S. R.

MINISTÉRIO DA DEFESA NACIONAL

FORÇA AÉREA PORTUGUESA

CENTRO DE FORMAÇÃO MILITAR E TÉCNICA

Curso de Formação de Praças - RC

COMPÊNDIO

FUNDAMENTOS DE ELECTRICIDADE III

EPR: NEL

CCF 335-36

Fevereiro 2009

ENTIDADE FORMADORA ACREDITADA POR DGERT DIRECÇÃO-GERAL DO EMPREGO E DAS RELAÇÕES DE TRABALHO

S. R.

MINISTÉRIO DA DEFESA NACIONAL
FORÇA AÉREA PORTUGUESA
CENTRO DE FORMAÇÃO MILITAR E TÉCNICA

CARTA DE PROMULGAÇÃO

FEVEREIRO 2009

1. O Compêndio de “Fundamentos de Electricidade III” é uma Publicação “NÃO CLASSIFICADA”.

2. Esta publicação entra em vigor logo que recebida.

3. É permitido copiar ou fazer extractos desta publicação sem autorização da entidade promulgadora.

O COMANDANTE

José Alberto Fangueiro da Mata

COR/PILAV

REGISTO DE ALTERAÇÕES

IDENTIFICAÇÃO DA ALTERAÇÃO, Nº DE REGISTO, DATA	DATA DE INTRODUÇÃO	DATA DE ENTRADA EM VIGOR	ASSINATURA, POSTO E UNIDADE DE QUEM INTRODUZIU A ALTERAÇÃO

Cursos:	Curso de Formação de Praças - RC
Nome do Compêndio:	Fundamentos de Electricidade III
Disciplina:	Fundamentos de Electricidade
Data:	Dezembro 2008
Compilado e Adaptado Por:	1SAR/ MELECT Luís Alegrio
Verificado Por:	Gabinete da Qualidade da Formação
Comando G. Formação:	TCOR/ ENGAER José Saúde
Director de Área:	MAJ/ TMMEL Abílio Carmo
Director de Curso:	TEN/ TMMEL José Martins
Formador:	1SAR/ MELECT Luís Alegrio

ATENÇÃO:

Esta publicação destina-se a apoiar os formandos a frequentarem o Curso de Formação de Praças das especialidades MELECT, MELECA, MELIAV e MMA na disciplina de Fundamentos de Electricidade.

Não pretendendo ser uma publicação exaustiva do curso em questão, apresenta-se como uma ferramenta de consulta quer durante a duração do curso, quer após a sua conclusão.

ÍNDICE

CORRENTE ALTERNADA SINUSOIDAL

CAMPO DE APLICAÇÃO E SUAS VANTAGENS

Se a nível da utilização de energia, um variado e significativo número de receptores trabalha em corrente contínua, já, a nível da cadeia de energia, a sua produção, transporte e distribuição é feita quase exclusivamente em corrente alternada.

Esta opção é assim fundamentada:

- Na etapa da produção, se compararmos em igualdade de potências um alternador e um gerador de corrente contínua, o primeiro apresenta melhor rendimento de transformação, é de construção mais simples e tem menores dimensões.
- A selecção, já justificada, de diferentes níveis de tensão ao longo de toda a cadeia de energia é facilmente realizável em corrente alternada pelos transformadores estáticos de grande e média potência nas centrais e subestações e de potência mais reduzida nos postos de transformação. Em corrente contínua tal procedimento não seria igualmente viável, dada a complexidade, custos e meios técnicos envolvidos.
- No domínio da utilização, salientamos a importância do motor de corrente alternada. Dada a simplicidade de construção, maior rendimento e menor preço que as correspondentes versões em corrente contínua, estas unidades representam uma carga importante na rede que por si só justificaria a sua distribuição em corrente alternada.
- Além disso não constitui problema de maior a alimentação de unidades de corrente contínua. Simples rectificadores de corrente, em muitos casos incorporados nos próprios receptores, como é o caso de televisores, computadores, sintonizadores, etc., permitem a sua alimentação directamente a partir da rede.

GRANDEZAS PERIÓDICAS E NÃO PERIÓDICAS

As grandezas eléctricas podem classificar-se em função do tempo como:

GRANDEZAS VARIÁVEIS - NÃO PERIÓDICAS

A corrente representada possui valores diferentes de instante para instante mas mantêm o mesmo sentido.

GRANDEZAS VARIÁVEIS – PERIÓDICAS

Uma grandeza diz-se periódica quando se verifica uma repetição das suas características ao longo do tempo. No estudo que iremos efectuar, surgir-nos-ão diversas formas de ondas periódicas. Representamos dois tipos de ondas periódicas: ondulatórias ou pulsatórias e as alternadas puras.

GRANDEZAS VARIÁVEIS – PERIÓDICAS PURAS

As ondas alternadas puras distinguem-se das ondas ondulatórias porque possuem um valor médio algébrico nulo

Numa onda alternada pura, o conjunto dos valores assumidos em cada sentido designa-se por alternância ou semi-onda. Teremos assim uma alternância positiva e uma alternância negativa.

O conjunto de duas alternâncias consecutivas designa-se por ciclo.

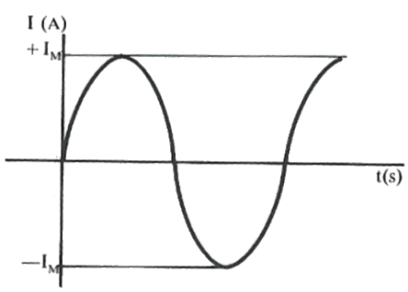
O valor assumido, em cada instante, por uma corrente ou tensão é chamado valor instantâneo, que se representa por uma letra minúscula: i, u.

Iremos agora tratar do estudo de correntes e tensões alternadas sinusoidais. A sua importância na electrónica resulta do facto de qualquer sinal periódico alternado se poder considerar como a soma de sinais alternados sinusoidais de frequências múltiplas. Convém, pois, definirmos as grandezas que caracterizam um sinal sinusoidal.

CORRENTE ALTERNADA SINUSOIDAL

DEFINIÇÃO

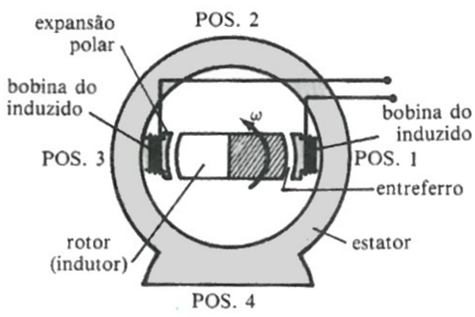
Uma corrente alternada sinusoidal é uma corrente que muda periodicamente de sentido e que evolui sinusoidalmente com o tempo.

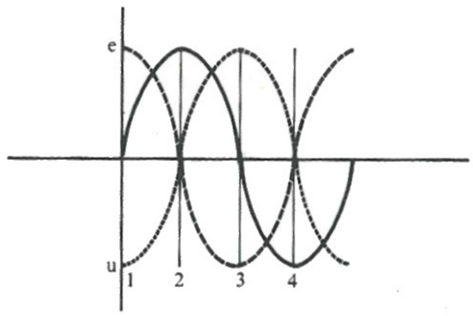


São igualmente funções sinusoidais a f.e.m. ou a tensão, pelo que se representam quer gráfica quer matematicamente, da mesma maneira.

PRODUÇÃO

A figura seguinte mostra-nos um alternador muito elementar com o qual se pode obter uma f.e.m. e, consequentemente, uma corrente deste tipo.





No essencial, este alternador é constituído por duas partes:

O INDUTOR, basicamente um íman que roda a velocidade constante no sentido indicado na figura. O indutor integra a parte rotativa da máquina, designada por rotor.

O INDUZIDO, constituído por bobinas alojadas em ranhuras existentes na parte fixa da máquina designada por estator.

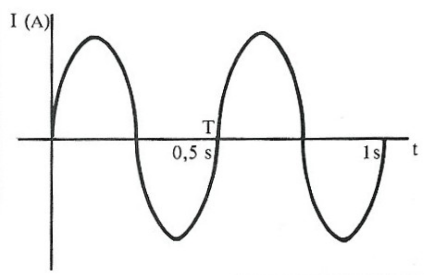
Podemos observar a variação do valor da f.e.m. gerada, em função da variação do fluxo indutor.

Quando o indutor se encontra na posição **1** ou **3**, o fluxo através da bobina do induzido é nulo mas é máxima a sua variação. Consequentemente a f.e.m. induzida atinge em **1** o seu máximo valor e em **3** o seu mínimo. Nas posições **2** e **4** o fluxo é máximo e mínimo, respectivamente. Contudo, em qualquer dos casos, a variação do fluxo é nula e nula portanto a f.e.m.

CARACTERÍSTICAS DE UMA GRANDEZA SINUSOIDAL

PERÍODO

Período é o menos intervalo de tempo T ao fim do qual há uma repetição do ciclo



No sistema internacional a unidade é o segundo.

Na figura ao lado o período da corrente representada é T=0,5s, durante o qual a onda descreveu um ciclo.

FREQUÊNCIA

Frequência é o número de ciclos que se repetem em cada segundo.

Exprime-se em ciclos por segundo (C/s) ou Hertz (Hz) e representa-se pela letra f.

A frequência é igual ao inverso do período: $f = \frac{1}{T}$

Para a corrente em questão, podia concluir-se directamente do gráfico que f=2Hz

Ou da relação anterior,

$$f = \frac{1}{0.5} = 2\,H_z$$

A frequência da corrente nas redes de energia é, em Portugal como em toda a Europa, de 50Hz. Nos Estados Unidos é de 60Hz.

Algumas redes com características especiais trabalham noutras gamas de frequência.

Em sistemas de tracção eléctrica, a frequência é de 25Hz. Esta e outras frequências relativamente baixas são produzidas por geradores síncronos.

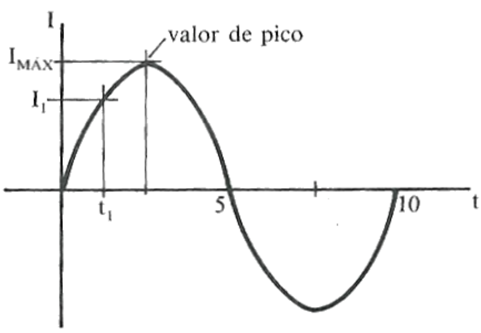
Em telecomunicações, as frequências são muitíssimo mais elevadas. A designação dessas ondas e o respectivo espectro de frequências é o seguinte:

Ondas Muito Longas *"Very low frequency"*	VLF	$3KH_z$ a $30KH_z$
Ondas Longas *"Low frequency"*	LF	$30KH_z$ a $300KH_z$

Ondas Médias *"Middle frequency"*	MF	$300KHz$ a $3MHz$
Frequências Altas *"High frequency"*	HF	$3MHz$ a $30MHz$
Frequências Muito Altas *"Very High frequency"*	VHF	$30MHz$ a $300MHz$
Frequências Ultra-Altas *"Ultra High frequency"*	UHF	$300MHz$ a $3GHz$
Frequências Super Altas *"Super High frequency"*	SHF	$3GHz$ a $30GHz$
Frequências Extra Altas *"Extra High frequency"*	EHF	$30GHz$ a $300GHz$

VALOR INSTANTÂNEO

Na figura ao lado representa-se graficamente a função $I = f(t)$, que traduz o valor da intensidade da corrente a cada momento, isto é, o seu valor instantâneo. Este será positivo na semi-onda ou alternância positiva, negativo na semi-onda ou alternância negativa, e nulo nos instantes $t = 0s$, $t = 5s$ e $t = 10s$.

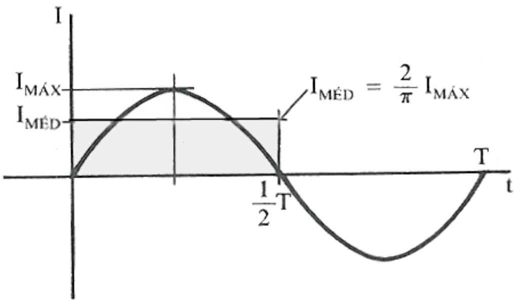


VALOR MÁXIMO ou AMPLITUDE é o máximo valor instantâneo atingido pela corrente.

Representamo-lo por $I_{Máx}$. Na figura anterior corresponde ao instante $t = 2,5\ s$. Também é chamado valor de pico ou valor de crista.

VALOR MÉDIO

O valor médio corresponde à soma algébrica dos valores instantâneos da corrente. Ao longo de um período é nulo, dada a simetria de valores em cada alternância. Interessa, portanto, referir esse valor a meio período. Ver figura ao lado.



Esse valor é inferior em 64%, aproximadamente, em relação ao valor máximo e é calculado pela expressão

$$I_{Méd} = \frac{2}{\pi} I_{Máx}$$

VALOR EFICAZ

Dado que a intensidade da corrente está continuamente a variar, o seu efeito calorífico numa resistência é inferior ao que corresponderia se ela mantivesse o seu valor máximo.

À intensidade de uma corrente contínua que, em igualdade de circunstâncias, liberta a mesma quantidade de calor chama-se INTENSIDADE EFICAZ.

A relação entre o valor máximo da intensidade da corrente e o seu valor eficaz é:

$$I = \frac{I_{Máx}}{\sqrt{2}}$$

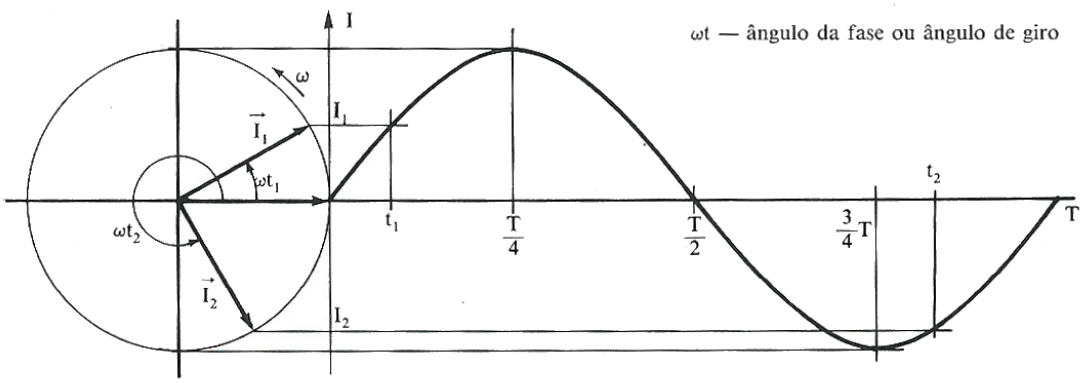
Para a f.e.m. e tensão temos expressões similares:

$$E = \frac{E_{Máx}}{\sqrt{2}}$$

É importante salientar que em AC as grandezas intensidade da corrente, tensão ou f.e.m. exprimem-se em valor eficaz. Assim, ao indicarmos uma corrente I = 5 A ou uma tensão U = 220 V, referimo-nos a valores eficazes. É este valor também que é indicado pelos aparelhos de medida.

Ao valor eficaz duma grandeza sinusoidal também se chama valor médio quadrático (r.m.s.).

REPRESENTAÇÃO VECTORIAL DE QUANTIDADES SINUSOIDAIS



Toda a grandeza ou quantidade sinusoidal pode ser representada vectorialmente. Consideremos uma corrente sinusoidal I cujo traçado, durante um período, se representa na figura anterior. Consideremos agora um círculo e, centrado na origem, um vector girante que roda com velocidade, constante no sentido da seta (sentido directo). O comprimento do vector representará, assim, a intensidade máxima da corrente.

No instante $t = 0$ considerou-se o vector coincidindo como eixo das abcissas. Decorrido um certo tempo t_1, a sua posição será a do vector $\vec{I_1}$.

Tracemos a recta projectante do vector $\vec{I_1}$ sobre o eixo das ordenadas.

Em abcissa marquemos também o tempo t_1 e por ele levantemos a perpendicular. A intersecção das duas projectantes define um ponto da sinusóide que representa o valor da intensidade no instante t_1.

Na mesma figura representou-se ainda um vector $\overrightarrow{I_2}$ correspondente a um valor sinusoidal decorridos t_2 segundos desde o início do ciclo.

Podemos assim concluir que toda a grandeza sinusoidal é representável por um vector girante cujo módulo define o seu valor máximo e a sua posição o seu valor instantâneo.

Contudo, como qualquer grandeza sinusoidal é expressa sempre em valor eficaz, nos diagramas vectoriais optou-se por ser esta a grandeza que caracteriza o vector girante e não o respectivo valor máximo.

VELOCIDADE ANGULAR

Com movimento uniforme, o vector girante, ao fim de um período, retoma a sua posição inicial. Entretanto descreveu todo o arco de circunferência, que equivale a um percurso de 2π radianos.

O quociente deste percurso angular pelo tempo em que foi realizado, o período T, define a sua velocidade angular ω, também designada por pulsação ou frequência angular.

$\omega = \frac{2\pi}{T} \Leftrightarrow$ $\Leftrightarrow \omega = 2\pi f$	Onde:	ω	*velocidade angular*	**Radianos por segundo (Rad/s)**
		T	*Período*	**Segundos (s)**
		f	*frequência*	**Hertz (Hz)**

A velocidade angular exprime-se em radianos por segundo, como decorre da própria equação de definição.

FASE

Um vector $\vec{I_1}$, com velocidade angular ω ao fim de t_1 segundos desde a sua origem rodou de um certo ângulo, dado pelo produto ωt_1. Este ângulo designa-se por ângulo de giro, ângulo de fase ou simplesmente fase. Ver figura anterior.

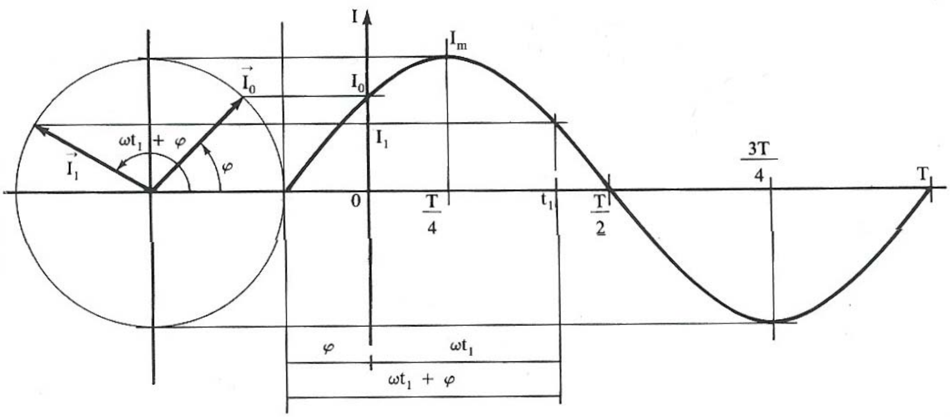
O seu valor é dado em radianos no sistema circular ou em graus no sistema sexagésimal. Como sabemos, uma circunferência tem 2π radianos, ou seja, 360º.

A cada valor do ângulo de fase corresponde um determinado vector. Este vector de fase designa-se por fasor.

Na fig. anterior os vectores $\vec{I_1}$ e $\vec{I_2}$, são, portanto, os fasores da corrente nos instantes t_1 e t_2, respectivamente.

- **Fase na origem**

Consideremos uma corrente I (fig. seguinte) que, na origem dos tempos, isto é, $t = 0\,s$, tem um determinado valor instantâneo I_0. Esta corrente começou o seu ciclo com um avanço de fase φ, que designamos por fase inicial ou fase na origem.



O fasor correspondente $\overrightarrow{I_0}$ está representado na figura seguinte. No instante t_1, por exemplo, a fase de vibração será, por conseguinte, $\omega t_1 + \varphi$, como se mostra na figura.

FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DE UMA GRANDEZA SINUSOIDAL

Qualquer grandeza sinusoidal pode representar-se por uma equação trigonométrica do tipo

$i = I_{Máx}\, sen\,(\omega t + \varphi)$	Onde:	i	*Corrente instantânea*
		$I_{Máx}$	*Corrente máxima*
		$\omega t + \varphi$	*Ângulo de fase*
		φ	*Fase na origem*

No caso de não haver fase inicial $\varphi = 0$, então a fórmula toma um aspecto mais simples:

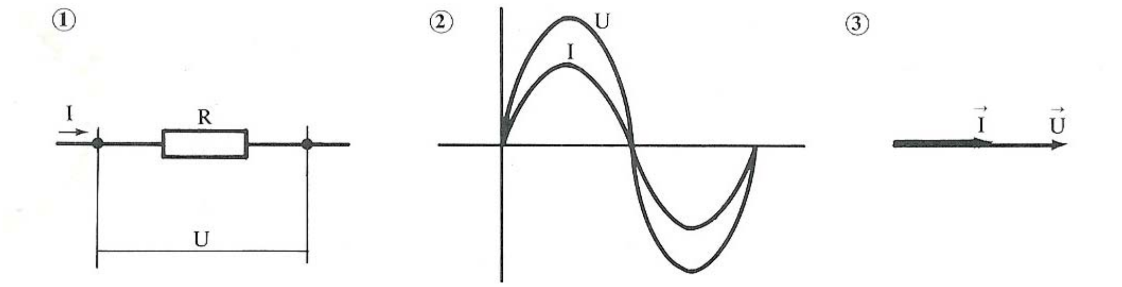
$$i = I_{Máx}\, sen\, \omega t$$

COMPORTAMENTO DE ALGUNS COMPONENTES EM C.A.

RESISTÊNCIA

O comportamento de uma resistência em c.a. não difere do seu comportamento em c.c. Faz-se igualmente a aplicação da lei de Ohm, tendo apenas em atenção, de entrarmos com os valores eficazes da intensidade da corrente e da tensão e, portanto,

$$I = \frac{V}{R}$$



Nesta situação, e como se ilustra na figura anterior, a intensidade da corrente I e a tensão U encontram-se em fase. Isto significa que ambas se anulam e atingem o valor máximo em simultâneo. Na representação vectorial destas grandezas, vemos que qualquer que seja o instante considerado, tensão e corrente são representados por dois vectores concordantes.

BOBINA PURA

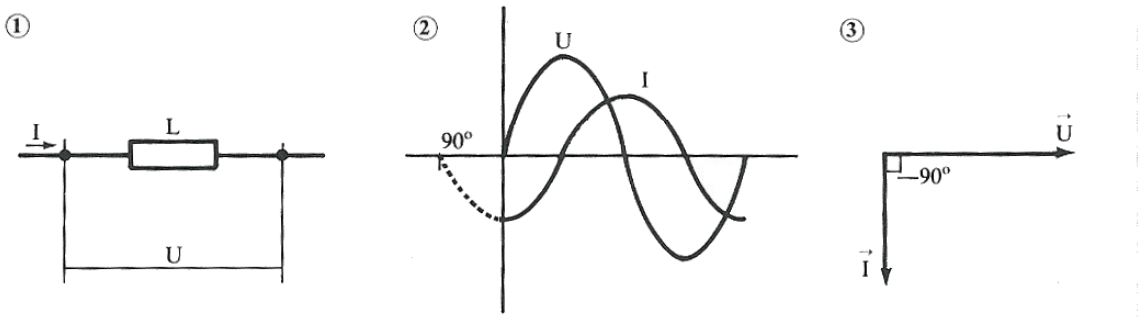
Considere-se uma bobina pura, isto é, uma bobina ideal sem resistência (figura abaixo).

Como sabemos, ela caracteriza-se por um determinado valor L, chamado coeficiente de auto-indução ou indutância.

Qualquer bobina em c.a. constitui uma oposição à passagem da corrente, que se representa por X_L e se designa por reactância indutiva. Mede-se também em ohm. Essa oposição é tanto maior quanto maior for a indutância da bobina e quanto maior for a frequência, como podemos ver pela relação seguinte:

$X_L = 2\pi f L \Leftrightarrow$ $\Leftrightarrow X_L = \omega L$	Onde:	ω	*velocidade angular*	***Radianos por segundo (Rad/s)***
		X_L	*Reactância Indutiva*	***Ohm (Ω)***
		L	*Indutância*	***Henry (H)***

Independentemente do valor dessa oposição, a corrente sofre um atraso de 90º relativamente à tensão, como se mostra na figura seguinte, em representação sinusoidal e em diagrama vectorial.



As equações para a tensão e corrente são as seguintes:

$$u = U_{máx}\, sen\omega t$$

$$i = I_{Máx}\, sen(\omega t - 90º) \qquad \varphi = -90º$$

A lei de Ohm, aplicada a uma bobina pura ou circuito puramente indutivo, é dada pela expressão

$I = \frac{V}{X_L}$	Onde:	I	*Corrente*	***Ampère (A)***
		X_L	*Reactância Indutiva*	***Ohm (Ω)***
		V	*Tensão*	***Volt (V)***

CAPACIDADE PURA

Um condensador caracteriza-se pela sua capacidade ou capacitância C. Vamos supor um condensador ideal, isto é, uma capacidade pura, sem resistência portanto.

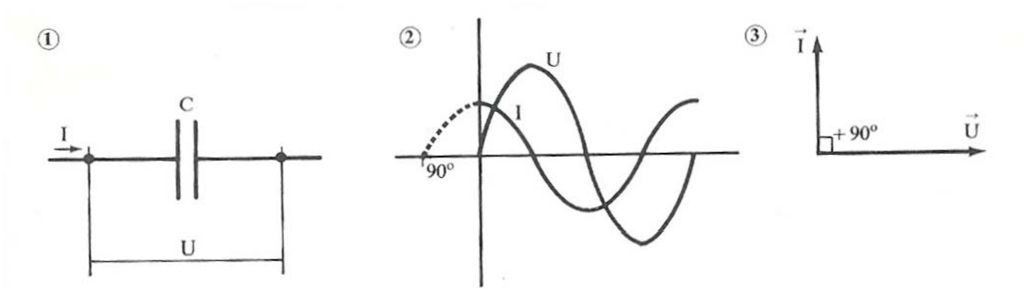
Embora desprezível na maioria dos casos, os condensadores têm uma resistência que resulta sobretudo da imperfeição do dieléctrico e ainda da rotação dos respectivos dipolos moleculares.

Qualquer condensador em c.a. constitui igualmente uma oposição à passagem da corrente, que se designa por reactância capacitiva, representa-se por X_C e exprime-se também em ohm. Essa oposição varia na razão

inversa da capacidade e da frequência e é traduzida pela relação

$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \Leftrightarrow$ $\Leftrightarrow X_C = \frac{1}{\omega C}$	Onde:	ω	*velocidade angular*	**Radianos por segundo (Rad/s)**
		X_C	*Reactância Capacitiva*	**Ohm (Ω)**
		C	*Capacidade*	**Farad (F)**

Em consequência, a corrente fica adiantada de 90º relativamente à tensão, como se pode ver na figura seguinte.



As equações da tensão e corrente são, respectivamente:

$$u = U_{máx} sen\omega t$$

$$i = I_{Máx} sen(\omega t + 90^o) \qquad \varphi = +90^o$$

Também a lei de Ohm é aqui aplicável:

$I = \frac{V}{X_c}$	Onde:	I	*Corrente*	***Ampère (A)***
		X_c	*Reactância Capacitiva*	***Ohm (Ω)***
		V	*Tensão*	***Volt (V)***

NOÇÃO DE IMPEDÂNCIA

Designa-se por IMPEDÂNCIA a oposição genérica oferecida por qualquer elemento ou circuito à passagem da corrente alternada.

Essa oposição é, como sabemos, devida fundamentalmente a resistências, indutâncias e capacidades ou a qualquer combinação destes elementos.

Representa-se pela letra Z e mede-se em ohm da mesma forma que a resistência óhmica ou qualquer reactância, seja indutiva ou capacitiva. Compreende-se que de facto seja assim, dado que, em qualquer dos casos, se pretende quantificar uma oposição à passagem da corrente, não importa a sua origem.

Sendo a impedância o resultado conjunto de resistências e reactâncias no circuito, contudo ela não é igual à soma aritmética mas sim vectorial das referidas grandezas.

Veremos oportunamente como é feito o seu cálculo.

Consoante a natureza do circuito, assim recebe designação especial, podendo incluir-se num dos seguintes tipos:

Circuito Puramente Resistivo

$$Z = R$$

A impedância é a sua própria resistência.

Circuito Puramente Indutivo

$$Z = X_L \qquad R = 0$$

A sua resistência é nula, confundindo-se a sua impedância com a própria reactância indutiva.

Circuito Puramente Capacitivo

$$Z = X_C \qquad R = 0$$

A sua resistência é nula, confundindo-se a sua impedância com a própria reactância capacitiva.

Circuito Predominantemente Indutivo

$$X_L > X_C \qquad R = 0$$

Prevalece o efeito de indutância.

Circuito Predominantemente Capacitivo

$$X_C > X_L \qquad R = 0$$

Prevalece o efeito de capacitância.

PROBLEMAS PARA RESOLVER

1. A reactância indutiva de uma indutância pura é de 9,42Ω quando ligada a uma rede de 60Hz. Determine o valor da sua indutância.

R.: 25mH

2. Numa bobina pura com um coeficiente de auto-indução de $0{,}007H$ circula uma corrente sinusoidal com o valor máximo de $14{,}1\,A$. Determine a tensão aos terminais da bobina sabendo que a frequência da corrente é de $50\,Hz$.

R.: $V = 31V$

3. Um condensador de 20μF é alimentado a uma tensão de 220V/50Hz.

Calcular a sua reactância capacitiva.

R.: $X_C = 159\Omega$

4. O valor máximo de uma corrente é de 65 A e a sua frequência é de 50Hz.

Calcular:

a) A intensidade eficaz.

b) O período da corrente

c) O valor instantâneo da intensidade para $t = 3ms$.

d) A velocidade angular.

R.: a) $I = 45{,}9A$ c) $i = 1{,}07A$

b) $T = 0{,}02s$ d) $\omega = 314Rad/seg$

5. Uma tensão $v = 110\sqrt{2}sen50\pi t$ está aplicada a uma indutância pura de 0,4 H. Calcule o valor eficaz da corrente que circula no circuito.

R.: 1,75A

6. Uma corrente alternada sinusoidal, circulando numa resistência R desenvolve uma potência de 100W por efeito de joule. Se a resistência R for percorrida por uma corrente contínua de 5ª a potência desenvolvida terá o mesmo valor. Determine o valor eficaz da corrente sinusoidal.

R.: 5A

ANÁLISE DE CIRCUITOS EM CORRENTE ALTERNADA

Fundamentalmente, o problema resume-se à determinação dos valores das tensões, correntes e potências em jogo nos diferentes pontos de um circuito.

A metodologia a seguir difere conforme se trata de um circuito série ou circuito em paralelo.

Consoante o tipo de elementos da associação, os circuitos podem ser assim designados:

- RL combinação de resistência e indutância
- RC combinação de resistência e capacidade
- RLC combinação de resistência, capacidade e indutância

CIRCUITOS SÉRIE

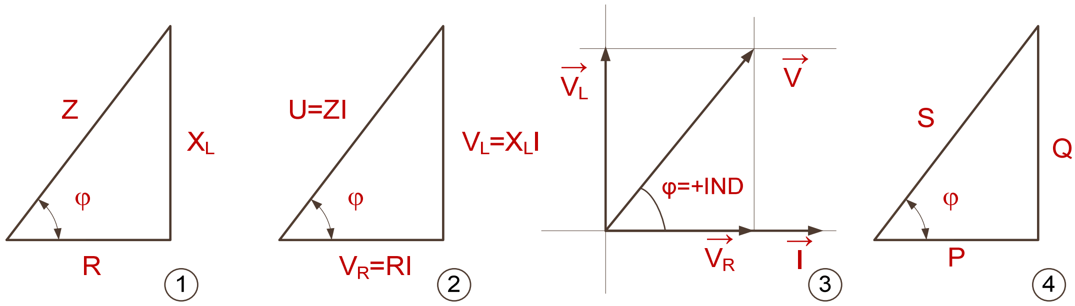
Para o cálculo destes circuitos devemos lembrar que:

- A intensidade da corrente é a mesma em todos os elementos do circuito.
- A queda de tensão nos terminais do circuito é igual à soma das quedas de tensão em cada um dos seus elementos. Convém acrescentar que esta soma não é do tipo algébrico mas sim vectorial.

CIRCUITOS RL

- **CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA**

Na figura seguinte, representa-se um triângulo rectângulo, designado por triângulo das impedâncias. Deve ser desenhado na posição indicada, assim como as grandezas R e X_L que lhe estão associadas.



Nele podemos ver que a impedância Z se relaciona com a resistência R e com a reactância indutiva X_L, como num triângulo rectângulo a hipotenusa relativamente aos seus catetos, o que nos permite escrever:

$$Z^2 = R^2 + X_L^2 \quad \text{ou} \quad Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

- **CÁLCULO DAS TENSÕES**

Podemos construir um novo triângulo, o **TRIÂNGULO DAS TENSÕES**, representado na figura anterior, obtido a partir do triângulo das impedâncias depois de multiplicarmos cada uma das suas grandezas pelo valor da intensidade da corrente I, onde:

V_R é a queda de tensão nos terminais da resistência **R** $\quad V_R = RI$

V_L é a queda de tensão nos terminais da indutância **L** $\quad V_L = X_L I$

V é a queda de tensão nos terminais do agrupamento $\quad V = ZI$

O diagrama de eixos na figura anterior resulta de um tratamento vectorial das grandezas deste último triângulo. Podemos observar como o vector $\vec{V}$ é o resultado da soma dos vectores $\vec{V_R}$ e $\vec{V_L}$ que estão, respectivamente, em fase e em avanço de quadratura (+ 90º) relativamente a $\vec{I}$.

Na verdade, a resistência não introduz qualquer desfasamento entre a intensidade da corrente e a tensão, pelo que estes vectores coincidem.

Já na indutância a corrente sofre um atraso de 90º relativamente à tensão nos seus terminais, razão por que o vector $\vec{V_L}$ se desenhou com um avanço de fase 90º relativamente à intensidade da corrente e também em relação a $\vec{V_R}$.

- **CÁLCULO DA INTENSIDADE DA CORRENTE**

Vimos que $U = ZI$, donde se tira que

$$I = \frac{V}{Z}$$

Esta relação matemática traduz a lei de Ohm em corrente alternada. A única diferença, relativamente à sua expressão em c.c., é que em lugar da resistência figura agora a impedância.

- **CÁLCULO DO DESFASAMENTO EXISTENTE ENTRE TENSÃO E CORRENTE**

O vector $\vec{I}$ faz um determinado ângulo com o vector $\vec{V}$. Este ângulo é designado pela letra grega φ (fi) e convencionou-se ser positivo por corresponder a um deslocamento angular no sentido contrário ao movimento dos ponteiros do relógio. Esta situação caracteriza os circuitos indutivos.

Da figura anterior tiramos a seguinte relação trigonométrica:

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z}$$

Depois de efectuarmos aquele quociente, que é igual ao co-seno do ângulo de desfasamento, podemos, a partir de uma calculadora científica, conhecer o valor do referido ângulo.

O valor $\cos\varphi$ chama-se factor de potência. É um valor muito importante em corrente alternada, pois caracteriza a natureza da carga.

➢ CÁLCULO DE POTÊNCIAS

Se multiplicarmos cada uma das tensões V_R, V_L e V por I, obtemos as potências associadas, respectivamente, à resistência, à indutância e à capacidade.

Obtemos analogamente um triângulo designado por **TRIÂNGULO DAS POTÊNCIAS**, como se mostra na figura anterior. Embora estas sejam posteriormente objecto de cuidadoso estudo, podemos distinguir neste último triângulo:

POTÊNCIA ACTIVA – consumida e transformada em calor na resistência

$P = V_R I$ ou $P = RI^2$	Onde:	P	$potência\ activa$	$watt\ (W)$

POTÊNCIA REACTIVA – associada ao campo magnético criado pela passagem da corrente na bobina ou indutância

$Q = V_L I$ ou $Q = X_L I^2$	Onde:	Q	$potência\ reactiva$	$volt-ampère\ reactivo\ (VA_R)$

POTÊNCIA APARENTE – potência de conjunto associada à impedância Z

$S = VI$ ou $S = ZI^2$	Onde:	S	*potência aparente*	***volt – ampère (VA)***

Podemos, de forma análoga, relacionar estas potências pelas expressões:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \Rightarrow P = S\cos\varphi \Rightarrow \boxed{P = UI\cos\varphi}$$

$$\operatorname{sen}\varphi = \frac{Q}{S} \Rightarrow Q = S\operatorname{sen}\varphi \Rightarrow \boxed{Q = UI\operatorname{sen}\varphi}$$

Do triângulo da figura anterior tiramos ainda que

$$\boxed{S = \sqrt{P^2 + Q^2}}$$

PROBLEMAS PARA RESOLVER

1. Uma bobina te uma resistência de 5Ω e um coeficiente de auto-indução igual a 30 mH e é alimentada à tensão de 220V/50Hz. Calcular:

a) A reactância indutiva.
b) A impedância do circuito.
c) A intensidade da corrente.
d) O ângulo de desfasamento entre a tensão e a corrente.
e) A potência consumida pela resistência
f) A potência reactiva.

R.: a) $X_L = 9{,}42\Omega$ d) $\varphi \cong +62^0 IND$

b) $Z = 10{,}66\Omega$ e) $P = 2130W$

c) $I = 20{,}64A$ f) $Q = 4013VA_R$

2. Qual a tensão a que está submetida uma bobina cujo coeficiente de auto-indução é de 140mH, tem de resistência óhmica 45Ω e é percorrida por uma intensidade de corrente de 6A numa rede de 50Hz?

R.: a) $V = 377{,}5V$

3. Um gerador de corrente alternada de 130V/50Hz alimenta uma carga indutiva com resistência de 20Ω. Sabendo que o desfasamento entre a tensão e a corrente é de 45º, calcular:

a) A impedância da carga.
b) A intensidade da corrente.
c) A reactância indutiva.
d) O coeficiente de auto-indução do circuito.
e) A queda de tensão indutiva.
f) A queda de tensão resistiva.

R.: a) $Z = 28{,}3\Omega$ d) $L = 63{,}7mH$

b) $I = 4{,}6A$ e) $V_L = 92V$

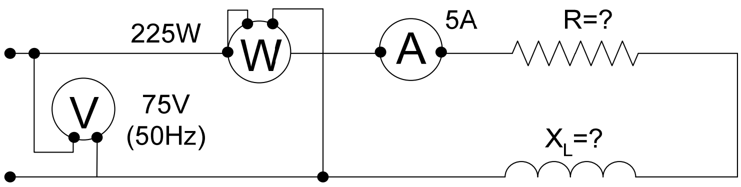
c) $X_L = 20\Omega$ f) $V_R = 92V$

4. Uma bobina A, de 6Ωde resistência e 20 mH de indutância, está ligada em série com uma outra bobina B cujas resistência e indutância são, respectivamente, 30Ω e 0,07H. a tensão de alimentação é de 220V/50Hz. Calcular:

a) A resistência e a reactância do conjunto
b) A impedância de cada bobina e do circuito
c) O ângulo de desfasamento introduzido por cada bobina e o resultado da associação de ambas.
d) A queda de tensão em cada bobina.
e) As potências consumidas por cada bobina e pelo circuito.
f) Fazer um diagrama vectorial relacionando as tensões nos terminais de cada bobina com a tensão aplicada ao conjunto e ainda com a intensidade de corrente no circuito.

R.: a) $R = 36\Omega$, $X_L = 28{,}3\Omega$
b) $Z_A = 8{,}7\Omega$ $Z_B = 37{,}2\Omega$ $Z = 45{,}8\Omega$
c) $\varphi_A = +46{,}3º\,IND$, $\varphi_B = +36{,}2º\,IND$,
$\varphi = +38{,}2º\,IND$
d) $V_A = 41{,}7V$ $V_B = 178{,}5V$
e) $P_A = 138W$ $P_B = 691W$ $P = 829W$

5. Considere o seguinte circuito no qual se fizeram as medidas indicadas.



a) Determine a resistência e a reactância do circuito.
b) Calcule as tensões aos terminais da resistência e da bobina.
c) Construa o diagrama vectorial da corrente e das tensões.
d) Calcule a potência reactiva e o factor de potência.

R.: a) $R = 9\Omega$, $X_L = 12\Omega$
b) $V_R = 45V$; $V_L = 60V$
d) $Q = 300VA_R$; $\cos\varphi = 0{,}855$

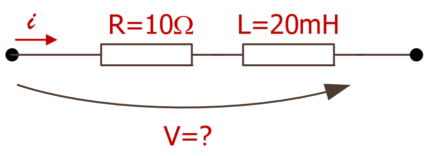
6. Num circuito RL série com uma indutância L=0,06H, e uma resistência R=20Ω, a corrente está atrasada 80º em relação à tensão. Determine o valor da velocidade angular ω.

R.: $\omega = 1893 rad/s$

7. Sabe-se que um circuito RL série tem uma bobina com um coeficiente de auto-indução de 0,02H e uma impedância de 17,85Ω. Depois de aplicada uma tensão sinusoidal aos seus terminais, a corrente sofre um atraso em relação à tensão de 63,4º. Determine o valor da velocidade angular e o valor da resistência.

R.: $\omega = 800 rad/s; R = 8\Omega$

8. A corrente do circuito seguinte é $i = 2 sen 500t$. Calcular a tensão total aplicada



R.: $V = 20V$

CIRCUITOS RC

➢ CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA

A única diferença a registar no desenho do triângulo das impedâncias é a sua posição invertida relativamente ao seu traçado num circuito R_L (figura anterior).

Na verdade, a posição deste triângulo em nada influi o cálculo da impedância, contudo deve ser mantida, pois quando, a partir dele, desenhamos o triângulo das tensões e associamos os respectivos vectores representativos, deixa de ser arbitrária tal postura.

Podemos igualmente escrever

$$Z = \sqrt{R^2 + X_c^2}$$

Expressão que relaciona a impedância Z, a resistência R e a reactância X_C.

➢ CÁLCULO DAS TENSÕES

Multiplicando as grandezas do triângulo das impedâncias por I, derivamos para um novo triângulo, o triângulo das tensões (figura anterior).

São as seguintes as quedas de tensão a considerar:

V_R é a queda de tensão nos terminais da resistência **R** $\quad V_R = RI$

V_C é a queda de tensão nos terminais da indutância **C** $\quad V_C = X_C I$

V é a queda de tensão nos terminais do agrupamento $\quad V = ZI$

Representando estas tensões pelos vectores $\vec{V_R}$, $\vec{V_L}$ e $\vec{V}$ (figura anterior), podemos ver que $\vec{V_R}$ está em fase com o vector $\vec{I}$ e em quadratura de avanço relativamente a $\vec{V_C}$. Apercebemo-nos também do avanço de 90º da intensidade da corrente relativamente à tensão no condensador e ainda do ângulo φ formado entre aquela e o vector $\vec{V}$.

➢ CÁLCULO DA INTENSIDADE DA CORRENTE

Pela lei de Ohm em c.a. obtemos o valor de I, fazendo o quociente da tensão pela impedância:

$$I = \frac{V}{Z}$$

➢ CÁLCULO DO DESFASAMENTO EXISTENTE ENTRE TENSÃO E CORRENTE

O vector $\vec{V}$ forma com $\vec{I}$ um ângulo φ considerado como negativo, dado resultar de um deslocamento angular no sentido do movimento dos ponteiros do relógio. Esta situação caracteriza os circuitos capacitivos.

A equação trigonométrica já anteriormente escrita para os circuitos *RL* mantém-se

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z}$$

- **CÁLCULO DAS POTÊNCIAS**

Da mesma forma, se multiplicarmos por I as grandezas do triângulo das tensões obtemos o triângulo das potências (figura anterior).

Para as potências mantêm-se as expressões atrás consideradas, tendo em atenção que a reactância é agora capacitiva.

POTÊNCIA ACTIVA

$P = V_R I$ ou $P = RI^2$	Onde:	P	*potência activa*	**Watt (W)**

POTÊNCIA REACTIVA

$Q = V_C I$ ou $Q = X_C I^2$	Onde:	Q	*potência reactiva*	**Volt – ampère reactivo (VA_R)**

POTÊNCIA APARENTE

$S = VI$ ou $S = ZI^2$	Onde:	S	*potência aparente*	**Volt – ampère (VA)**

Da figura anterior podemos concluir que são igualmente válidas as expressões já consideradas

$P = UI\cos\varphi$	$Q = UI\operatorname{sen}\varphi$	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

PROBLEMAS PARA RESOLVER

1. Determine a capacidade de um condensador cuja reactância é 230Ω para a frequência de 50Hz.

R.: $C = 13{,}8\mu F$

2. Um gerador de corrente alternada de 220V/50Hz alimenta uma carga capacitiva com as seguintes características: $R = 70\Omega$, $C = 50\mu F$. Calcular:

a) A impedância da carga

b) A intensidade da corrente.

c) O factor de potência e o ângulo de desfasamento.

d) A potência consumida.

e) A potência aparente

f) Desenhar o diagrama vectorial que traduz o problema.

R.: a) $Z = 94{,}62\Omega$ d) $P = 376{,}8W$

b) $I = 2{,}32$ e) $S = 510{,}4VA$

c) $\cos\varphi = 0{,}74$, $\varphi = -42{,}3^0 CAP$

3. Um condensador de 106μF é ligado em série com uma resistência de 30Ω, sendo o conjunto atravessado por uma corrente de intensidade 5,6A quando a tensão é de 220V. Determinar a frequência da tensão na rede.

R.: a) $f = 59{,}2Hz$

4. Um condensador de 22μF está ligado em série com uma resistência de 330Ω. A tensão aos terminais do condensador é 32V, sendo a corrente no circuito 160mA. Calcular:

a) A reactância capacitiva.

b) A frequência da tensão.

c) A impedância do circuito.

d) A tensão total.

e) O co-seno do ângulo de desfasamento.

R.: a) $X_C = 200\Omega$ d) $V = 61{,}74V$

b) $f = 36{,}17Hz$ e) $cos\varphi = 0{,}855$

c) $Z = 385{,}9\Omega$

CIRCUITOS RLC

A resolução de circuitos constituídos por resistência, indutância pura e capacitância pura em série, isto é, de circuitos RLC, reduz-se à aplicação dos conhecimentos e fórmulas atrás referidas. Bastará analisar os exemplos seguintes.

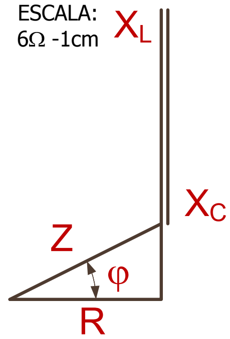
PROBLEMA RESOLVIDO

A reactância capacitiva e indutiva, respectivamente, de um condensador e bobina são 17Ω e 23Ω. A resistência do condensador é desprezível e a da bobina é de 12Ω. À série destes elementos está aplicada uma tensão de 220V/50Hz.

Desenhar o triângulo das impedâncias que traduz o problema e calcular o valor da intensidade da corrente.

Resolução:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{12^2 + (23 - 17)^2} = 13{,}42\Omega$$



$$I = \frac{V}{Z} = \frac{220}{13{,}42} = 16{,}4A$$

A resolução gráfica do problema faz-se da seguinte maneira:

Escolhe-se uma escala conveniente para as grandezas, seguidamente desenham-se R, X_L e X_C como se mostra na figura ao lado.

X_L e X_C têm a mesma direcção mas sentidos contrários, pelo que se subtraem os respectivos valores. X_L e X_C estão em avanço e em atraso de 90º em relação a R, respectivamente.

Como $X_L > X_C$, o circuito é **predominantemente indutivo.**

PROBLEMA RESOLVIDO

Um circuito série é formado por uma bobine de 1,2H de coeficiente de auto-indução e resistência desconhecida e um condensador de 10μF. Ao conjunto aplica-se uma tensão de 13,35V/50Hz, sendo o circuito percorrido por uma corrente de 0,15A. Calcular:

a) A impedância do circuito.
b) A reactância do circuito.
c) O valor da resistência desconhecida.
d) O valor das tensões no condensador e na bobina.

Resolução:

a)

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{13{,}35}{1{,}15} = 89\Omega$$

b)

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi \times 50 \times 1{,}2 = 377\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 10 \times 10^{-6}} = 318{,}5\Omega$$

$$X = X_L - X_C = 377 - 318{,}5 = 58{,}5\Omega$$

c)

$$R = \sqrt{Z^2 - X^2} = \sqrt{89^2 - 58{,}5^2} = 67\Omega$$

d)

$$V_B = Z_B I \quad \Rightarrow \quad Z_B = \sqrt{R^2 + {X_L}^2} = \sqrt{67^2 + 377^2} = 383\Omega$$

$$V_B = 383 \times 0{,}15 = 57{,}45V$$

$$V_C = X_C I = 318{,}5 \times 0{,}15 = 47{,}8V$$

PROBLEMAS PARA RESOLVER

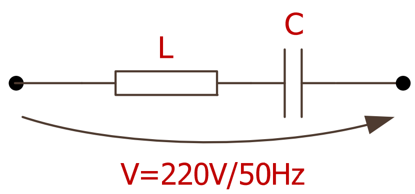
1. A um circuito série de um condensador de 8μF e uma bobina com 250Ω e 0,7H de indutância aplica-se 220V / 50Hz. Calcular a tensão aos terminais de cada receptor.

R.: $V_C = 284V$; $V_B = 238V$

2. Observe atentamente o circuito representado na figura ao lado, cujos elementos reactivos são puros. As suas características são:

$C = 30\mu F,\ \ L = 330mH$

A tensão de alimentação é de 220V/50Hz. Calcular:



a) A intensidade da corrente.
b) O desfasamento entre a tensão e a corrente.
c) As tensões aos terminais do condensador e da bobina
d) As potências reactiva e aparente

R.: a) $I = 4{,}75A$

b) $\varphi = +90^o IND$

c) $V_C = 302{,}4V,\ \ V_L = 522{,}5V$

d) $P = 0W,\ \ Q = 1045VA_R,\ \ S = 1045VA$

3. Num circuito RLC série, a corrente está atrasada 30º em relação à tensão aplicada. O valor da tensão na bobina é $VL_{max} = 2 \times VC_{max}$ e a tensão no condensador é $V_c = 10\,sen1000t$. Sendo o valor da resistência de 20Ω, determine:

a) O valor do coeficiente de auto-indução da bobina.

b) O valor da capacidade do condensador.

R.: a) $L = 23,1mH$

b) $C = 86,5\,\mu F$

RESSONÂNCIA

Um circuito R, L, C diz-se ressonante quando as suas reactâncias capacitiva e indutiva se igualam.

$$X_C = X_L$$

e portanto $X = X_C - X_L = 0$, o que nos leva a dizer que num circuito ressonante a sua reactância é nula.

Naturalmente a sua impedância será igual à sua própria resistência, isto é,

$$Z = R$$

Podemos também dizer que um circuito ressonante comporta-se como uma carga puramente óhmica de que resulta que a corrente e tensão estão sempre em concordância de fase. Isto acontece para uma dada frequência, designada por frequência de ressonância f_0, cujo valor decorre da igualdade anterior

$$X_L = X_C \quad \Rightarrow \quad 2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C}$$

Explicitando f_0 obtemos:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Na situação de ressonância o circuito diz-se em sintonia com a grandeza, cuja frequência é f_0.

A ressonância ocorre quer em circuitos em paralelo quer em circuitos em série. Assume características próprias em cada m deles. Temos, assim, respectivamente, a chamada ressonância da corrente ou em paralelo e a ressonância da tensão ou em série.

- **RESSONÂNCIA DA TENSÃO**

Para além das características apontadas, comuns a qualquer circuito ressonante, podemos concluir algo mais sobre o comportamento específico destes circuitos, analisando o problema seguinte.

PROBLEMA RESOLVIDO

Uma resistência de 30Ω, uma bobina cujo coeficiente de auto-indução é de 0,05H, e um condensador de 20µF estão ligados em série num circuito cuja tensão é de 220V, 50Hz.

Determinar:

a) A frequência de ressonância.

b) Construir um quadro onde se registem os valores X_L, X_C, X, Z, I, V_L, e V_C às frequências de 100Hz, 300Hz e à frequência de ressonância.

Resolução:

a)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0{,}05 \times 20 \times 10^{-6}}} \cong 159Hz$$

b)

$f_1 = 100Hz$

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi 100 \times 0{,}05 = 31{,}41\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi 100 \times 20 \times 10^{-6}} = 79{,}58\Omega$$

$$X = X_C - X_L = 79{,}58 - 31{,}41 = 48{,}17\Omega$$

Nesta frequência predomina a reactância capacitiva. Isto acontece a qualquer frequência inferior à de ressonância.

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{30^2 + 48{,}17^2} = 56{,}75\Omega$$

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{220}{56{,}75} = 3{,}88A$$

$$V_L = X_L I = 31{,}41 \times 3{,}88 = 121{,}9V$$

$$V_C = X_C I = 79{,}58 \times 3{,}88 = 308{,}8V$$

$$V_R = RI = 30 \times 3{,}88 = 116{,}4V$$

$$f_0 = 159Hz$$

$$X_L = 2\pi f_0 L = 2\pi 159 \times 0{,}05 = 50\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f_0 C} = \frac{1}{2\pi 159 \times 20 \times 10^{-6}} = 50\Omega$$

$$X = X_C - X_L = 50 - 50 = 0\Omega$$

Nesta frequência predomina a reactância capacitiva. Isto acontece a qualquer frequência inferior à de ressonância.

$$Z = R = 30\Omega$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{220}{30} = 7{,}33A$$

$$V_L = X_L I = 50 \times 7{,}33 = 366{,}5V$$

$$V_C = V_L = 366{,}5V$$

Reparar que, quer no condensador, quer na bobina, a tensão ultrapassa a tensão aplicada ao conjunto.

$$f_1 = 300Hz$$

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi 300 \times 0{,}05 = 94{,}25\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi 300 \times 20 \times 10^{-6}} = 26{,}53\Omega$$

$$X = X_L - X_C = 94{,}25 - 26{,}53 = 67{,}72\Omega$$

Nesta frequência é predominante o efeito indutivo. Este facto ocorre para qualquer frequência superior à de ressonância.

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{30^2 + 67{,}72^2} = 74\Omega$$

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{220}{74} = 2{,}97A$$

$$V_L = X_L I = 94{,}25 \times 2{,}97 = 279{,}9V$$

$$V_C = X_C I = 26{,}53 \times 2{,}97 = 78{,}79V$$

$$V_R = RI = 30 \times 2{,}97 = 89{,}1V$$

	100	31,41	79,58	48,17	56,75	3,88	121,8	308,8
$f_0 \Rightarrow$	159	50	50	0	30	7,33	366,5	366,5
	300	94,25	26,53	67,72	74	2,97	279,9	78,79

Da análise deste problema podemos tirar as seguintes conclusões, válidas para qualquer circuito ressonante RLC série:

- À frequência de ressonância f_0 a impedância do circuito é mínima. Na verdade, ambas as reactâncias anulam mutuamente os seus efeitos. O valor da impedância é o da própria resistência do circuito.
- A intensidade da corrente é máxima.
- Os componentes reactivos estão sujeitos a valores muito elevados de tensão.
- Para frequências inferiores à frequência de ressonância o circuito é predominantemente capacitivo.

$$X_C > X_L$$

- À frequência de ressonância o circuito é puramente óhmico.

$$Z = R$$

- Para frequências superiores à frequência de ressonância o circuito é predominantemente indutivo

$$X_L > X_C$$

CARACTERÍSTICAS DA RESSONÂNCIA

Num sistema de eixos cartesianos (figura ao lado) desenhamos, simultaneamente, as curvas que traduzem a variação das tensões na bobina e no condensador, assim como da intensidade da corrente para diferentes valores da frequência.

Por análise da figura podemos concluir que:

Os máximos de tensão na bobina e condensador ocorrem para frequências diferentes da de ressonância.

E ainda:

A queda de tensão V_L na bobina é máxima para uma frequência superior a f_0.

A queda de tensão no condensador V_C é máxima para uma frequência inferior à f_0.

FACTOR DE QUALIDADE

Como acabámos de ver, à frequência de ressonância as tensões nos componentes reactivos ultrapassam em muito a tensão aplicada. Em alguns circuitos ressonantes essa tensão pode ser superior a 300 vezes o valor da tensão aplicada.

Define-se factor de qualidade de um circuito ressonante e nota-se pela letra Q,

o número de vezes que a tensão no componente reactivo excede a tensão aplicada quando a frequência é a de ressonância.

O factor de qualidade de um circuito ressonante pode ser calculado a partir de qualquer uma das expressões seguintes:

$$Q = \frac{V_L}{V} = \frac{X_L I}{R I} = \frac{X_L}{R} \qquad Q = \frac{X_L}{R}$$

Ou

$$Q = \frac{V_C}{V} = \frac{X_C I}{R I} = \frac{X_C}{R} \qquad Q = \frac{X_C}{R}$$

Decorre destas expressões que

Quanto maior for a ressonância do circuito menor será o valor de Q e menos pronunciado será o respectivo pico

Assim na figura ao lado vemos que o circuito 2 tem uma resistência menor e melhor factor de qualidade do que o circuito 1.

Isto significa também que uma dada variação na frequência resultará no circuito 2 numa maior variação da intensidade da corrente e, consequentemente, da tensão nos componentes reactivos.

PROBLEMAS PARA RESOLVER

1. Num circuito à frequência de 60Hz, encontram-se montados em série uma resistência de 12Ω, uma indutância de 30mH e uma capacidade de 80μF. a tensão é de 220V. Determinar:

a) As reactâncias indutiva, capacitiva e total.

b) A impedância do circuito

c) Qual a capacidade necessária para que o circuito entre em ressonância.

d) A intensidade de corrente no circuito inicial e no circuito ressonante.

R.: **a)** $X_L = 11{,}31\Omega$, $X_C = 33{,}16\Omega$, $X = 21{,}85\Omega$

b) $Z = 24{,}93\Omega$ **e)** $I = 8{,}82A$, $I_0 = 18{,}33A$

c) $C = 234{,}7\mu F$

2. um circuito é constituído por uma resistência, uma bobina e um condensador em série. São dados os valores de $R = 15\Omega$, $L = 45mH$, $C = 87\mu F$, V=220V. determinar:

a) A frequência para a qual a intensidade de corrente é máxima no circuito.

b) A intensidade de corrente.

c) A tensão na bobina e no condensador.

R.: **a)** $f_0 = 80{,}4Hz$

b) $I = 14{,}67A$

c) $V_L = V_C = 333{,}6V$

3. Um circuito RLC série, cujos componentes têm as seguintes características $R = 8\Omega$, $L = 70mH$, $C = 30\mu F$, é alimentado à tensão de 220V.

a) Determinar a frequência de ressonância

b) Construir um quadro onde se possa registar os valores assumidos pelas diferentes grandezas, não só à frequência de ressonância como às restantes frequências nele constantes.

f(Hz)	$X_L(\Omega)$	$X_C(\Omega)$	$X(\Omega)$	$Z(\Omega)$	I(A)	$V_L(V)$	$V_C(V)$
30							
60							
160							
190							

c) Calcular o factor de qualidade do circuito.

R.: **a)** $f_0 = 109,8Hz$

b)

f(Hz)	$X_L(\Omega)$	$X_C(\Omega)$	$X(\Omega)$	$Z(\Omega)$	I(A)	$V_L(V)$	$V_C(V)$
30	13,2	176,8	163,6	163,6	1,34	17,7	235,9
60	26,4	88,4	62	62,5	3,52	92,8	311,2
109,8	48,3	48,3	0	8	27,5	1328	1328
160	70,4	33,1	37,2	38,1	5,78	406,7	191,7
190	83,6	27,9	55,7	56,2	3,91	326,9	109,1

c) $Q = 6$

CIRCUITOS PARALELO

A metodologia a seguir nos cálculos destes circuitos tem por base o seguinte:

- A tensão aplicada a cada um dos ramos em derivação é a mesma para todos eles.
- Em conformidade com as leis de Kirchhoff, podemos enunciar que a intensidade de corrente no circuito principal é igual à soma das intensidades de corrente nos ramos derivados. Esta soma é vectorial visto tratar-se de grandezas alternadas sinusoidais.

Iremos passar em análise os circuitos típicos RL, RC e RLC. Finalmente, a situação de ressonância.

CIRCUITOS RL

Uma associação em paralelo de resistência e bobina pura, como se mostra na figura ao lado, constitui o circuito RL que nos propomos estudar.

A resolução do problema seguinte permite familiarizarmo-nos com o tipo de cálculo a utilizar nestes circuitos.

PROBLEMA RESOLVIDO

Uma resistência pura de 35Ω está ligada em paralelo com uma indutância pura de 70mH. O conjunto está alimentado a uma tensão de 220V, 50Hz.

Determinar:

a) A reactância indutiva X_L.

b) As intensidades de corrente no circuito principal, através da resistência e através da bobina.

c) O factor de potência e o ângulo de desfasamento

Resolução:

a)

$X_L = 2\pi f L = 2\pi \times 50 \times 0{,}07 = 22\Omega$

b)

$$I_R = \frac{V}{R} = \frac{220}{35} = 6{,}28A$$

$$I_L = \frac{V}{X_L} = \frac{220}{22} 10A$$

$\vec{I} = \vec{I_R} + \vec{I_L}$ partindo do vector $\vec{V}$, que é o vector comum aos terminais da resistência e da bobina, desenhemos os respectivos vectores representativos das intensidades de corrente (figura ao lado).

$\vec{I_R}$ é um vector em fase com $\vec{V}$, visto que a resistência não introduz desfasamento.

$\vec{I_L}$ é um vector em atraso de 90º relativamente à tensão.

Podemos associar as grandezas dos vectores $\vec{I_R}$ e $\vec{I_L}$ às medidas dos catetos de um triângulo rectângulo cuja hipotenusa nos dá o valor de I, a intensidade no circuito principal.

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} = \sqrt{6{,}28^2 + 10^2} = 11{,}81A$$

c) O factor de potência (cosφ) é calculado a partir do referido triângulo e a sua expressão é:

$$cos\varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{6,28}{11,8} = 0,532$$

$$\varphi = arcos0,532 = +57,8^0\ IND$$

Como se trata de uma carga indutiva, o ângulo de desfasamento é, naturalmente, positivo.

PROBLEMA RESOLVIDO *(CASO DE DUAS BOBINAS REAIS EM PARALELO)*

Duas bobinas, A e B, cujas resistências e indutância são, respectivamente,

$R_A = 23\Omega,\ L_A = 0,01H$ e $R_B = 8\Omega,\ L_B = 0,03H$,

Estão ligadas em paralelo. Nos terminais do conjunto está aplicada uma tensão de 110V/50Hz.

Calcular:

a) A reactância indutiva de ambas as bobinas.

b) A impedância de cada bobina.

c) A intensidade de corrente que percorre cada uma das bobinas.

d) O desfasamento entre a tensão e a corrente introduzido por cada bobina.

e) A intensidade de corrente principal.

f) As potências absorvidas por cada bobina assim como a potência total absorvida.

Resolução:

a)

$$X_{LA} = 2\pi f L_A = 2\pi \times 50 \times 0,01 = 3,14\Omega$$

$$X_{LB} = 2\pi f L_B = 2\pi \times 50 \times 0,03 = 9,42\Omega$$

b)

$$Z_A = \sqrt{{R_A}^2 + {X_{LA}}^2} = \sqrt{23^2 + 3,14^2} = 23,21\Omega$$

$$Z_B = \sqrt{{R_B}^2 + {X_{LB}}^2} = \sqrt{8^2 + 9,42^2} = 12,36\Omega$$

c)

$$I_A = \frac{V}{Z_A} = \frac{110}{23,21} = 4,74A$$

$$I_B = \frac{V}{Z_B} = \frac{110}{12,36} = 8,9A$$

d)

$$cos\varphi_A = \frac{R_A}{Z_A} = \frac{23}{23,21} = 0,991 \qquad \varphi_A = +7,7^o IND$$

$cos\varphi_B = \frac{R_B}{Z_B} = \frac{8}{12,36} = 0,647$ $\varphi_B = +49,7^0 IND$

e)

A seguinte relação (ver nota matemática) permite-nos calcular a grandeza do vector $\vec{I}$ resultante da soma vectorial de $\overrightarrow{I_A}$ com $\overrightarrow{I_B}$, a partir do ângulo formado por eles.

$I^2 = I_A{}^2 + I_B{}^2 + 2I_A.I_B\cos(\varphi_A - \varphi_B)$

$I = \sqrt{4,74^2 + 8,9^2 + 2 \times 4,74 \times 8,9 \times 0,743} = 12,82A$

f)

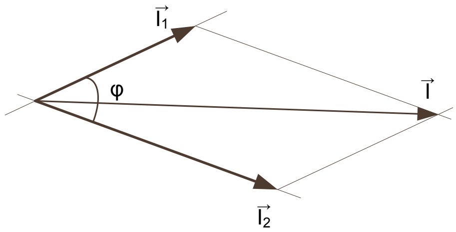
$P_A = R_A I_A{}^2 = 23 \times 4,74^2 = 516,7W$

$P_B = R_B I_B{}^2 = 8 \times 8,9^2 = 633,7W$

$P_T = P_A + P_B = 517 + 634 = 1150,4W$

<u>NOTA MATEMÁTICA</u>

A resultante I de um paralelogramo, cujos lados são I1 e I2 e formam entre si um ângulo φ, é determinada pela seguinte expressa matemática



$I^2 = I_1{}^2 + I_2{}^2 + 2I_1.I_2cos\varphi$

PROBLEMAS PARA RESOLVER

1. Um condensador, cuja capacidade é 60 nF, é ligado em paralelo com uma resistência de 24kΩ. a tensão de alimentação é de 300V/50Hz.

a) A reactância capacitiva.

b) As intensidades de corrente principal e derivadas.

c) O factor de potência

d) As potências activa, reactiva e aparente.

e) Fazer o diagrama vectorial das correntes.

R.: **a)** $X_C = 53k\Omega$

b) $I_C = 5,66mA,\ I_R = 12,5mA,\ I = 13,72mA$

c) $Cos\varphi = 0,911$

d) $P = 3,75W,\ Q = 1,69VA_R,\ S = 4,11VA$

CIRCUITOS RC

Trata-se agora de um paralelo de resistência e capacidade puras. A filosofia de cálculo é idêntica à anterior, devendo contudo ter-se em atenção que a capacidade provoca um avanço da intensidade relativamente à tensão.

PROBLEMA RESOLVIDO

Uma resistência óhmica de 75Ω está ligada em paralelo com uma capacidade de 28μF e o conjunto está sob uma tensão alternada de 110V/60Hz.

Determinar:

a) A reactância capacitiva X_C.

b) As intensidades de corrente principal e derivadas.

c) A impedância do circuito.

d) O desfasamento introduzido pelo circuito.

Resolução:

a)

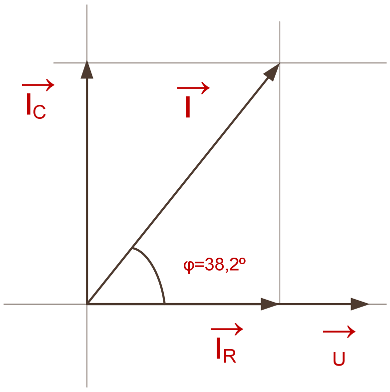
$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 60 \times 28 \times 10^{-6}} = 94{,}7\Omega$$

b)

$$I_R = \frac{V}{R} = \frac{110}{75} = 1{,}47A$$

$$I_C = \frac{V}{X_C} = \frac{110}{94{,}7} = 1{,}16A$$

$$I = \sqrt{I_R^{\,2} + I_C^{\,2}} = \sqrt{1{,}47^2 + 1{,}16^2} = 1{,}87A$$



c)

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{110}{1{,}87} = 58{,}8\Omega$$

d)

$$\cos\varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{1{,}47}{1{,}87} = 0{,}786 \qquad \varphi = -38{,}2^{0}\,CAP$$

PROBLEMAS PARA RESOLVER

2. Um condensador, cuja capacidade é 60 nF, é ligado em paralelo com uma resistência de 24kΩ. a tensão de alimentação é de 300V/50Hz.

a) A reactância capacitiva.

b) As intensidades de corrente principal e derivadas.

c) O factor de potência

d) As potências activa, reactiva e aparente.

e) Fazer o diagrama vectorial das correntes.

R.: **a)** $X_C = 53k\Omega$

b) $I_C = 5{,}66mA,\ I_R = 12{,}5mA,\ I = 13{,}72mA$

c) $Cos\varphi = 0{,}911$

d) $P = 3{,}75W,\ Q = 1{,}69VA_R,\ S = 4{,}11VA$

CIRCUITOS RLC

Um circuito RLC é um circuito formado por um paralelo de três elementos puros, resistência, bobina e condensador, e a sua análise baseia-se nos procedimentos já utilizados nos exercícios anteriores.

PROBLEMA RESOLVIDO

Uma resistência de 70Ω, uma bobina cuja reactância é de 95Ω e um condensador de reactância 70Ω, estão ligados em paralelo sob uma tensão de 220V/50Hz.

Determinar:

a) As intensidades que circulam em cada ramo.

b) A intensidade de corrente principal.

c) O factor de potência e o ângulo de desfasamento.

d) Fazer o diagrama vectorial das correntes e da tensão em jogo.

Resolução:

a)

$$I_R = \frac{V}{R} = \frac{220}{70} = 3{,}14A$$

$$I_L = \frac{V}{X_L} = \frac{220}{95} = 2{,}32A$$

$$I_C = \frac{V}{X_C} = \frac{220}{70} = 3{,}14A$$

b)

$$\vec{I} = \vec{I_R} + \vec{I_L} + \vec{I_C}$$

As correntes I_L e I_C estão em oposição de fase, como se pode ver pela figura seguinte, pelo que se subtraem.

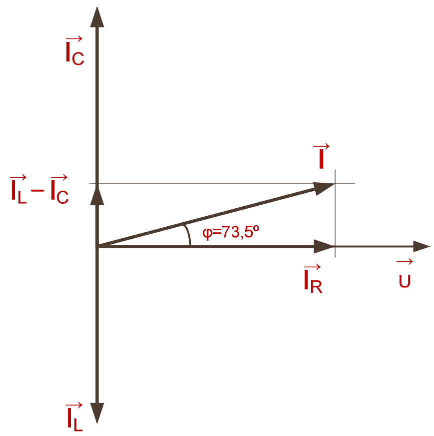
$$I = \sqrt{I_R^{\,2} + (I_C - I_L)^2} = \sqrt{3{,}14^2 + 0{,}82^2} = 3{,}24A$$

c)

$$cos\varphi = \frac{I_C - I_R}{I} = \frac{0{,}82}{3{,}24} = 0{,}253 \qquad \varphi = -75{,}3^0\, CAP$$

d)

Diagrama vectorial das grandezas em jogo



PROBLEMA RESOLVIDO *(CASO GERAL DE BOBINA COM RESISTÊNCIA NÃO DESPREZÁVEL)*

Se num condensador a sua resistência é praticamente desprezável, o mesmo não se pode dizer de uma bobina, cuja resistência, ainda que pequena, não deve ser ignorada no cálculo.

Analisemos esta situação através de um exemplo.

Consideremos uma bobina com uma resistência de 15Ω e coeficiente de auto-indução de 35mH.

Em paralelo com esta bobina, liga-se um condensador com 80μF de capacidade. O conjunto está sob uma tensão de 220V/50Hz.

Calcular:

a) As reactâncias indutiva e capacitiva.

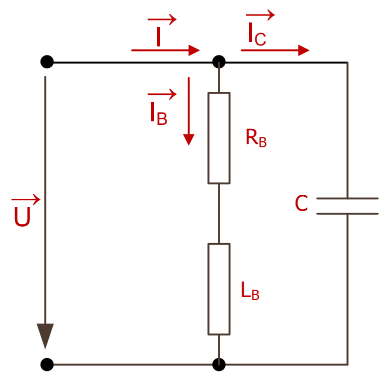
b) Os valores de intensidade de corrente no ramo da bobina e do condensador.

c) O desfasamento entre a corrente através da bobina e a tensão aplicada.

d) A intensidade de corrente principal.

e) O desfasamento introduzido pelo circuito

f) A impedância do circuito.



Resolução:

a)

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi \times 50 \times 0{,}035 = 11\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 80 \times 10^{-6}} = 39{,}8\Omega$$

b)

$$I_C = \frac{V}{X_C} = \frac{220}{39{,}8} = 5{,}53A$$

Cálculo de I_B.

$$Z_B = \sqrt{R_B{}^2 + X_{LB}{}^2} = \sqrt{15^2 + 11^2} = 18{,}6\Omega$$

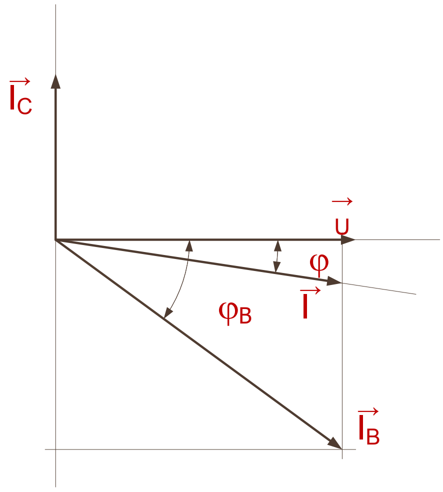
$$I_B = \frac{V}{Z_B} = \frac{220}{18{,}6} = 11{,}83A$$

c)

$$cos\varphi_B = \frac{R_B}{Z_B} = \frac{15}{18{,}6} = 0{,}806 \qquad \varphi_B = arcos\ 0{,}806 = +36{,}2^\circ IND$$

d)

Sabemos que a resultante de I de um paralelogramo, cujos lados I_C e I_B formam entre si um ângulo α, é dada pela expressão do paralelogramo:



$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2I_1.I_2 cos\varphi$$

Neste caso, $\alpha = 90^0 + \varphi_B$ $ou\ seja, \alpha = 90^0 + 36{,}2^0 = 126{,}2^0$

Então:

$$I = \sqrt{5{,}53^2 + 11{,}83^2 + 2 \times 5{,}53 \times 11{,}83 \times cos126{,}2} = 9{,}65A$$

e)

O $cos\varphi_B = cos\varphi$ pois os vectores $\vec{I_B}$ e $\vec{I}$ têm ambos a mesma projecção no eixo que contém o vector $\vec{U}$.

Por outro lado sabemos que

$$cos\varphi_B = \frac{X}{I_B} \Rightarrow X = I_B cos\varphi_B = 11{,}83 \times 0{,}806 = 9{,}54$$

Sabemos também que

$$cos\varphi = \frac{X}{I} = \frac{9{,}54}{9{,}65} = 0{,}988 \qquad \varphi = arcos0{,}988 = +8{,}6^0 IND$$

f)

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{220}{9{,}65} = 22{,}8\Omega$$

RESSONÂNCIA DA CORRENTE

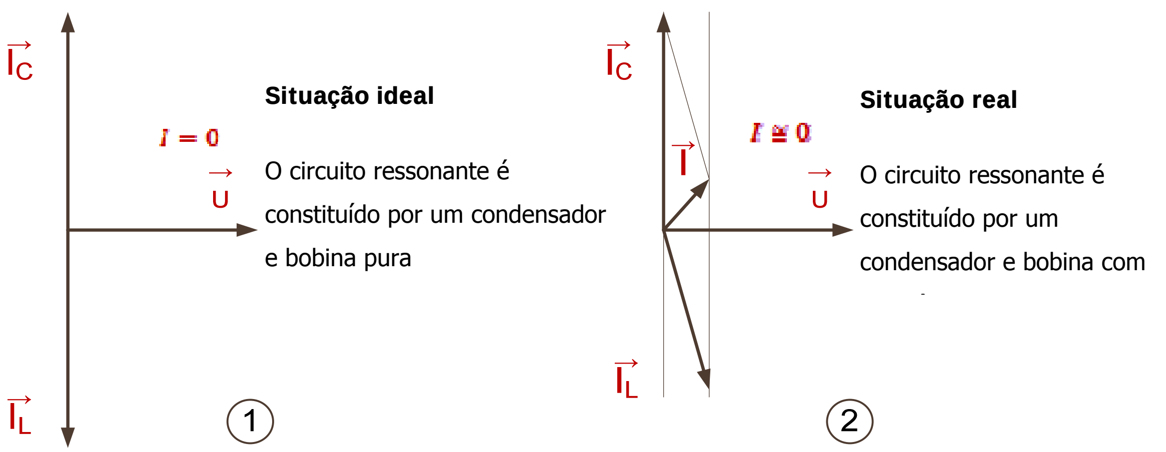
A ressonância da corrente ou ressonância em paralelo ocorre num circuito constituído por bobina e capacidade em paralelo, e a uma dada frequência f_0, designada **frequência de ressonância.** O seu valor é igualmente calculado pela expressão

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Nesta situação estamos na presença de um **circuito ressonante** ou **sintonizado.**

Referindo-nos à situação ideal, isto é, se considerarmos a bobina como indutância pura e o condensador como capacidade pura, podemos dizer que os vectores representativos das **intensidades da corrente na bobina e no condensador**, respectivamente e $\vec{I_C}$, **estão em oposição de fase e são iguais em grandeza** (fig. abaixo -1), **pelo que é nula a corrente no circuito principal.** Um tal circuito apresenta impedância de entrada infinita, o que só é possível teoricamente.

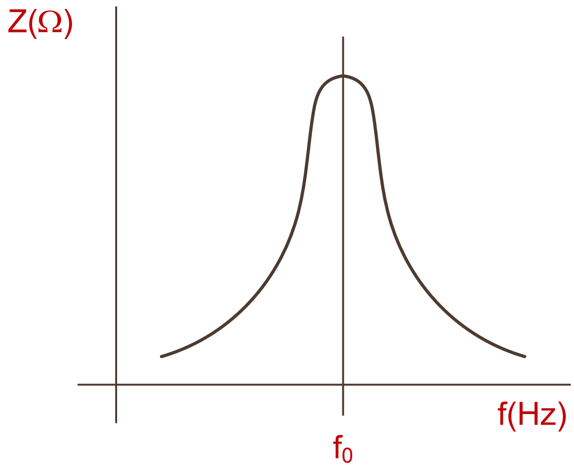
Por outro lado, **na malha LC a corrente é elevada oscilando sucessivamente do condensador para a bobina e desta para aquele.** O circuito ressonante diz-se também, por esta razão, um **circuito oscilante.** Esta situação é, como se disse, **ideal.** Na prática devido à resistência associada à bobina, resulta que a intensidade de corrente que alimenta o circuito ressonante **não é nula**, embora seja muito próxima deste valor. De facto o**s vectores $\vec{I_L}$ e $\vec{I_C}$ não estão propriamente em fase e diferem um pouco em grandeza** (fig. Abaixo -2). Esta pequena corrente no circuito principal alimenta as oscilações de energia entre o condensador e a bobina que, de outro modo, rapidamente resultariam amortecidas devido às perdas.



O comportamento de um circuito ressonante paralelo pode, então, resumir-se nos seguintes pontos:

- A corrente de alimentação do circuito é muito pequena.
- As intensidades da corrente através do condensador e da bobina são elevadas e praticamente iguais
- A impedância do circuito é máxima.

Na figura ao lado podemos ver a curva típica de impedância como função da frequência num circuito paralelo **LC**.



Estas conclusões podem ser verificadas no quadro abaixo, depois de compararmos às diferentes frequências os valores assumidos pelas diversas grandezas num circuito **LC** paralelo, constituído por uma bobina de 40Ω de resistência e 500mH de coeficiente de auto-indução e um condensador de 14μF de capacidade, alimentado a uma tensão de 220V.

Será um bom exercício calcular todos aqueles valores, incluindo a verificação da situação de ressonância à frequência de 60,15Hz.

	30	94,3	378,9	2,15	0,58	1,63	134,9
$f_0 \rightarrow$	60,15	189	189	1,14	1,16	0,24	916,7
	90	282,7	126,3	0,77	1,74	0,98	223,8

Seguidamente exemplifica-se o cálculo daquelas grandezas à frequência de 30Hz.

- Cálculo de X_L

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi 30 \times 0{,}5 = 94{,}3\Omega$$

- Cálculo de X_C

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi 30 \times 14 \times 10^{-6}} = 378{,}9\Omega$$

- Cálculo de I_L

$$Z_L = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{40^2 + 94{,}3^2} = 102{,}4\Omega$$

$$I_L = \frac{V}{Z_L} = \frac{220}{102{,}4} = 2{,}15A$$

■ Cálculo de I_C

$$I_C = \frac{V}{Z_C} = \frac{220}{378,9} = 0,58A$$

■ Cálculo de I

$$cos\varphi_L = \frac{R}{Z_L} = \frac{40}{102,4} = 0,391$$

$$\varphi = arcos 0,391 = 67^0\, IND$$

$$I = \sqrt{{I_L}^2 + {I_C}^2 + 2 I_L I_C \cos(90^0 + \varphi)}$$

$$I = \sqrt{0,58^2 + 2,15^2 + 2 \times 0,58 \times 2,15 \times cos\,(90^0 + 67^0)} = 1,63A$$

■ Cálculo de Z

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{220}{1,63} = 134,9\Omega$$

DECOMPOSIÇÃO VECTORIAL DA INTENSIDADE DA CORRENTE

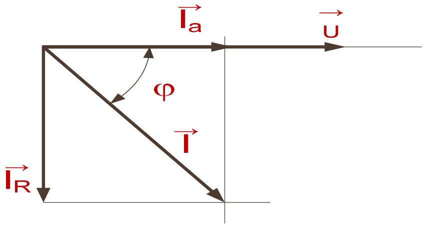
➢ **CASO DE UM CIRCUITO INDUTIVO**

Os circuitos indutivos constituem uma boa parte dos muitos receptores que, no seu conjunto, constituem a carga de uma rede de distribuição, daí a nossa referência especial.

A intensidade da corrente tem, por efeito de indutância, um desfasamento φ relativamente à tensão.

Na figura seguinte temos um gráfico onde podemos ver esse desfasamento e também como o vector $\vec{I}$ pode ser decomposto em dois outros seus componentes:

- $\vec{I_a}$ designado por **componente activa**;
- $\vec{I_r}$ designado por **componente reactiva**;



$\vec{I_a}$ é um vector em fase com $\vec{V}$, e representa a fracção da intensidade da corrente consumida pela parte resistiva do circuito.

$\vec{I_r}$ é um vector em quadratura e atraso relativamente a $\vec{V}$. É a componente da intensidade da corrente utilizada pela indutância para criar o seu próprio campo magnético, por essa razão também designada **corrente magnetizante.**

A componente reactiva da corrente exprime-se em **ampere reactivo**, A_R. A componente activa exprime-se em ampere da mesma forma que a corrente verdadeiramente existente no circuito.

À componente activa I_a está associada a **potência activa**, pelo que se pode escrever

$$P = VI_a$$

À componente reactiva I_r, corresponde a **potência reactiva**, que pode ser igualmente calculada pela expressão

$$Q = VI_r$$

Da figura seguinte podemos ainda deduzir as seguintes expressões:

$$\cos\varphi = \frac{I_a}{I} \qquad e\ portanto \qquad I_a = I\cos\varphi$$

$$\operatorname{sen}\varphi = \frac{I_r}{I} \qquad e\ portanto \qquad I_r = I\operatorname{sen}\varphi$$

Podemos também desenhar o **triângulo das potências** a partir das componentes activa e reactiva da intensidade, depois de as multiplicarmos pelo valor da tensão (figura seguinte).

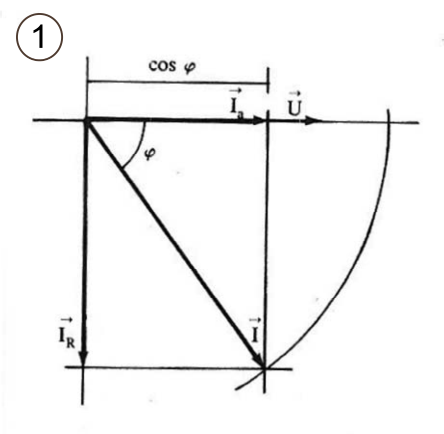
FACTOR DE POTÊNCIA

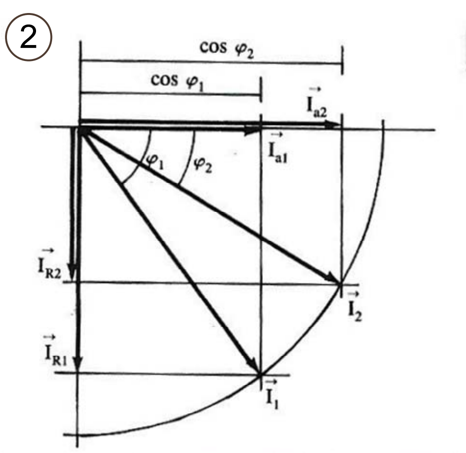
O factor de potência identifica o tipo de carga. Esta é maioritariamente indutiva na rede, pelo que a intensidade da corrente virá, nesses casos, em atraso de um ângulo φ relativamente à tensão.

O ângulo φ é posto igualmente em evidência pelo desfasamento existente entre a intensidade da corrente e a sua componente activa pelo facto desta estar em fase com a tensão. Se admitirmos como unidade de medida o valor da intensidade da corrente no circuito, **o factor de potência**, ou seja, **o $\cos\varphi$ corresponderá à medida da componente activa da corrente.** (figura seguinte 1).

Quanto maior for o ângulo φ, isto é, **quanto mais indutiva for a carga, menor é o factor de potência.**

Por outro lado, se rodarmos o vector $\vec{I}$ no sentido do aumento do ângulo de fase, a componente reactiva aumentará, como se pode verificar através da figura seguinte -2.





Nela se ilustram duas situações. A situação **1** corresponde a uma carga mais indutiva que em **2.** Daí o seu factor de potência ser menor, isto é, $\cos\varphi_1 < \cos\varphi_2$. Em **1** também a componente reactiva é maior do que em **2.**

Para uma carga puramente resistiva, o ângulo de desfasamento seria nulo e nula, portanto, a componente reactiva da corrente.

CORRECÇÃO DO FACTOR DE POTÊNCIA

➢ POSICIONAMENTO DO PROBLEMA

Da intensidade absorvida por um receptor, só uma fracção desta, mais propriamente a sua componente activa, é aproveitada de forma útil.

Decorre, por conseguinte, da análise da figura anterior -2 que **uma dada corrente absorvida será tanto melhor aproveitada quanto maior for a sua componente activa e mais próximo da unidade, portanto, for o factor de potência**. A parte correspondente à sua correspondente reactiva circula simplesmente na rede, sem ser transformada.

A absorção, por parte dos receptores indutivos, de correntes cujo valor é superior ao necessário para o respectivo funcionamento tem importantes implicações a todos os níveis no Sistema Eléctrico de Energia, cujos inconvenientes são seguidamente apontados.

PRODUÇÃO	
IMPLICAÇÕES TÉCNICAS	Necessidade de aumentar a potência instalada nas centrais produtoras. Os grupos terão, assim, de ser sobredimensionados para fazerem face a uma carga reactiva adversa
ECONÓMICAS	Os custos são proporcionais à potência unitária dos grupos
TRANSPORTE E DISTRIBUIÇÃO	
IMPLICAÇÕES TÉCNICAS	As linhas terão igualmente de ser sobredimensionadas para que possam vincular a corrente excedentária. Maiores quedas de tensão em linha $V = ZI$ e maiores perdas $P = ZI^2$.

	Sobredimensionamento de toda a aparelhagem de corte e protecção, como, por exemplo, seccionadores e disjuntores. Aumento da potência dos transformadores estáticos nas subestações transformadoras.
ECONÓMICAS	Linhas de maior secção, naturalmente mais caras. O investimento na sua construção não tem, assim, a contrapartida de maior número de utilizadores, o que se traduz numa perda da potencial receita de facturação Contabilização das perdas por efeito de joule nas linhas. Toda a aparelhagem de rede é de custo mais elevado.
UTILIZAÇÃO	
IMPLICAÇÕES TÉCNICAS	Se se trata de um consumidor de média ou alta tensão, ele próprio terá de prever o sobredimensionamento das linhas e aparelhagem.
ECONÓMICAS	Naturalmente, o agravamento de custos será suportado pelo utilizador

Se o utilizador é de baixa tensão, tipo doméstico, o factor de potência é muito aproximadamente unitário e o distribuidor apenas factura a energia activa consumida. Os custos e inconvenientes derivados da utilização de receptores do tipo indutivo, como lâmpadas fluorescentes e esporadicamente motores, são geralmente suportados pela entidade distribuidora.

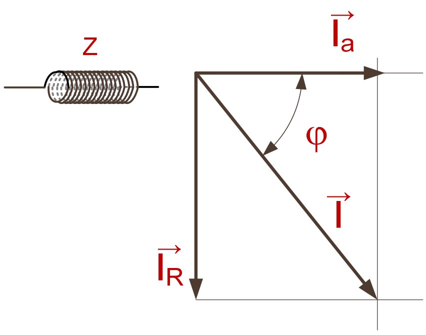
Se o utilizador é de baixa tensão mas possui instalações com baixo factor de potência, então o distribuidor obrigá-lo-á a instalar um contador de energia reactiva, obrigando-o a suportar os custos da sua própria instalação não corrigida.

Para factores de potência cujo valor é igual ou superior a 0,8, o distribuidor não obriga à instalação de contadores de energia reactiva.

➢ COMPENSAÇÃO DO FACTOR DE POTÊNCIA

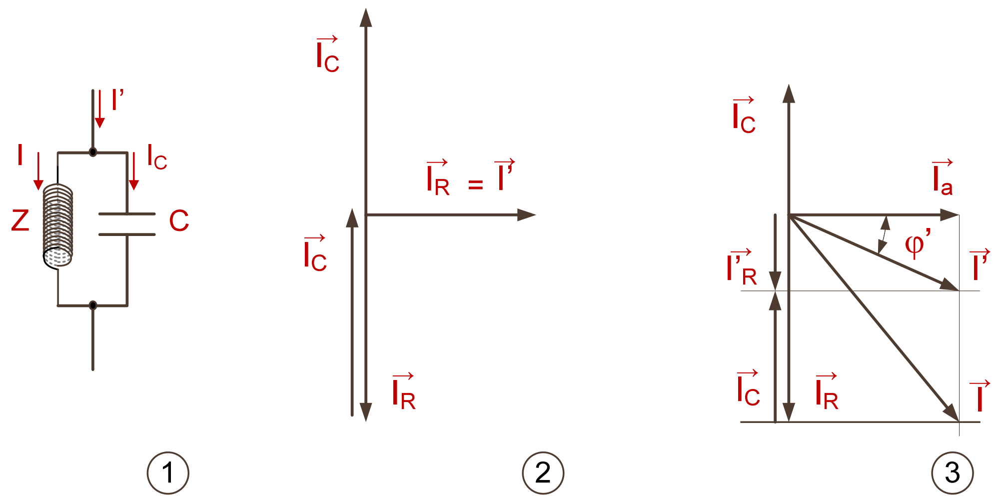
Pelo que ficou dito ressalta a importância da **correcção do factor de potência**, isto é, a possibilidade de o tornar o **mais próximo possível da unidade**.

Consegue-se tal correcção fazendo diminuir a componente reactiva da corrente, recorrendo ao efeito conjugado de capacidade no circuito.



Como sabemos, a componente reactiva da corrente está em quadratura e atraso de 90º relativamente à tensão. Figura ao lado.

Por seu lado, por efeito de capacidade, podemos introduzir no circuito uma corrente reactiva capacitiva I_C, cujo avanço de 90º relativamente a V leva-a a ficar em oposição de fase com a componente indutiva, anulando os seus efeitos. É o que se designa por **compensação total.** (fig. abaixo-2).



Nem sempre é possível fazer a compensação total, uma vez que, em muitos casos, a potência da carga sofre oscilações que fazem variar o factor de potência.

Na figura acima-3 podemos observar um processo de **compensação parcial** do factor de potência.

Inicialmente, antes da correcção portanto, **o vector $\vec{I}$ representa a corrente absorvida pelo aparelho**.

Após correcção, embora no referido aparelho circule a mesma intensidade, o conjunto carga/ condensador absorve uma intensidade de corrente I' significativamente inferior.

Esta corrente I' será tanto menor quanto maior for o factor de potência, igualando a componente activa da corrente quando a compensação é total.

➢ **COMPENSAÇÃO POR QUEBRA INDUTIVA**

O processo normalmente utilizado é a ligação da carga a corrigir, em paralelo com m condensador ou bateria de condensadores estáticos.

Este procedimento conduz-nos a um aumento da tensão no terminal da carga, reduzindo a corrente de linha.

➢ COMPENSAÇÃO POR SÉRIE CAPACITIVA

Uma outra técnica é a ligação em série, com a carga a corrigir, de uma capacidade, o que reduz a reactância daquela sem afectar o valor da corrente.

PROBLEMA RESOLVIDO

1ª PARTE – INSTALAÇÃO NÃO CORRIGIDA

Consideremos um motor monofásico que alimentado à tensão de 220V, 50Hz, consome uma potência de 6kW com $\cos\varphi = 0{,}6$.

Calcular:

a) A intensidade de corrente absorvida pelo motor.

b) O ângulo de desfasamento entre a tensão e a corrente.

c) As componentes activas e reactivas da corrente.

2ª PARTE – CORRECÇÃO PARCIAL DO FACTOR DE POTÊNCIA

Pretende-se melhorar o factor de potência da instalação, elevando-o para 0,9. Qual a capacidade do condensador a ligar em paralelo com a referida instalação?

Representar vectorialmente as intensidades antes e após a correcção.

Desenhar ainda um esquema de montagem onde se mostre a distribuição das correntes.

3ª PARTE – CORRECÇÃO TOTAL DO FACTOR DE POTÊNCIA

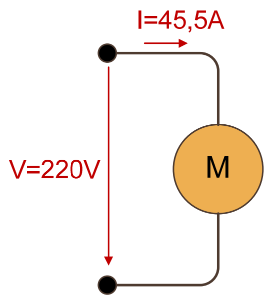
Pretende-se determinar agora o valor da capacidade a ligar em paralelo com o motor, para que aquele não consuma potência reactiva.

Como anteriormente, fazer a representação vectorial das correntes em jogo antes da carga corrigida e após a compensação total.

Resolução:

1ª PARTE

a) $P = VIcos\varphi$



$I = \frac{P}{Vcos\varphi} = \frac{6000}{220 \times 0,6} = 45,5A$

b) $\varphi = arcos\, 0,6 = 53^0\, IND$

c)

$I_a = Icos\varphi \qquad I_a = 45,5 \times 0,6 = 27,3A$

$I_r = Isen\varphi \qquad I_a = 45,5 \times 0,8 = 36,4A$

2ª PARTE

$cos\varphi' = 0,9 \qquad \Longrightarrow \qquad \varphi' = 25,8^0 IND$

Calculemos o valor da corrente I' absorvida pelo agrupamento nesta situação

$cos\varphi' = \frac{I_a}{I'} \qquad \Longrightarrow \qquad I' = \frac{I_a}{cos\varphi'} = \frac{27,3}{0,9} = 30,3A$

Determinemos agora a sua componente reactiva I_r'

$I_r' = I_a\ tg\varphi' \qquad I_r' = 27,3 \times 0,484 = 13,2A_r$

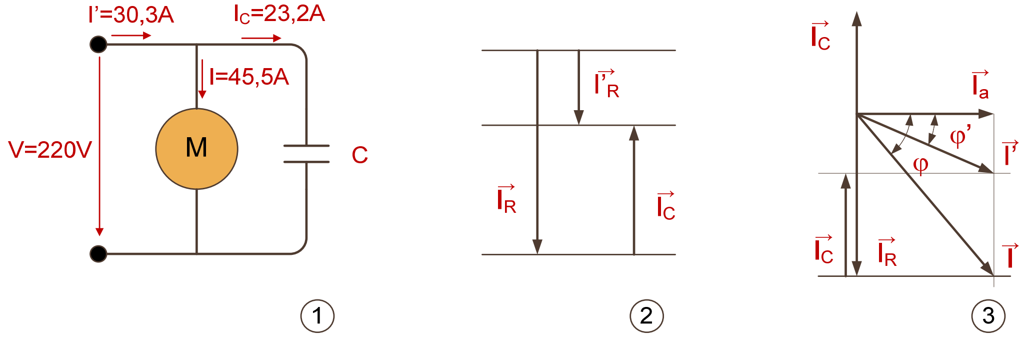
A corrente capacitiva I_c a fornecer pelo condensador a instalar deverá anular a corrente reactiva cujo valor é

$I_r - I'_r$

$I_C = I_r - I'_r = 36,4 - 13,2 = 23,2A_R$

$V_C = X_C I_C \qquad \Longrightarrow \qquad X_C = \frac{V_C}{I_C} = \frac{220}{23,2} = 9,5\Omega$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \qquad \Rightarrow \qquad C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 9,5} = 335\mu F$$



OUTRO PROCESSO: MÉTODO DAS POTÊNCIAS

Calculemos as potências reactivas correspondentes a cada situação.

$$\cos\varphi = 0,6 \qquad Q = VI\operatorname{sen}\varphi = 220 \times 45,5 \times 0,8 = 8kVA_R$$

$$\cos\varphi' = 0,9 \qquad Q' = VI'\operatorname{sen}\varphi' = 220 \times 30,3 \times 0,436 = 2,9kVA_R$$

A variação da potência reactiva foi:

$$AQ = Q - Q' = 8 - 2,9 = 5,1kVA_R$$

O condensador deverá desenvolver uma potência reactiva da mesma grandeza dada pela expressão:

$$Q = X_C I_C^2 \qquad \Rightarrow \qquad Q = X_C \frac{V_C^2}{X_C^2} = \frac{V_C^2}{X_C} \qquad \Rightarrow \qquad X_C = \frac{V_C^2}{Q}$$

$$X_C = \frac{220^2}{5100} = 9,5\Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 9{,}5} = 335\mu F$$

3ª PARTE

$\varphi'' = 0^0, \qquad cos\varphi'' = 1$

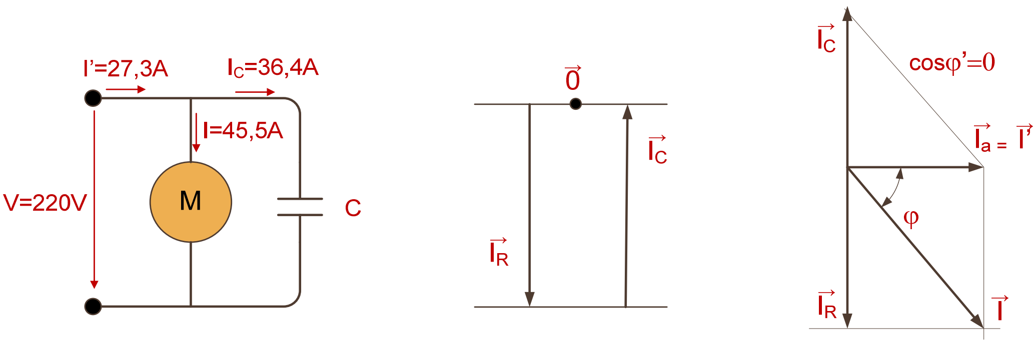
A condição a satisfazer é $I_C = I_R$

O cálculo de I_R já foi feito na alínea c) da 1ª parte do problema, pelo que se dispensa a sua repetição.

$I_C = I_R = 36{,}4\Omega$

$$V_C = X_C I_C \Rightarrow X_C = \frac{220}{36{,}4} = 6\Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 6} = 530{,}5\mu F$$



① ② ③

BIBLIOGRAFIA

Apontamentos Pessoais

LISTA DE PÁGINAS EM VIGOR

PÁGINAS	EM VIGOR
CAPA (Verso em branco)	ORIGINAL
CARTA DE PROMULGAÇÃO (Verso em branco)	ORIGINAL
REGISTO DE ALTERAÇÕES (Verso em branco)	ORIGINAL
1 (Verso em branco)	ORIGINAL
3 (Verso em branco)	ORIGINAL
5 a 60	ORIGINAL
61 (Verso em branco)	ORIGINAL
63 (Verso em branco)	ORIGINAL
LPV-1 (Verso em branco)	ORIGINAL