\frac{1}{\omega C}$  dando ainda a defasagem entre tensão e corrente pelo circuito.

$I, A$   
 $B, A$



$$Z = \frac{R + j(X_L - X_C)}{1}$$

$$Z = \frac{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}{1}$$

Fig. 3. Diagrama de impedâncias.

1.3. Representação gráfica de tensão e de correntes num circuito em série RLC em regime estacionário, alimentado por uma tensão senoidal  $v(t) = V_0 \cos \omega t$ . Cálculo de defasagens.

Considere o circuito da Fig. 1; se  $V$ ,  $V_R$ ,  $V_C$  e  $V_L$  são as grandezas complexas que representam, respectivamente, as tensões resultantes, no resistor, no capacitor e no indutor, sendo  $\phi$  a defasagem entre a tensão total instantânea e a corrente pelo circuito, pode-se representar tais tensões num plano complexo.

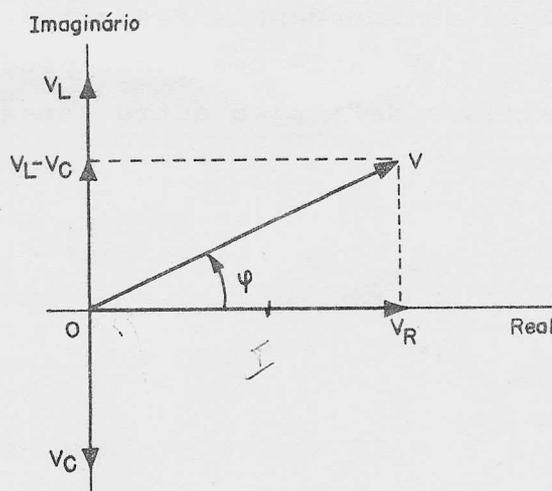


Fig. 2. Diagrama de tensões.

Viu-se que  $V_R$  e  $I$  estão em fase,  $V_L$  está adiantada de  $\pi/2$  em relação a  $I$ , e  $V_C$  está atrasada de  $\pi/2$  em relação a  $I$ . O diagrama de tensões complexas da Fig. 2, fornece ainda a defasagem  $\phi$  entre a tensão complexa resultante  $V$  e a corrente complexa  $I$  resultante.

$$Z_L = \frac{V_{oL} e^{j\omega t}}{I_{oL} e^{j(\omega t - \phi)}} = \frac{Lj\omega I_{oL} e^{j(\omega t - \phi)}}{I_{oL} e^{j(\omega t - \phi)}} = j\omega L = \omega L e^{j\frac{\pi}{2}} = jX_L \quad (10)$$

$$\text{portanto, } |Z_L| = \omega L \ (\Omega) \quad \text{e} \quad \phi = \frac{\pi}{2} \text{ rad} \quad (11)$$

se  $\omega$  é dado em rad/s e L em H.

Conclusão: A tensão instantânea  $v_L(t)$  num indutor ideal está adiantada de  $\pi/2$  rad com relação à corrente instantânea pelo mesmo. A impedância de um indutor ideal é puramente reativa, i.é.,  $Z_L = jX_L = j\omega L \ (\Omega)$ .

c) Para um capacitor ideal.

Se  $v_C(t) = \text{Re } V_{oC} e^{j\omega t}$  é a tensão instantânea nos terminais de um capacitor ideal de capacitância C e se  $i(t) = \text{Re } I_{oC} e^{j(\omega t - \phi)}$  é a corrente instantânea pelo mesmo tem-se

$$Z_C = \frac{V_C}{I_C} = \frac{V_{oC} e^{j\omega t}}{Cj\omega V_{oC} e^{j\omega t}} = \frac{1}{\omega C} e^{-j\pi/2} \quad ; \quad (12)$$

$$\text{portanto, } |Z_C| = \frac{1}{\omega C} \ (\Omega) \quad \text{e} \quad \phi = -\frac{\pi}{2} \text{ rad} \quad (13)$$

onde  $\omega$  é dado em rad/s e C em F.

Conclusão: A tensão instantânea  $v_C(t)$  nos terminais de um capacitor ideal de capacitância C, está atrasada de  $\pi/2$  em relação à corrente instantânea, pelo mesmo,  $i_C(t)$ . A impedância de um capacitor ideal é puramente reativa, i.é.,

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C} = -jX_C \quad (14)$$

da corrente pelo circuito quando ao mesmo se aplica uma tensão  $v(t)$ .

Costuma-se denominar reatância à parte imaginária da impedância. Assim  $X_L = \omega L (\Omega)$  é a reatância indutiva e  $X_C = 1/\omega C (\Omega)$  é a reatância capacitiva. Observe que  $\phi$  é a defasagem entre tensão e corrente, pelo circuito.

### 1.2.1. Impedância de elementos passivos ideais. Relação entre tensão e corrente em elementos passivos ideais.

#### a) Para um resistor ideal

Se  $v_R(t) = \text{Re } V_{oR} e^{j\omega t}$  é a tensão instantânea nos terminais de um resistor ideal de resistência  $R$  e se  $i(t) = \text{Re } I_{oR} e^{j(\omega t - \phi)}$  é a corrente instantânea por ele, tem-se

$$Z_R = \frac{V_{oR} e^{j\omega t}}{I_{oR} e^{j(\omega t - \phi)}} = \frac{R I_{oR} e^{j(\omega t - \phi)}}{I_{oR} e^{j(\omega t - \phi)}} = R \quad ; \quad (8)$$

$$\text{portanto: } X_R = 0 \quad |Z_R| = R(\Omega) \text{ e } \phi = 0 \text{ (rad)} \quad (9)$$

quando  $R$  é expresso em  $\Omega$ .

Conclusão: A tensão e a corrente num resistor ideal estão em fase. A impedância de um resistor ideal é puramente resistiva, i.é., não há reatância.

#### b) Para um indutor ideal.

Se  $v_L(t) = \text{Re } V_{oL} e^{j\omega t}$  é a tensão instantânea nos terminais de um indutor ideal de auto-indutância  $L$  e se  $i(t) = \text{Re } I_{oL} e^{j(\omega t - \phi)}$  é a corrente instantânea pelo mesmo, tem-se

Pondo

$$v(t) = \text{Re } V \quad \text{onde} \quad V = V_o e^{j\omega t} \quad (a)$$

e

$$i(t) = \text{Re } I \quad \text{onde} \quad I = I_o e^{j(\omega t - \phi)} \quad (b)$$

tem-se em (1)

$$-\omega^2 LI + j\omega RI + \frac{I}{C} = j\omega V$$

dividindo-se ambos os membros por  $j\omega I$ , tem-se

$$j\omega L + R + \frac{1}{j\omega C} = \frac{V}{I}$$

$$R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = \frac{V_o}{I_o} e^{j\phi}$$

donde

$$I_o = \frac{V_o}{\left[ R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 \right]^{1/2}}$$

$$e \quad \phi = \tan^{-1} \frac{\omega L - 1/\omega C}{R}$$

## 1.2. Conceito de impedância.

Denomina-se impedância do circuito à grandeza complexa

$$Z = \frac{V}{I} = Z_o e^{i\alpha}$$

$$\text{portanto,} \quad Z_o = |Z| = \frac{V_o}{I_o} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - 1/\omega C\right)^2} \quad (a)$$

$$e \quad \alpha = \phi = \tan^{-1} \frac{\omega L - 1/\omega C}{R} \quad (b)$$

$Z$  é medida em  $\Omega$  quando  $C$  é expresso em Farads,  $L$  em Henries,  $R$  em  $\Omega$  e  $\omega$  em rad/s. A impedância é uma grandeza característica do circuito e representa, fisicamente, uma limitação à variação

- 2.6. Calcule a partir dos diagramas 2.4, para cada valor de  $V_{ad}$ , a impedância resistiva, reatância capacitiva, reatância indutiva e L.
- 2.7. Meça com o osciloscópio  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  e  $V_{cd}$ , respectivamente para  $V_{ad} = 10\text{ V}$ ,  $25\text{ V}$  e  $80\text{ V}$  eficazes, determinando as defasagens entre tensão e corrente totais, bem como tensão  $V_{cd}$  e corrente total pelo circuito.
- 2.8. Compare os valores obtidos para  $\omega L/R_L$  usando o voltímetro e o osciloscópio. Comente os resultados.
- 2.9. Em que situação o comportamento do circuito é indutivo, resistivo e capacitivo ?
- 2.10. Anote as características e o número do transformador que utilizar nesta prática. Este mesmo transformador será utilizado noutra prática.

### 3. RELAÇÃO DE MATERIAL.

1 Varivolt

1 Capacitor de  $4\mu\text{F}$

1 Resistor de carvão de 330 e 2W com suporte

1 Transformador de filamento 110 VCA - 6,3VCA

1 Voltímetro CA com escalas até 150VCA

1 Osciloscópio.

	10	25	8
$V_{ab}$	5,7		
$V_{bc}$	2,8		
$V_{cd}$	12,3		

61  
60

D2- PONTE DE CORRENTE ALTERNADA

1. INTRODUÇÃO.

O circuito da ponte de Wheatstone utilizado na medida de resistências por comparação pode ser aplicado na medida de impedâncias complexas, desde que se substituam os braços da ponte por impedâncias e se alimente o circuito com sinal alternado; o detector de nulo será neste caso um osciloscópio ou fones ou galvanômetro com retificador, etc.

O circuito de ponte CA será o esquematizado na Fig. 1.

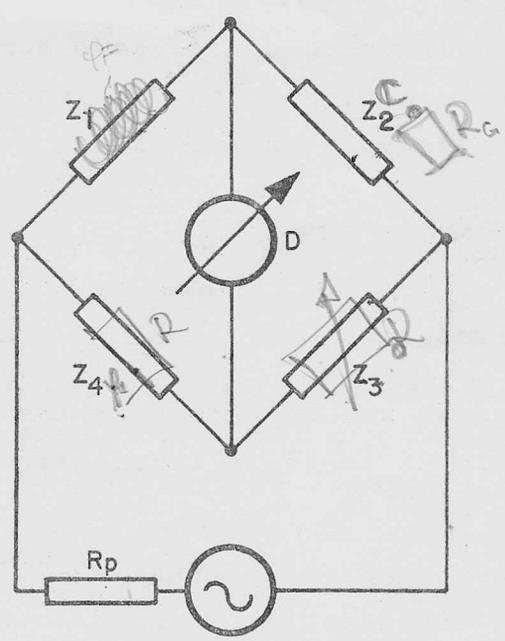


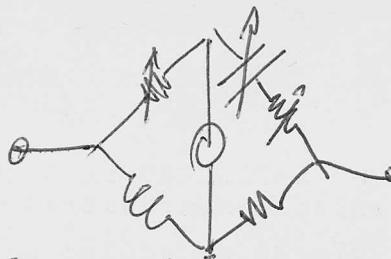
Fig. 1.

No equilíbrio tem-se:

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4 \tag{1}$$

onde

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= |Z_1| e^{j\phi_1} \\
 Z_2 &= |Z_2| e^{j\phi_2} \\
 Z_3 &= |Z_3| e^{j\phi_3} \\
 Z_4 &= |Z_4| e^{j\phi_4}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$



### 2.3. Ponte de Maxwell.

Usando para detetor de nulo um voltímetro CA e ou um osciloscópio, monte um circuito de ponte para medir a indutância do primário de um transformador 110 VCA - 6,3 VCA, utilizando um capacitor de capacitância ajustável, duas décadas de resistores, um resistor de carvão e um varivolt. A década maior deve estar em série com o capacitor ajustável.

Por que ?

O transformador a ser utilizado é o mesmo já estudado em prática anterior; é bom verificar se o número do transformador que irá utilizar nesta prática é o mesmo que o da anterior. Não se esqueça de fazer inicialmente o desenho do circuito que utilizará.

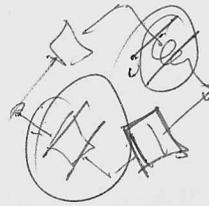
2.3.1. Desenhe o circuito utilizado e monte-o.

2.3.2. Alimente a ponte com o varivolt, medindo a tensão no transformador com o voltímetro CA. Retire o voltímetro e utilize-o como detetor de nulo, procurando o equilíbrio da ponte. Registre então, os valores de resistência das décadas de resistores, de capacitância e a leitura mínima do voltímetro com respectivo fundo de escala. A primeira tensão de alimentação da ponte será 25 VCA, igual à utilizada na prática RLC série em regime estacionário.

2.3.3. Substitua o voltímetro em 2.3.2 por um osciloscópio sincronizado na linha e repita as operações indicadas em 2.3.2.

2.3.4. Repita 2.3.2 e 2.3.3 para a segunda tensão no transformador que deverá ser 80 VCA, igual à utilizada na prática RLC série em regime estacionário.

2.3.5. Calcule  $R_L$ ,  $X_L$  e  $L$  para as duas tensões de alimentação utilizadas. Compare os valores de  $L$  e  $R_L$  obtidos nesta prática com os anteriormente determinados.



ou substituindo-se (2) em (1)

$$|Z_1 Z_3| e^{j(\phi_1 + \phi_3)} = |Z_2 Z_4| e^{j(\phi_2 + \phi_4)} \quad (3)$$

0,04  $\mu F$

A expressão (3) será verdadeira somente se

$$|Z_1| |Z_3| = |Z_2| |Z_4| \quad (a)$$

e

(4)

$$\phi_1 + \phi_3 = \phi_2 + \phi_4 \quad ; \quad (b)$$

portanto o equilíbrio da ponte é alcançado somente se as relações (a) e (b) entre os valores absolutos das impedâncias e as relações de fase forem simultaneamente satisfeitas.

## 2. PARTE PRÁTICA.



### 2.1. Explique as afirmações:

- Para se comparar uma capacitância com uma indutância, usando um circuito de ponte, é necessário colocá-las em ramos opostos.
- Para se comparar uma capacitância (indutância) com outra capacitância (indutância), usando um circuito de ponte, é necessário que estejam em ramos adjacentes.

2.2. Ponte de Schering. Usando para detetor de nulo um voltímetro CA, monte um circuito de ponte para medir uma capacitância desconhecida  $C_x$ . São fornecidos: uma década de resistores, um capacitor ajustável, um resistor de carvão de  $6,8k\Omega \pm 10\%$  e um varivolt. Não se esqueça de fazer inicialmente o desenho do circuito.

2.2.1. Desenhe o circuito utilizado e monte-o.

2.2.2. Dê o procedimento para medir  $C_x$ .

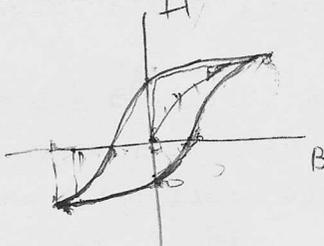
2.2.3. Dê o valor de  $C_x$  com o respectivo desvio.

2.3.6. Comente a razão de ter obtido valores distintos de  $L$  para valores distintos de tensão nos terminais do indutor.

2.3.7. Tendo em vista a curva de histerese do ferro do transformador explique a razão de ter obtido um sinal de 180 Hz na saída da ponte em equilíbrio.

Porque o detetor de nulo nunca indica zero ?

### 3. RELAÇÃO DE MATERIAL.



1 Voltímetro CA.

1 Década de resistores de  $1 \Omega$  a  $10k\Omega$ .

1 Década de resistores de  $0,1 \Omega$  a  $1k\Omega$ .

1 Capacitor ajustável até  $1\mu F$ .

1 Capacitor desconhecido.

1 Resistor de carvão de  $6,8k\Omega \pm 10\%$ .

1 Osciloscópio.

1 Transformador de filamento de 110 VCA - 6,3 VCA.

1 Varivolt.