Sumário

Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

O cliente é a razão do nosso trabalho, a fim de inseri-lo em um novo contexto social de competitividade e empregabilidade.

Introdução

A partir deste fascículo, que tratará das características e do comportamento do circuito RC série em CA, inicia-se o estudo de pequenas associações de componentes ligados a fontes de corrente alternada.

É um momento importante no seu estudo de eletrônica básica, visto que inicia-se a constituição de **circuitos mais complexos** envolvendo componentes que já são conhecidos.

Estude-o cuidadosamente, tendo como objetivo compreender o comportamento desses circuitos que são muito importantes em equipamentos tanto de caráter industrial como de lazer.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leito deverá ter conhecimentos relativos a:

- Resistores.
- Capacitores em corrente alternada.
- Representação fasorial de parâmetros elétricos.

O circuito RC série em corrente alternada

Os circuitos RC série em CA são utilizados como **redes de defasagem** quando se necessita obter uma defasagem entre a tensão de entrada e de saída. A **Fig.1** ilustra este princípio.

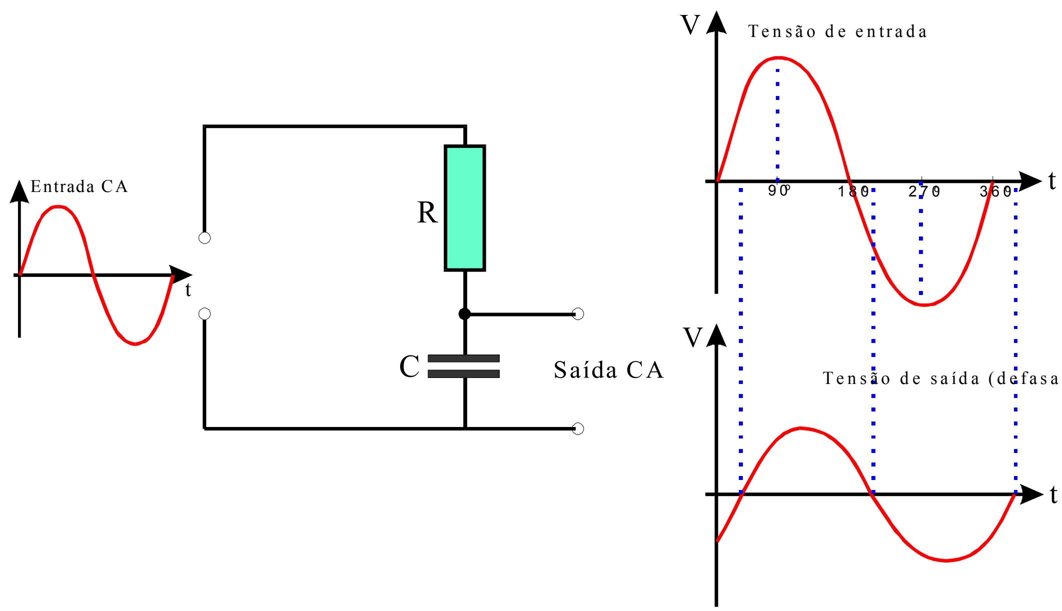


Fig.1 Circuito RC em CA.

Essas redes de defasagem são muito empregadas nos equipamentos industriais, como por exemplo, os controles de velocidade para motores.

A CORRENTE EM CIRCUITOS SÉRIE

A característica fundamental de um circuito série é que a corrente é única em todos os componentes associados. Essa característica se verifica tanto em circuitos alimentados por CC como por CA, como pode ser visto na **Fig.2**.

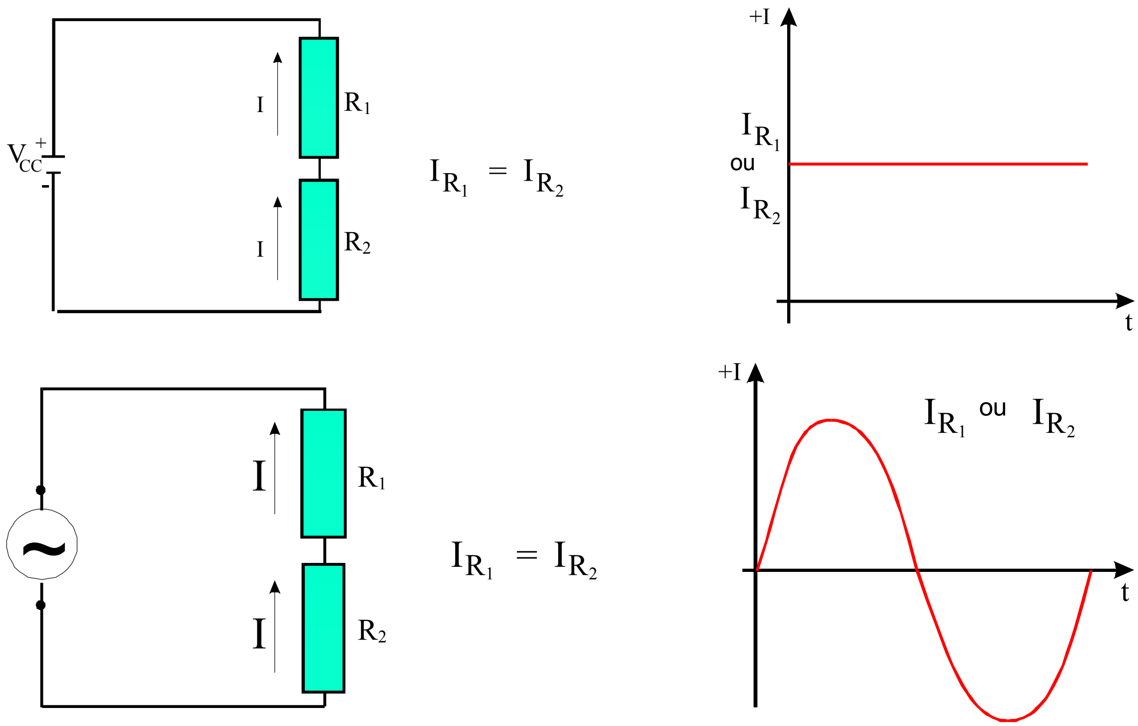


Fig.2 Corrente em circuitos série.

Quando se realiza o estudo de um circuito série em CA com o objetivo de traçar os gráficos senoidais das tensões sobre seus componentes, a corrente é tomada como ponto de referência por ser única em todos os componentes.

GRÁFICOS SENOIDAIS DO CIRCUITO RC SÉRIE

Quando um circuito série formado por um resistor e um capacitor é ligado a uma rede de CA senoidal, ocorre a circulação de corrente, como mostrado na **Fig.3**.

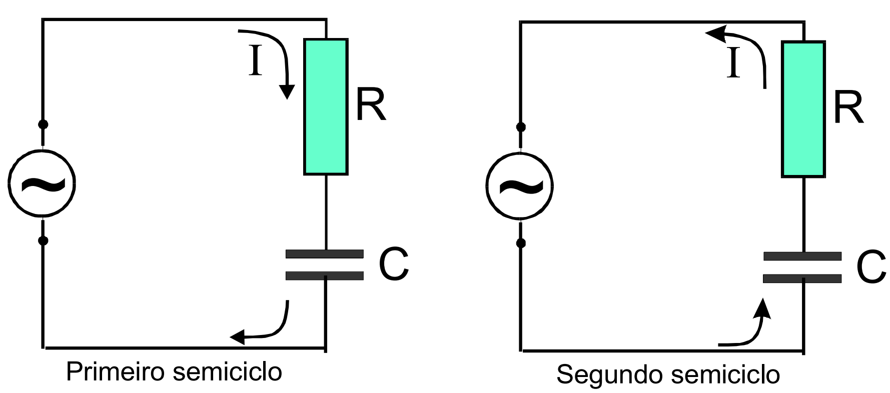


Fig.3 Circulação de corrente em um circuito CA.

A corrente circulante tem a forma senoidal, podendo ser representada através de um gráfico, como ilustrado na **Fig.4**.

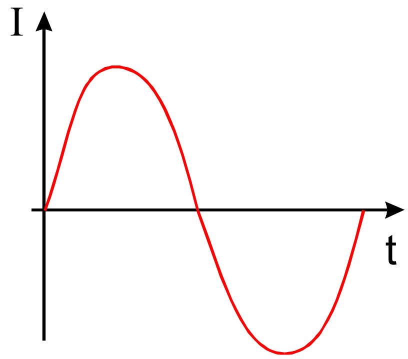


Fig.4 Corrente senoidal.

A circulação de corrente provoca o aparecimento de uma queda de tensão sobre o resistor. Como a corrente tem a forma senoidal, a queda de tensão sobre o resistor também é senoidal e está em fase com a corrente, como pode ser visto na **Fig.5**.

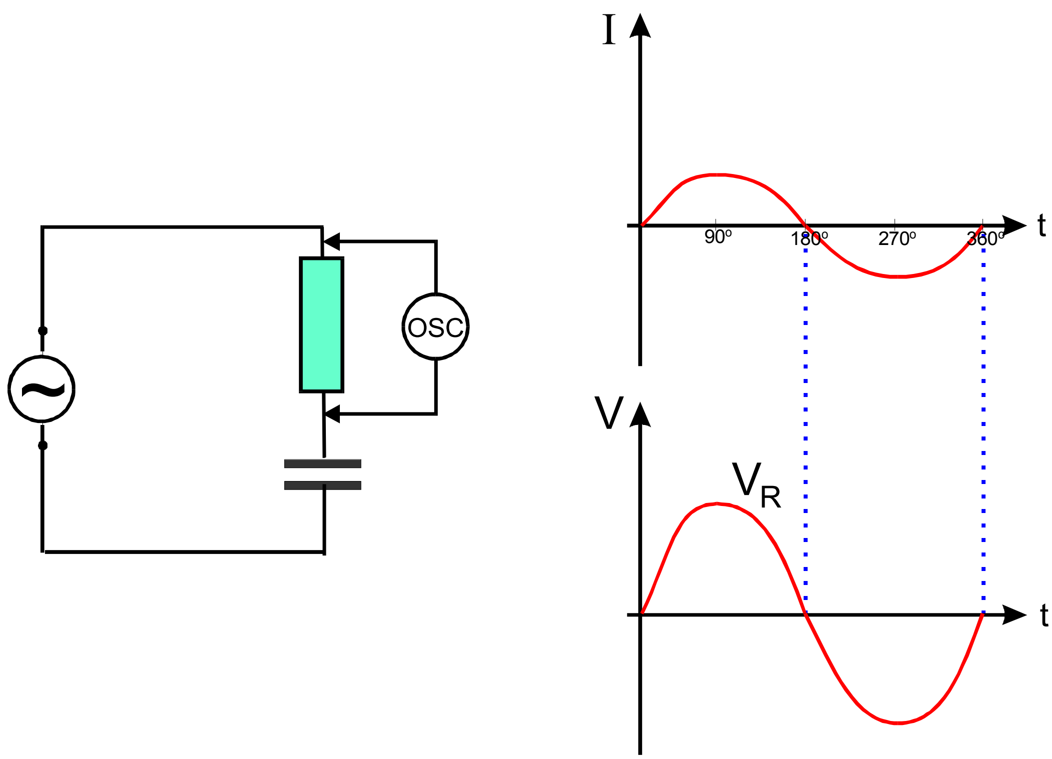


Fig.5 Tensão senoidal em fase com a corrente.

Sobrepondo os gráficos senoidais da corrente e da tensão no resistor nos mesmos eixos, observa-se facilmente este comportamento.

A tensão sobre o capacitor também tem a forma senoidal, como ilustrado na **Fig.6**.

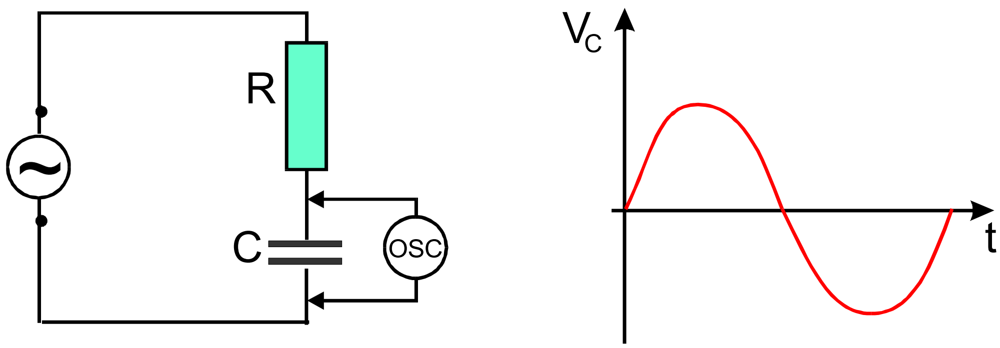


Fig.6 Tensão senoidal sobre o capacitor.

Existe, porém, um fato importante a considerar. A tensão sobre o capacitor está sempre atrasada de 90º com relação a sua corrente.

Por essa razão, a senóide que representa a tensão no capacitor deve ser deslocada 90º ao fazer a sobreposição dos gráficos do circuito, como pode ser visto na **Fig.7**.

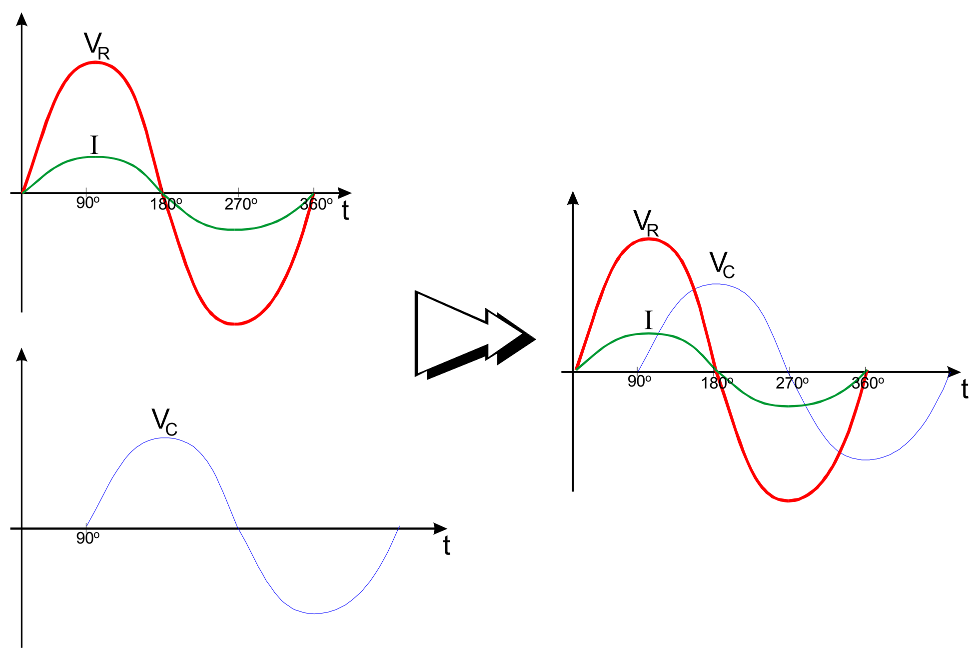


Fig.7 Defasagem de 90° da tensão sobre o capacitor.

O gráfico completo representa o comportamento das tensões e correntes no circuito RC série.

GRÁFICOS FASORIAIS DO CIRCUITO RC SÉRIE

Os gráficos senoidais, apesar de ilustrativos, não são apropriados para o desenvolvimento do cálculo dos parâmetros dos circuitos de CA. Por essa razão, o estudo dos circuitos em CA geralmente é feito através dos gráficos fasoriais.

Para elaborar o gráfico fasorial do circuito RC série, toma-se como ponto de partida o fasor da corrente porque seu valor é único no circuito. Normalmente o fasor I é colocado sobre o eixo horizontal do sistema de referência, como pode ser visto na **Fig.8.**

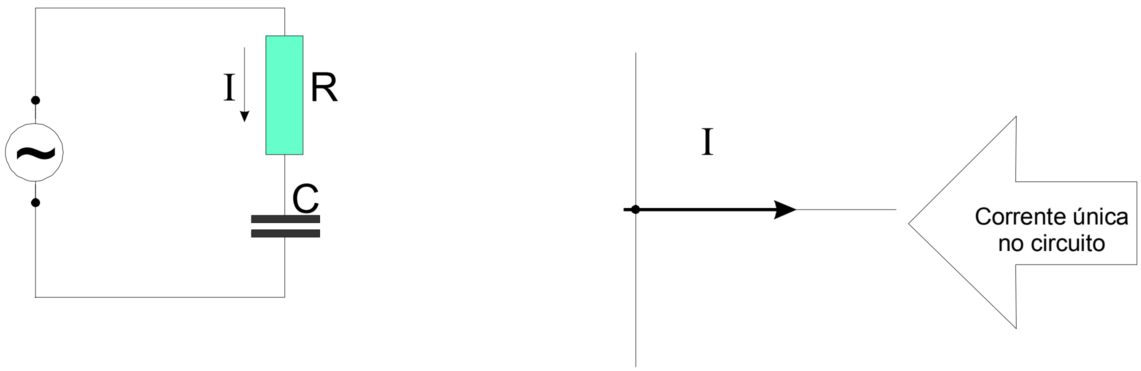


Fig.8 Fasor I do circuito RC.

Partindo-se do princípio de que a tensão sobre um resistor está sempre em fase com a corrente, pode-se representar o fasor V_R sobre o fasor I, como pode ser visto na **Fig.9.**

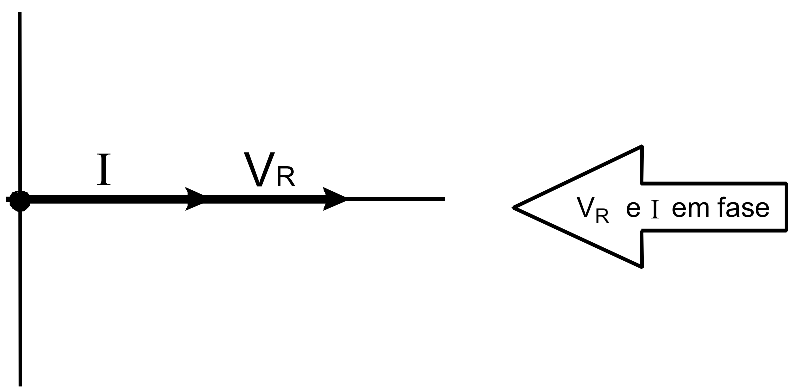


Fig.9 Fasor I e fasor V_R do circuito RC.

Falta ainda representar a tensão sobre o capacitor. Como a tensão no capacitor está atrasada 90º com relação a sua corrente, seu fasor forma um ângulo de 90º com o fasor I, como pode ser visto na **Fig.10**.

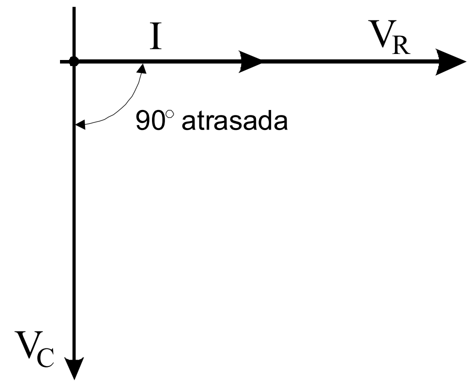


Fig.10 Representação fasorial da corrente, da tensão sobre o resistor e da tensão sobre o capacitor de um circuito RC série.

Impedância do circuito RC série

Quando se aplica a um circuito composto apenas por resistores uma fonte de CC ou CA, a oposição total que esse circuito apresenta à passagem da corrente é denominada de resistência total.

Entretanto, em circuitos de CA que apresentem resistências e reatâncias associadas, a expressão **resistência total** não é aplicada.

A oposição total que os circuitos compostos por resistências e reatâncias apresentam à passagem da corrente elétrica é denominada de **impedância**.

Impedância é oposição total que um circuito composto por resistências e reatâncias apresenta ao fluxo da corrente elétrica.

A impedância é representada pela letra Z e é expressa em ohms.

O circuito RC série em CA é um exemplo típico de circuito que contém resistência e reatância. Por esta razão o circuito RC série tem uma **impedância** que se opõe à passagem da corrente alternada.

A impedância de um circuito não pode ser calculada da mesma forma que uma resistência total de um circuito composto apenas por resistores.

A existência de **componentes reativos**, que defasam correntes ou tensões, torna necessário o uso de formas particulares para o cálculo da impedância de cada tipo de circuito.

Tomando-se como exemplo o circuito RC série, a equação da impedância pode ser encontrada a partir da análise do gráfico fasorial das tensões mostrado na **Fig.11**.

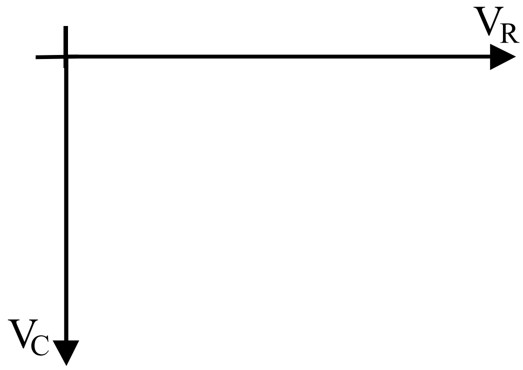


Fig.11 Gráfico fasorial das tensões.

Dividindo-se os fasores por um valor I (corrente), obtém-se:

$$X_C = V_C/I \qquad (1)$$

$$R = V_R/I \qquad (2)$$

Então, pode-se redesenhar o gráfico fasorial conforme mostra a **Fig.12**.

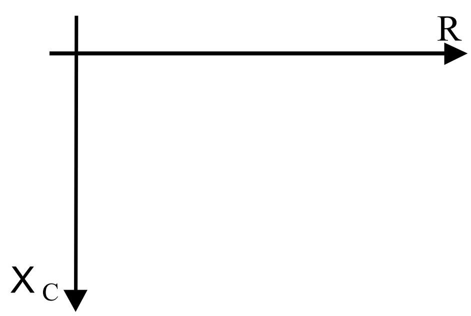


Fig.12 Diagrama fasorial de X_c e R.

O gráfico mostra que a resistência ôhmica do resistor e a reatância capacitiva do capacitor estão defasadas de 90º.

A impedância do circuito RC é a soma dos efeitos de X_C e R, ou seja, a soma entre o fasor X_C e R.

Graficamente, essa soma é a resultante do sistema de fasores X_C e R e pode ser matematicamente calculada pelo Teorema de Pitágoras, uma vez que os fasores R, X_C e Z formam um triângulo retângulo, como pode ser visto na **Fig.13**.

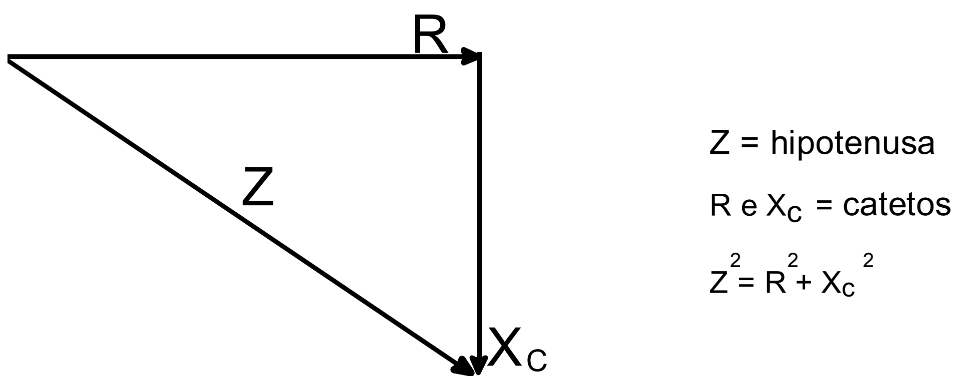


Fig.13 Determinação da resultante pelo teorema de Pitágoras.

Isolando o valor de Z, obtém-se a equação para o cálculo da impedância do circuito RC série.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \tag{3}$$

onde

Z = impedância em Ω

R = resistência do resistor em Ω

X_C = reatância capacitiva em Ω.

Esta equação pode ser desenvolvida para isolar R ou X_C :

$$R = \sqrt{Z^2 - X_C^2} \tag{4}$$

$$X_C = \sqrt{Z^2 - R^2} \tag{5}$$

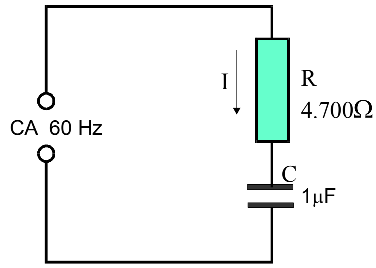
A seguir, são apresentados dois exemplos que ilustram a utilização da equação da impedância do circuito RC série.

Exemplo 1:

Dado o circuito da figura abaixo, determinar a impedância Z.

Dados:

R = 4.700Ω
C = 1μF
f = 60Hz



Solução:

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi \times f \times C} = \frac{1.000.000}{6{,}28 \times 60 \times 1}$$

$$X_c = 2.654\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{4.700^2 + 2.654^2}$$

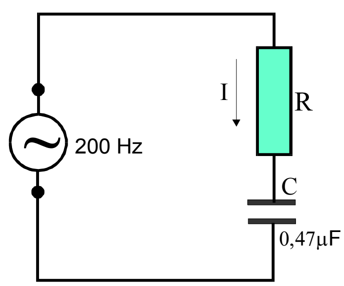
$$Z = 5.397\Omega$$

Exemplo 2:

Determinar o valor de R para que a impedância do circuito abaixo seja de 3800Ω.

Dados:

C = 0,47μF
f = 200Hz
Z = 3.800Ω



Solução:

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi \times f \times C} = \frac{1.000.000}{6{,}28 \times 200 \times 0{,}47}$$

$$X_c = 1.694\Omega$$

$$R = \sqrt{Z^2 - X_C^2} = \sqrt{3.800^2 - 1.694^2}$$

$$R = 3.402\Omega$$

A corrente no circuito RC série

A corrente em um circuito RC série aplicado a uma rede de CA depende da tensão aplicada e da impedância que o circuito apresenta.

Os valores de V, I e Z se relacionam segundo a Lei de Ohm, como ilustrado na **Fig.14**.

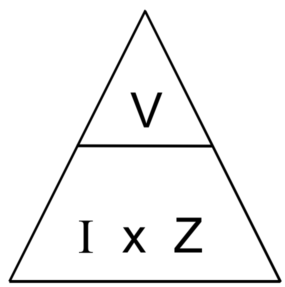


Fig.14 Lei de Ohm.

A seguir, estão apresentados dois exemplos que ilustram a aplicação da equação.

<u>Exemplo 3</u>:

Determinar a corrente no circuito da figura abaixo.

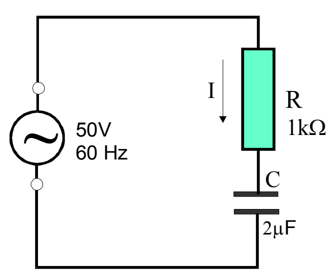
Dados:

$R = 1.000\Omega$

$C = 2\mu F$

$f = 60Hz$

$V_{CA} = 50V$



Solução:

Primeiro, calcula-se a impedância Z :

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi \times f \times C} = \frac{1.000.000}{6{,}28 \times 60 \times 2}$$

$$X_C = 1.326\Omega.$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{1.000^2 + 1.326^2}$$

$$Z = 1.661\Omega.$$

Dispondo de Z, pode-se agora calcular I:

$$I = \frac{V_T}{Z} = \frac{50}{1.661}$$

$$I = 0{,}03A \text{ ou } I = 30mA.$$

Exemplo 4:

Determinar a corrente no circuito da figura abaixo.

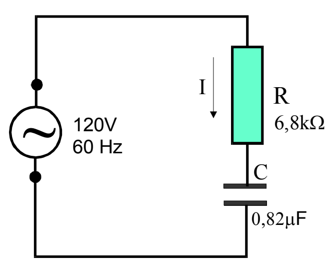
Dados:

$R = 6.800\Omega$

$C = 0{,}82\mu F$

$f = 60Hz$

$V_T = 120V$



Solução:

A impedância Z pode ser calculada como :

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi \times f \times C} = \frac{1.000.000}{6{,}28 \times 60 \times 0{,}82}$$

$$X_C = 3.236\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{6.800^2 + 3236^2}$$

$$Z = 7.530\Omega$$

Logo, a corrente I é dada por :

$$I = \frac{V_T}{Z} = \frac{120}{7.530}$$

$$I = 0{,}0159A.$$

As tensões no circuito RC série

As tensões no capacitor e no resistor estão defasadas 90º entre si, conforme mostra o gráfico fasorial do circuito RC série ilustrado na **Fig.11**. Como no caso da impedância, a tensão total é determinada pela resultante dos dois fasores, como ilustrado na **Fig.15**.

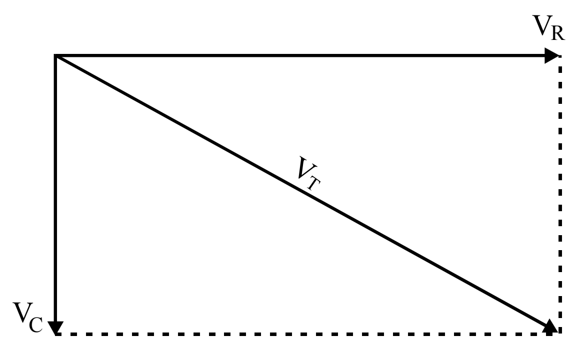


Fig.15 Tensão total.

$$V_T = \sqrt{V_R^2 + V_C^2} \quad (6)$$

onde

V_T = tensão aplicada ao circuito em volt
V_R = queda de tensão no resistor em volt
V_C = queda de tensão no capacitor em volt

Da **Eq.(6)** pode-se obter a tensão no resistor ou no capacitor :

$$V_R = \sqrt{V_T^2 - V_C^2} \quad (7)$$

$$V_C = \sqrt{V_T^2 - V_R^2} \quad (8)$$

Quando se dispõe da corrente no circuito, podem-se calcular as tensões no resistor e no capacitor com base na Lei de Ohm:

$$V_C = IX_C \tag{9}$$

$$V_R = IR \tag{10}$$

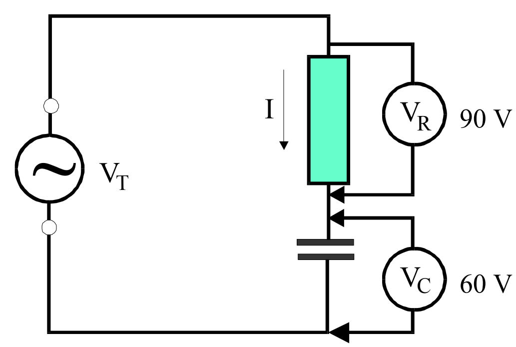
A seguir são apresentados dois exemplos de cálculo das tensões no circuito RC série em CA.

Exemplo 5:

Determinar a tensão V_T aplicada ao circuito da figura abaixo.

Dados:

$V_R = 90V$
$V_C = 60V$



Solução:

$$V_T = \sqrt{V_R^2 + V_C^2} = \sqrt{90^2 + 60^2}$$

$V_T = 108V$

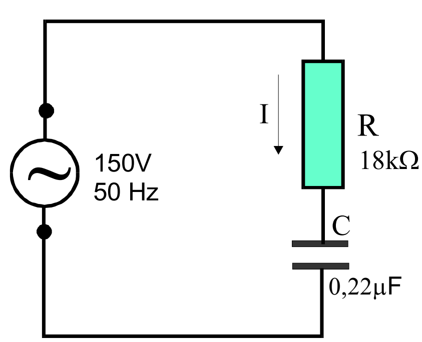
É importante observar que não se pode simplesmente somar as quedas de tensão V_C e V_R para obter-se V_T, porque as tensões são defasadas, resultando em uma soma fasorial.

Exemplo 6:

Determinar os valores de V_R e V_C no circuito da figura abaixo.

Dados:

$V_T = 150V_{CA}$
$R = 1.800\Omega$
$C = 0{,}22\mu F$
$f = 50Hz$



<u>Solução</u>:

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi \times f \times C} = \frac{1.000.000}{6,28 \times 50 \times 0,22}$$

$$X_C = 14,476\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{18.000^2 + 14.476^2}$$

$$Z = 23.099\Omega$$

Dispondo-se de Z e da tensão total, pode-se determinar a corrente :

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{150}{23.099}$$

$$I = 6,49mA$$

Portanto, tem-se que :

$$V_R = IR = 0,00649 \text{ x } 18.000$$

$$V_R = 116,8V$$

$$V_C = IX_C = 0,00649 \text{ x } 14.476$$

$$V_C = 93,9V$$

Esses valores de tensão podem ser conferidos da seguinte forma :

$$V_T = \sqrt{V_R^2 + V_C^2} = \sqrt{116,8^2 + 93,9^2}$$

$$V_T = 149,86V$$

Considerando o arredondamento, a equação da tensão total comprova que as tensões V_R e V_C estão corretas.

Rede de defasagem RC

O circuito RC série é utilizado normalmente como forma de se obter uma tensão CA defasada a partir de uma CA disponível. Quando o circuito RC é usado com essa finalidade, normalmente é chamado de **rede de defasagem RC.** A **Fig.16** ilustra este princípio.

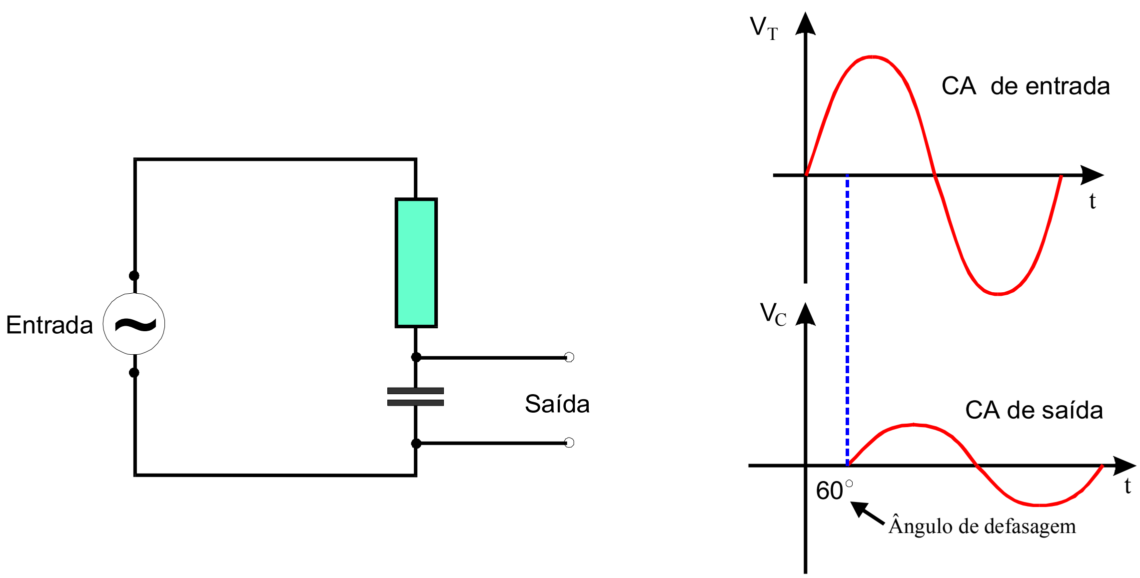


Fig.16 Rede e defasagem RC.

A tensão aplicada à rede de defasagem corresponde à tensão V_T do gráfico fasorial e a tensão de saída ao vetor V_C, uma vez que a saída é tomada sobre o capacitor.

O ângulo formado entre os fasores V_T e V_C (por exemplo: 60°), será o ângulo de defasagem entre as senóides de entrada e saída do circuito, como mostrado na **Fig.17**.

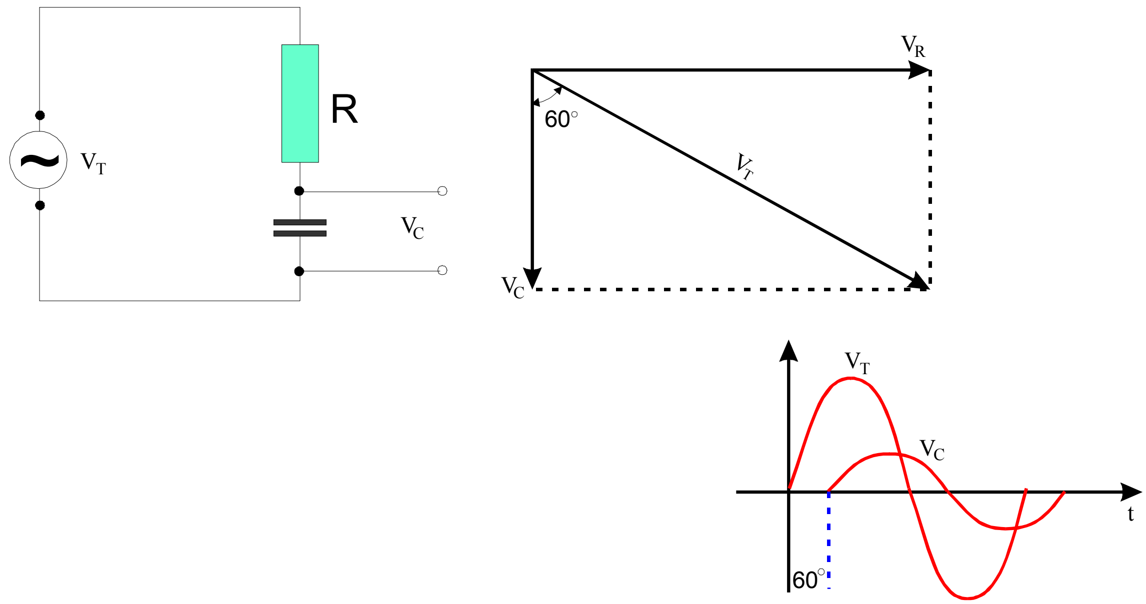


Fig.17 Representação das tensões V_T e V_C.

O ângulo de defasagem que uma rede RC provoca pode ser determinada a partir dos valores de V_R, V_C e V_C (medidos no circuito) ou dos valores de R e C e f.

DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE DEFASAGEM

O gráfico fasorial do circuito RC pode ser apresentado de duas maneiras, conforme mostrado na **Fig.18**.

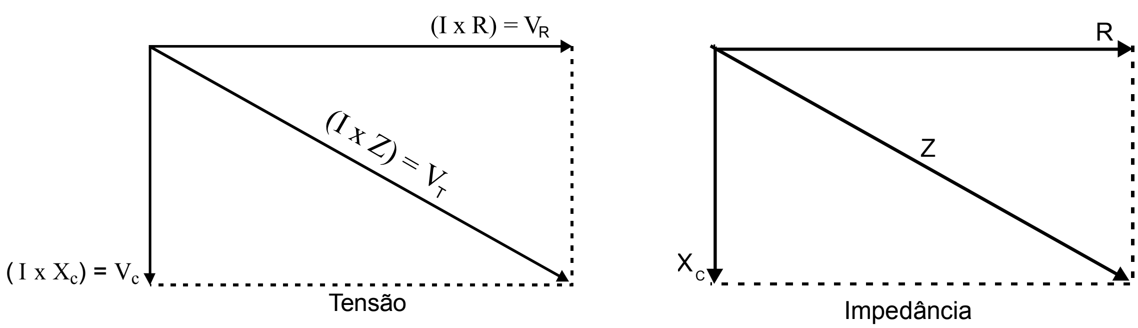
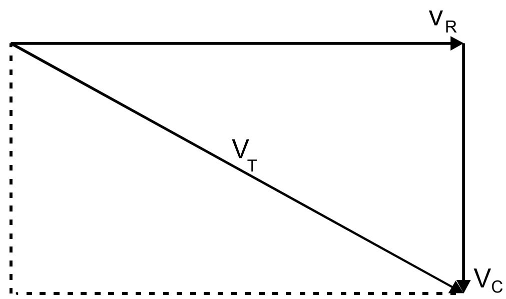


Fig.18 Gráfico fasorial do circuito RC.

Note que os ângulos nos dois gráficos são os mesmos.

Os fasores de V_C ou X_C podem ser trocados de posição de forma a se obter triângulos retângulos, conforme mostrado na **Fig.19**



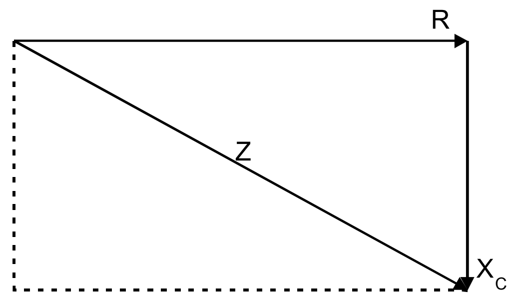
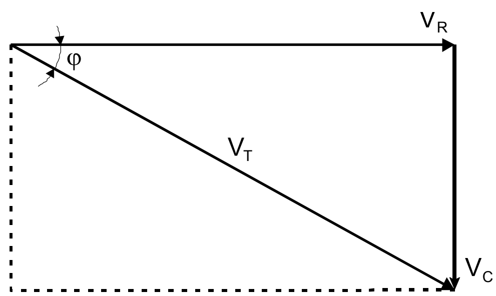


Fig.19 Fasores V_C e X_C.

O ângulo formado entre os fasores V_R e V_T (ou R e Z) é representado pela letra grega φ (lê-se fi), mostrado na **Fig.20.**



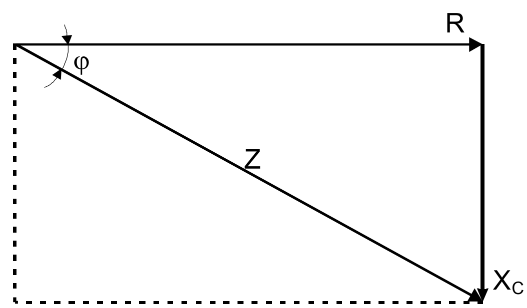


Fig.20 Ângulo entre os vetores V_R e V_T

Se os valores de V_R e V_T são conhecidos (medindo-se o circuito em funcionamento), pode-se determinar o cosseno do ângulo, conforme ilustrado na. **Fig.21**.

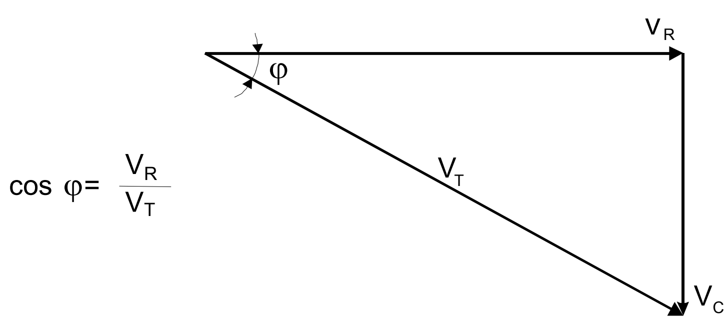


Fig.21 Cosseno do ângulo entre V_R e V_T.

Conhecendo-se o cosseno de um ângulo, o seu valor pode ser determinado através de uma tabela ou de uma máquina de calcular.

Da mesma forma, o ângulo φ pode ser determinado conhecendo-se os valores de R e Z, como ilustrado na **Fig.22**.

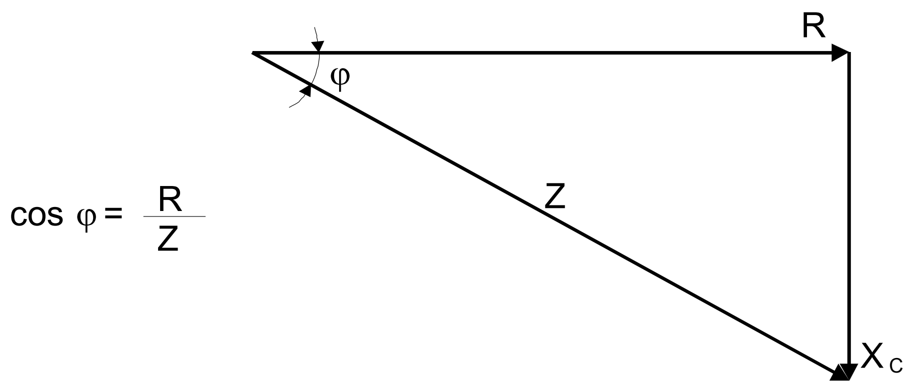


Fig.22 Valores de R e Z também levam a φ.

Sabendo-se o ângulo entre V_R e V_T (ou R e Z), pode-se determinar o ângulo entre V_C e V_T ou R e Z, como ilustrado na **Fig.23**.

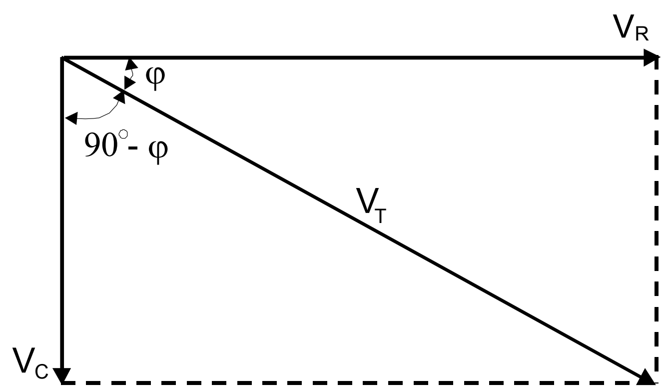


Fig.23 Ângulo entre os fasores V_C e V_T.

Quando o ângulo φ entre V_R e V_T (ou R e Z) é menor que 45°, o circuito é dito **predominantemente resistivo**.

Quando o ângulo φ entre V_R e V_T (ou R e Z) é maior que 45°, o circuito é dito **predominantemente capacitivo**.

A seguir, são apresentados dois exemplos de determinação de defasagem provocada por redes RC.

Exemplo 7:

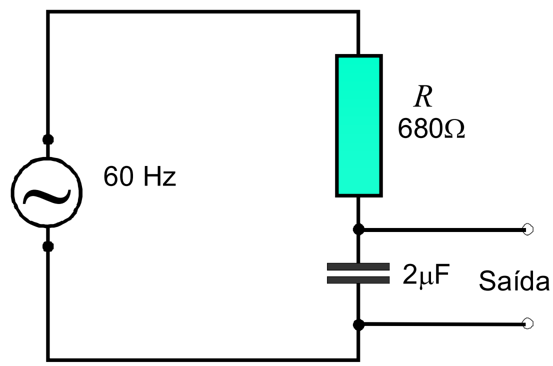
Determinar o ângulo de defasagem entre a CA de entrada e a CA de saída do circuito da figura abaixo.

Dados:

$R = 680\Omega$

$C = 2\mu F$

$f = 60Hz$



Solução:

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

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi \times f \times C} = \frac{1.000.000}{6,28 \times 60 \times 2}$$

$$X_C = 1.326\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C{}^2} = \sqrt{680^2 + 1326^2}$$

$$Z = 1.490\Omega$$

Dispondo-se de R e Z, pode-se então calcular cos φ

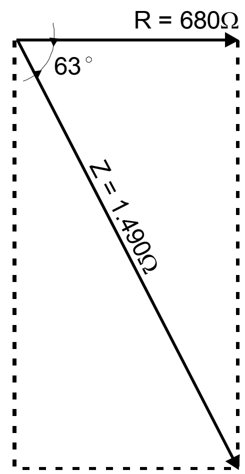
$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{680}{1.490}$$

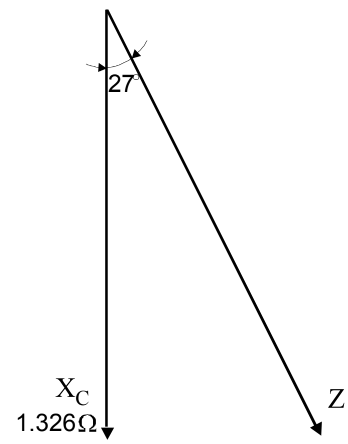
$$\cos\varphi = 0,456$$

Consultando uma tabela de cossenos ou usando calculadora, tem-se que:

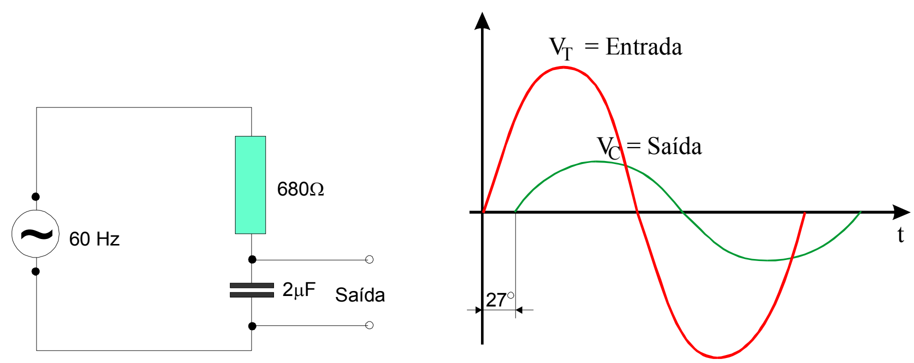
$\varphi = 63°$ (circuito predominantemente capacitivo)

Conhecendo-se o ângulo φ entre R e Z, é possível construir o gráfico fasorial de R e Z e de X_C e Z, como mostrado na figura abaixo.





Isto significa que a senóide da saída do circuito (V_C) estará 27° defasada com relação a entrada, como pode ser visto na figura abaixo.



<u>Exemplo 8</u>:

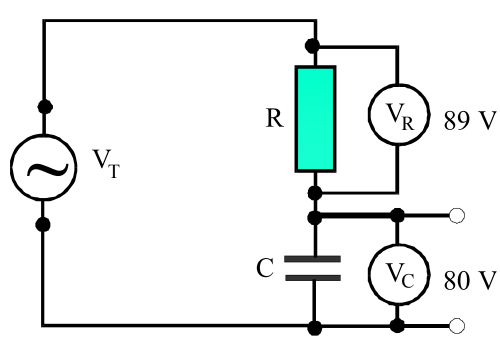
Determinar a defasagem entre a entrada e a saída da rede mostrada na figura abaixo.

Dados:

$V_R = 89V$

$V_C = 80V$

$V_T = 120V$

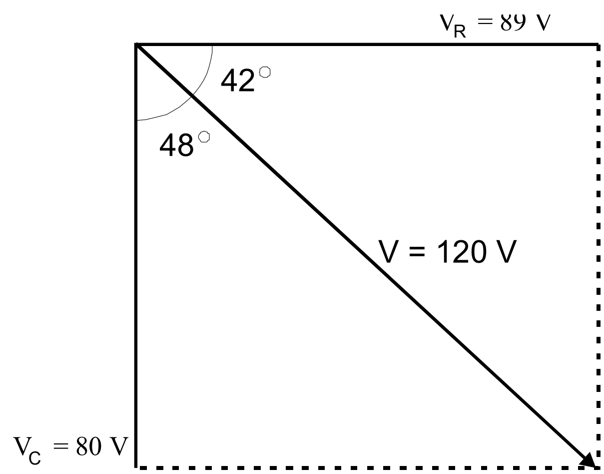


Solução:

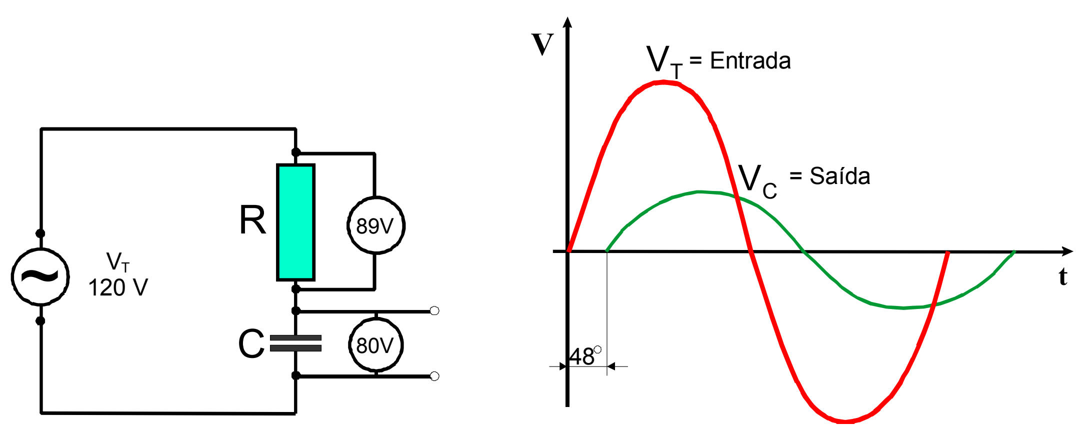
$$\cos\varphi = \frac{V_R}{V_T}$$

$$\cos\varphi = 0{,}74 \qquad \varphi = 42°$$

A figura mostra o gráfico fasorial das tensões.



Como pode ser visto na figura abaixo, a senóide de saída está defasada de 48° em relação à da entrada.



Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. O que se entende por impedância ?

2. Como se determina a impedância de um circuito RC série ?

3. Em um circuito RC série em CA, seja V_R e V_C as quedas de tensão sobre o resistor e o capacitor, respectivamente. Determinar a tensão V_T aplicada ao circuito.

BIBLIOGRAFIA

DAWES, CHESTER L. **Curso de Eletrotécnica**; Corrente Alternada. A course in electrical engineering Trad. de João Protásio Pereira da Costa. 18.ª ed., Porto Alegre, Globo, 1974. vol.4

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**. 5.ª ed., Rio de Janeiro.