

|                          |   |
|--------------------------|---|
| EXPERIÊNCIA<br><b>10</b> | <b>CIRCUITOS RC SÉRIE<br/>CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA</b>   |
| <b>OBJETIVOS:</b>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aprender a ler os valores dos capacitores de poliéster e cerâmico;</li> <li>- Verificar o comportamento do indutor em corrente alternada;</li> <li>- Verificar o comportamento do capacitor em corrente alternada;</li> <li>- Verificar experimentalmente o circuito RC série, RL série.</li> <li>- Aprender medir defasagem com o osciloscópio.</li> <li>- Corrigir o fator de potência de um circuito elétrico.</li> </ul> |

## CONCEITOS TEORICOS ESSENCIAIS

### Defasagem entre sinais alternados

A diferença de fase entre dois sinais de mesma frequência é chamada de defasagem. Para que a defasagem possa ser utilizada matematicamente de um modo mais fácil, é importante estabelecer um dos sinais como referência.

### Defasagem entre Tensão e Corrente

A defasagem entre tensão e corrente é simbolizada por  $\varphi$ , tendo a corrente como referência. Consideremos uma tensão  $v(t) = V_p \cdot \cos(\omega t + \theta_v)$  e uma corrente  $i(t) = I_p \cdot \cos(\omega t + \theta_i)$ , sendo  $i(t)$  a referência. Neste caso a defasagem é dada por  $\varphi = \theta_v - \theta_i$ .

Se  $v(t)$  estiver adiantado em relação a  $i(t)$ , a defasagem  $\varphi$  será positiva

No diagrama fasorial, a seta entre os fasores  $V$  e  $I$  tem a mesma orientação que a frequência angular  $\omega$ , indicando que a defasagem está positiva, isto é a tensão está adiantada em relação à corrente.

Se  $v(t)$  estiver atrasado em relação a  $i(t)$ , a defasagem  $\varphi$  será negativa

No diagrama fasorial, a seta entre os fasores  $V$  e  $I$  tem a mesma orientação oposta à da frequência angular  $\omega$ , indicando que a defasagem está negativa, isto é a tensão está atrasada em relação à corrente.

### Medida de Defasagem

No osciloscópio além das medidas de tensão e tempo já estudadas anteriormente, é possível também medir as defasagens entre as formas de onda gerada por circuitos defasadores. Com isso podemos determinar o ângulo em graus da defasagem entre os dois sinais.

É possível analisar também pelas formas de onda qual se o sinal está atrasado ou adiantado em relação a uma referência.

Mede-se, então, o período da forma de onda  $T$  e depois a variação de tempo entre as duas formas de onda, por fim determina-se a defasagem que pode ser calculada em graus ou em radianos pelas equações abaixo:

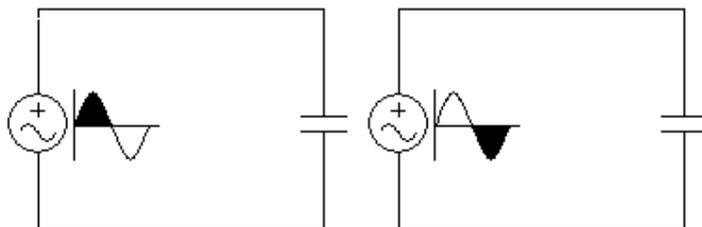
$$\Delta\theta = \frac{\Delta n}{T} \cdot 360 \quad \text{ou} \quad \Delta\theta = \frac{\Delta n}{T} \cdot 2\pi$$

## Comportamento do capacitor em CA

Como observado no experimento anterior podemos analisar o comportamento de carga e descarga do capacitor em corrente contínua. No entanto em corrente alternada o comportamento do capacitor muda radicalmente devido a troca de polaridade da fonte de alimentação.

Os capacitores despolarizados podem funcionar em corrente alternada porque cada uma de suas armaduras pode receber tanto potencial positivo como negativo.

Quando o capacitor é conectado a rede alternada, a troca sucessiva de polaridade de tensão é aplicada às armaduras do capacitor.



A cada semiciclo, a armadura que recebe potencial positivo entrega a fonte, enquanto a armadura que está ligada ao potencial negativo recebe elétrons com esta alternância de polaridade, uma mesma armadura recebe ora o ciclo positivo ora o ciclo negativo da fonte. Isso faz com que circule uma corrente alternada no circuito embora as cargas não passem de uma armadura para outra no capacitor através do dielétrico.

## Reatância Capacitiva

Os processos alternados de carga e descarga continuamente de um capacitor ligado a corrente alternada cria uma resistência à passagem da corrente no circuito. Essa resistência é denominada de reatância capacitiva pela notação de  $X_C$  e é expressa em ohms ( $\Omega$ ) através da expressão:

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot F \cdot C}$$

Onde:

$X_C$  = Reatância Capacitiva;

$2\pi$  = Constante (6,28)

F = Freqüência da corrente alternada em Hz;

C = Capacitância do capacitor em (F) Farad.

Os fatores que influenciam a reatância capacitiva de um capacitor são sua capacitância e a freqüência da fonte.

A tensão aplicada no circuito somente influencia na intensidade de corrente do circuito.

Quando um capacitor é conectado a uma fonte CA, estabelece-se um circuito elétrico onde estão em jogo três valores:

- Tensão aplicada;
- Reatância capacitiva;
- Corrente circulante.

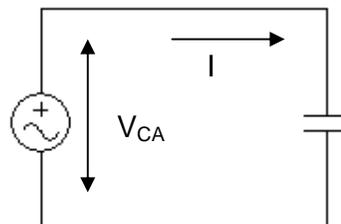
Esses três valores estão relacionados entre si nos circuitos de CA da mesma forma que nos circuitos de CC, ou seja, através da lei de Ohm.

$$V_C = I \times X_C$$

Onde:  $V_C$  é a tensão no capacitor em V;

$I$  é a corrente (eficaz) no circuito em A;

$X_C$  é a reatância capacitiva em  $\Omega$ ;



## Reatância Indutiva

O processo crescente e decrescente armazenamento de campo magnético continuamente de um indutor ligado a corrente alternada cria uma resistência à passagem da corrente no circuito. Essa resistência é denominada de reatância indutiva pela notação de  $X_L$  e é expressa em ohms ( $\Omega$ ) através da expressão:

$$X_L = 2\pi \cdot F \cdot L$$

Onde:

$X_L$  = Reatância Indutiva;

$2\pi$  = Constante (6,28)

F = Freqüência da corrente alternada em Hz;

L = Indutância do indutor em (H) Henry.

Os fatores que influenciam a reatância indutiva de um indutor são sua indutância e a freqüência da fonte.

A tensão aplicada no circuito somente influencia na intensidade de corrente do circuito.

Quando um indutor é conectado a uma fonte CA, estabelece-se um circuito elétrico onde estão em jogo três valores:

- Tensão aplicada;
- Reatância Indutiva;
- Corrente circulante.

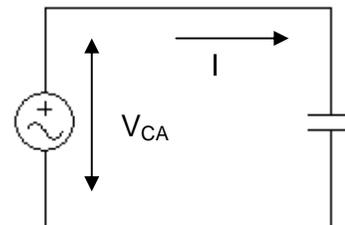
Esses três valores estão relacionados entre si nos circuitos de CA da mesma forma que nos circuitos de CC, ou seja, através da lei de Ohm.

$$V_C = I \times X_L$$

Onde:  $V_L$  é a tensão no capacitor em V;

I é a corrente (eficaz) no circuito em A;

$X_L$  é a reatância capacitiva em  $\Omega$ ;



## Circuitos RC e RL

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

Entretanto, em circuitos CA que apresentem resistências e reatâncias associadas, a expressão resistência total não é aplicável. A oposição total que os circuitos apresentam à passagem da corrente elétrica é denominada de impedância.

## Impedância

Impedância(Z), em ohm ( $\Omega$ ), é um número complexo que caracteriza um dispositivo ou circuito e reflete tanto a oposição total que ela impõe à passagem da corrente alternada quanto a defasagem total entre a tensão e a corrente alternada.

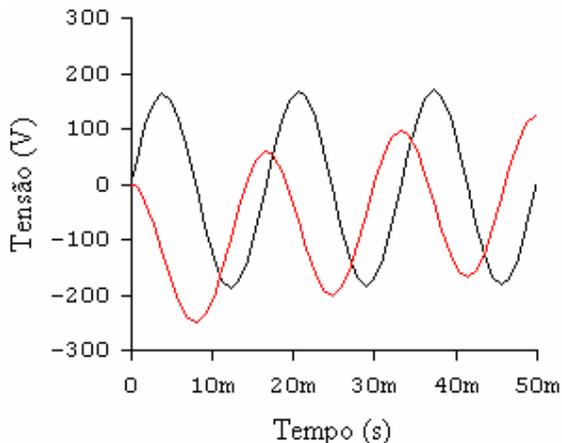
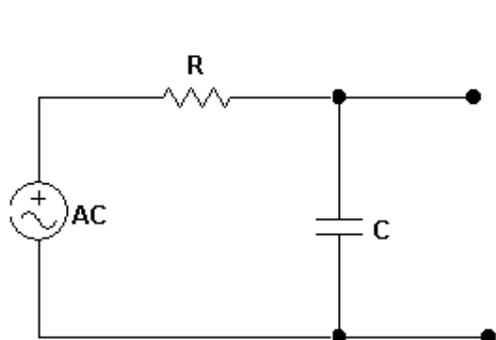
A impedância (Z) é composta por uma componente real denominada de resistência (R) e por uma componente imaginária denominada reatância(X).

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

correntes ou tensões, fazem-se necessário de uso de formas particulares para o cálculo da impedância de cada tipo de circuito CA.

### Circuito RC série em corrente alternada

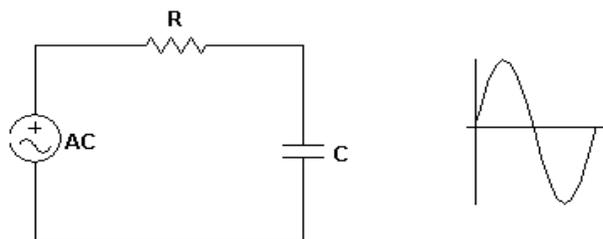
Os circuitos RC série em CA são utilizados como redes de defasamento quando se necessita obter um defasamento entre a tensão de entrada e a tensão de saída.



Estas defasagens são muito importantes e utilizadas nos equipamentos industriais como, por exemplo, os controles de velocidade para motores.

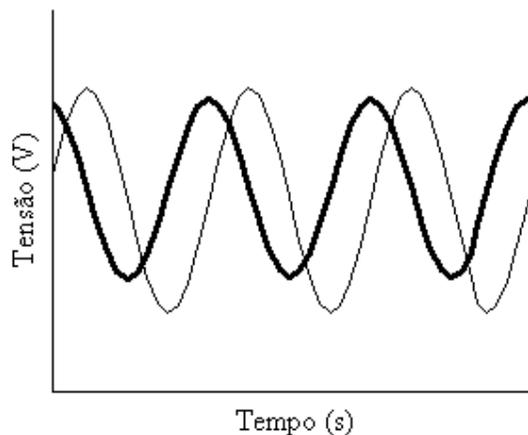
Para melhor compreendermos o funcionamento do circuito RC série em CA, é necessário traçar os gráficos senoidais das tensões sobre seus componentes.

Quando um circuito série formado por um resistor e um capacitor e ligado a uma fonte CA senoidal, ocorre a circulação da corrente. A corrente circulante tem a forma senoidal e pode ser representada através de um gráfico.



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 em fase com a corrente.

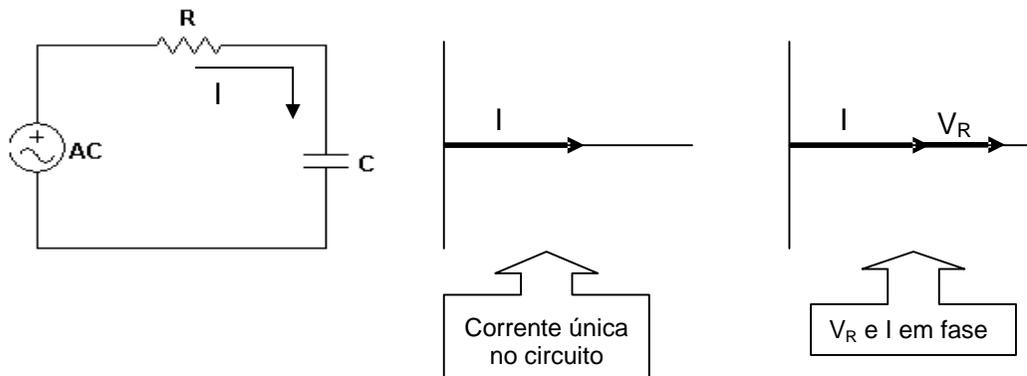
A tensão no capacitor também tem a forma senoidal. Existe, porém um fator importante a considerar. A tensão sobre o capacitor está sempre atrasada em relação a sua corrente. Por isso, a senóide que representa a tensão no capacitor aparecerá deslocada ao se fazer a sobreposição dos gráficos. O gráfico completo representa o comportamento das tensões e correntes no circuito RC série.



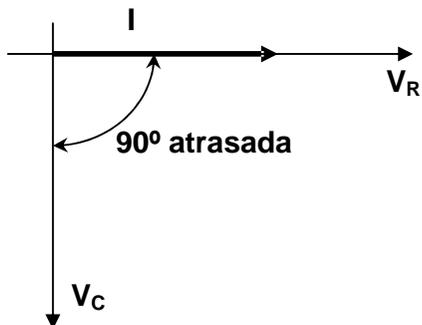
Os gráficos senoidais não são apropriados para o desenvolvimento do cálculo dos parâmetros dos circuitos CA. Por isso, o estudo dos circuitos CA é geralmente feito através dos gráficos vetoriais.

Para montar o gráfico vetorial do circuito RC série, toma-se como ponto de partida o vetor de corrente porque seu valor é único no circuito, Normalmente o vetor  $I$  é colocado sobre o eixo X no sistema referencial.

Partindo do princípio que a tensão sobre um resistor está sempre em fase com a corrente, pode-se representar o vetor  $V_R$  sobre o vetor  $I$ .



Como a tensão no capacitor está atrasada  $90^\circ$  com relação à sua corrente. O seu o vetor forma um ângulo de  $90^\circ$  com o vetor da corrente. A partir desse gráfico, é possível determinar os parâmetros do circuito.



### Impedância no circuito RC série em CA

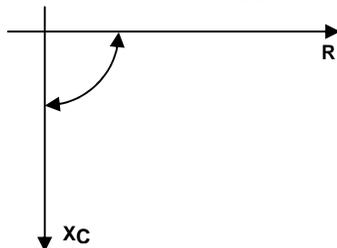
Como já visto anteriormente, a impedância de um circuito é a oposição que este circuito oferece à passagem de CA. Ela pode ser determinada a partir da análise do gráfico vetorial das tensões.

Matematicamente, se todos os vetores do sistema forem divididos por um único valor, o sistema não se altera. Dividindo-se os vetores pelo valor de  $I$  (corrente), obtem-se:

$$X_C = \frac{V_C}{I} \quad V_R = \frac{R}{I}$$

Então podemos redesenhar o gráfico vetorial conforme mostra a figura a seguir

O gráfico mostra que a resistência ôhmica do resistor e a reatância capacitiva do capacitor estão defasadas  $90^\circ$ .



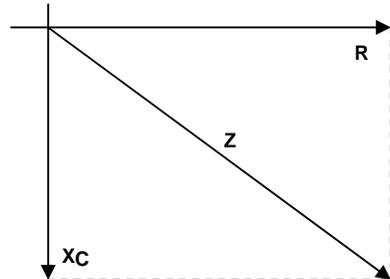
A impedância do circuito RC é a soma dos efeitos de  $X_C$  e  $R$ , ou seja, a soma entre os vetores  $X_C$  e  $R$ .

Graficamente, essa soma é resultante do sistema de vetores.

Matematicamente, o valor da resultante pode ser calculado pelo teorema de Pitágoras, uma vez que os vetores  $R$ ,  $X_C$  e  $Z$  formam um triângulo retângulo.

Isolando o valor de  $Z$ , obtem-se a equação para o cálculo da impedância do circuito RC série, ou seja,  $Z^2 = R^2 + X_C^2$ .

Onde  $Z$  é a impedância em ohms;



R é a resistência do resistor em ohms;

$X_C$  é a reatância capacitiva em ohms.

O ângulo de defasagem é a defasagem produzida pelo elemento reativo instalado ao circuito este ângulo é conhecido com  $\varphi$ .

$$\varphi^- = \arctg \frac{X_C}{R} \text{ portanto temos: } R = Z \cdot \cos \varphi^- \quad \text{ou} \quad X_C = Z \cdot \sin \varphi^-$$

O mesmo procedimento vetorial é usado para tensão no circuito RC série CA somando-se as tensões vetorialmente, ou seja,  $V_T = V_R + V_C$ .

Onde:

$V_T$  é a tensão aplicada ao circuito em V;

$V_R$  é a queda de tensão no resistor em V;

$V_C$  é a queda de tensão no capacitor em V;

A corrente em um circuito RC série conectado a uma rede de CA depende da tensão aplicada e da impedância que o circuito apresenta. Os valores V, I e Z se relacionam segundo a lei de Ohm:

$$V_T = I \times Z$$

Onde:

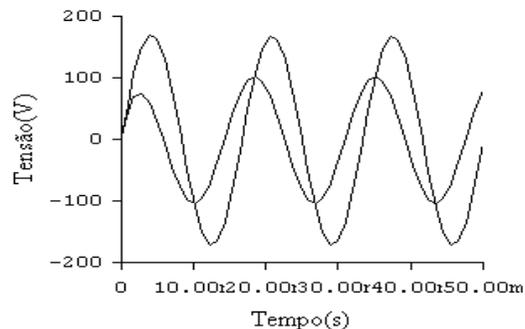
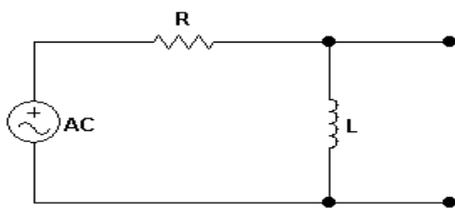
$V_T$  é a tensão eficaz aplicada em V;

I é a corrente eficaz em A;

Z é a impedância em ohms.

### Circuito RL série em corrente alternada

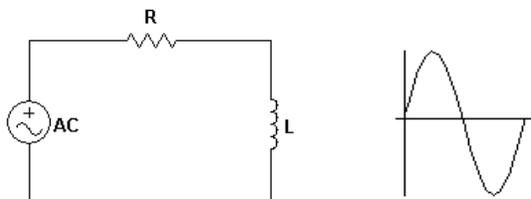
Os circuitos RL série em CA são utilizados como redes de defasamento quando se necessita obter uma defasagem entre a tensão de entrada e a tensão de saída.



Estas defasagens são muito importantes e utilizadas nos equipamentos industriais como, por exemplo, os controles de velocidade para motores.

Para melhor compreendermos o funcionamento do circuito RL série em CA, é necessário traçar os gráficos senoidais das tensões sobre seus componentes.

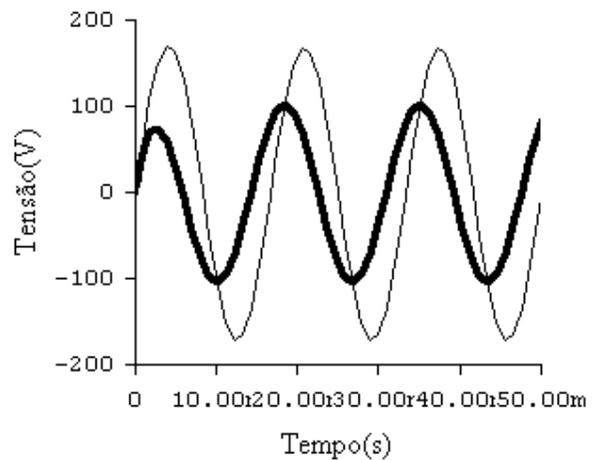
Quando um circuito série formado por um resistor e um indutor ligado a uma fonte CA senoidal, ocorre a circulação da corrente. A corrente circulante tem a forma senoidal e pode ser representada através de um gráfico.



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 em fase com a corrente.

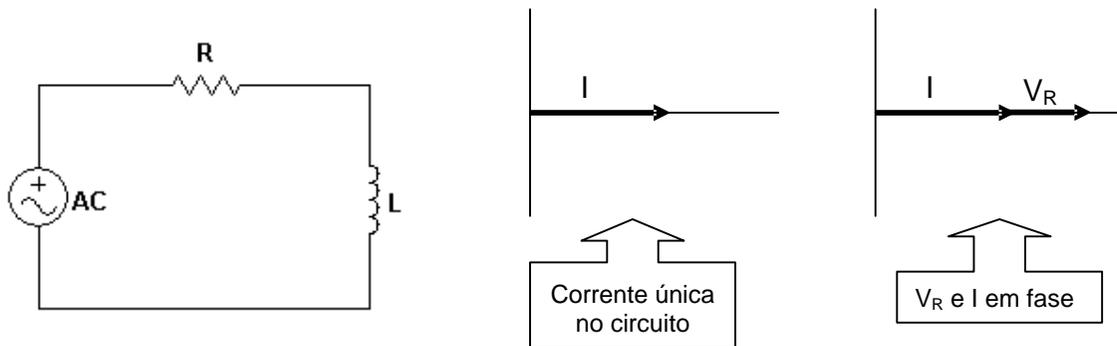
A tensão no indutor também tem a forma senoidal. Existe, porém um fator importante a considerar. A tensão sobre o indutor está sempre adiantada em relação a sua corrente. Por isso, a senóide que representa a tensão no indutor aparecerá deslocada ao se fazer a sobreposição dos gráficos. O gráfico completo representa o comportamento das tensões e correntes no circuito RL série.



Os gráficos senoidais não são apropriados para o desenvolvimento do cálculo dos parâmetros dos circuitos CA. Por isso, o estudo dos circuitos CA é geralmente feito através dos gráficos vetoriais.

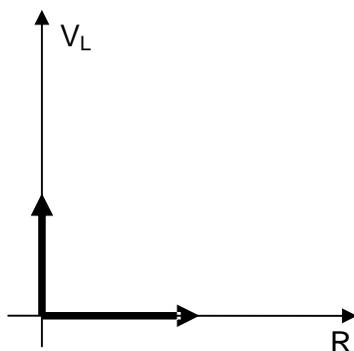
Para montar o gráfico vetorial do circuito RL série, toma-se como ponto de partida o vetor de corrente porque seu valor é único no circuito, Normalmente o vetor  $I$  é colocado sobre o eixo X no sistema referencial.

Partindo do princípio que a tensão sobre um resistor está sempre em fase com a corrente, pode-se representar o vetor  $V_R$  sobre o vetor  $I$ .



Como a tensão no indutor está adiantada  $90^\circ$  com relação à sua corrente. O seu o vetor forma um ângulo de  $90^\circ$  com o vetor da corrente. A partir desse gráfico, é possível determinar os parâmetros do circuito.

### Impedância no circuito RL série em CA

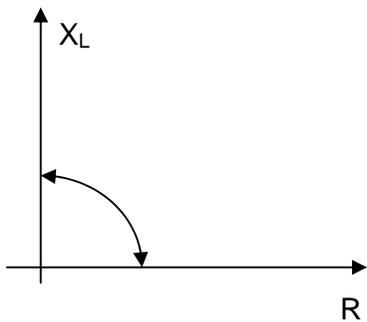


Como já visto anteriormente, a impedância de um circuito é a oposição que este circuito oferece à passagem de CA. Ela pode ser determinada a partir da análise do gráfico vetorial das tensões.

Matematicamente, se todos os vetores do sistema forem divididos por um único valor, o sistema não se altera. Dividindo-se os vetores pelo valor de  $I$  (corrente), tem-se:

$$V_L = \frac{X_L}{I} \quad V_R = \frac{R}{I}$$

Então podemos redesenhar o gráfico vetorial conforme mostra a figura a seguir



O gráfico mostra que a resistência ôhmica do resistor e a reatância indutiva do indutor estão defasadas  $90^\circ$ . A impedância do circuito RL é a soma dos efeitos de  $X_L$  e  $R$ , ou seja, a soma entre os vetores  $X_L$  e  $R$ . Graficamente, essa soma é resultante do sistema de vetores. Matematicamente, o valor da resultante pode ser calculado pelo teorema de Pitágoras, uma vez que os vetores  $R$ ,  $X_L$  e  $Z$  formam um triângulo retângulo. Isolando o valor de  $Z$ , temos a equação para o cálculo da impedância do circuito RL

série, ou seja,  $Z^2 = R^2 + X_L^2$ .

Onde  $Z$  é a impedância em ohms;

$R$  é a resistência do resistor em ohms;

$X_L$  é a reatância indutiva em ohms.

O mesmo procedimento vetorial é usado para tensão no circuito RL série CA somando-se as tensões vetorialmente, ou seja,  $V_T = V_R + V_L$ .

Onde:

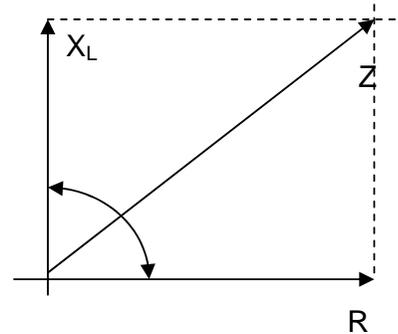
$V_T$  é a tensão aplicada ao circuito em V;

$V_R$  é a queda de tensão no resistor em V;

$V_L$  é a queda de tensão no indutor em V;

O ângulo de defasagem é a defasagem produzida pelo elemento reativo instalado ao circuito este ângulo é conhecido com  $\phi$ .

$$\phi^+ = \arctg \frac{X_L}{R} \text{ Portanto temos: } R = Z \cdot \cos \phi^+ \quad \text{ou} \quad X_L = Z \cdot \sin \phi^+$$



A corrente em um circuito RL série conectado a uma rede de CA depende da tensão aplicada e da impedância que o circuito apresenta. Os valores  $V$ ,  $I$  e  $Z$  se relacionam segundo a lei de Ohm:

$$V_T = I \times Z$$

Onde:

$V_T$  é a tensão eficaz aplicada em V;

$I$  é a corrente eficaz em A;

$Z$  é a impedância em ohms.

### Análise das Potências

Quando trabalhamos com circuitos em corrente alternada a potência dissipada pelo componente é determinada de três formas diferentes, pois não teremos mais a situação linear fornecida a circuitos puramente resistivos.

Como estamos estudando circuitos que provocam defasagem ou atraso na tensão ou na corrente temos que analisar a potência por um outro prisma, ou seja pela fórmula original.

$$P = V \cdot I \cdot \cos \phi$$

Quando usamos circuitos resistivos não temos nenhuma perda por defasagem, portanto o  $\cos \phi$  fica sendo o cosseno de  $0$ , e pela trigonometria temos que o cosseno de  $0$  é  $1$ , é devido a esse fato que em circuitos lineares a potência seja determinada pela equação abaixo:

$$P = V \cdot I$$

Em circuitos reativos dividimos o estudo das potências em três tipos: potência ativa ou potência real, potência reativa e potência aparente.

Como estudamos agora circuitos com comportamento vetorial temos que calcular as potências através de um triângulo de potências no qual temos potências ativa e reativas como uma decomposição vetorial da resultante potência aparente. Então agora vamos estudar cada potência individualmente

### Potência Ativa (P)

A potência Ativa P, em watt (W), é aquela correspondente ao produto da corrente com a parcela da tensão que está em fase com a mesma. A potência ativa é a potência que pagamos à concessionária de energia pois é a potência real consumida pelo circuito reativo.

Quando a fase  $\varphi$  for próxima de zero maior será a potência ativa, menor será a energia despendida sem finalidade de produzir trabalho.

Portanto para determinar a potência Ativa usamos a seguinte equação:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

### Potência Reativa (P<sub>R</sub>)

A potencia reativa (VA<sub>R</sub>) é a energia consumida por elementos indutivos ou capacitivos durante seu funcionamento. Ou seja, enquanto a corrente está sendo atrasada pelo indutor ou a mesma está sendo adiantada por um capacitor, nesse intervalo de tempo ocorre a potência reativa, que nada mais é que o produto negativo da corrente com a parcela da tensão que está em quadratura com ela portanto: podemos equacionada de seguinte forma:

$$P_R = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Então podemos concluir que a potência reativa é totalmente perdida e não realiza trabalho útil por devolver essa energia ao gerador.

### Potência Aparente (P<sub>AP</sub>)

A potência aparente (VA), e a potência total fornecida pelo gerador à impedância, isto é:

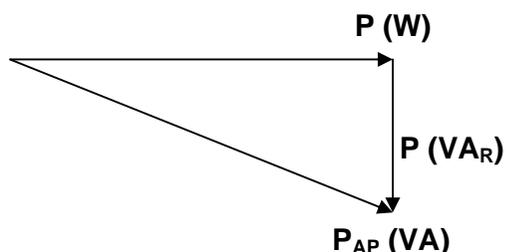
$$P_{AP} = U \cdot I$$

A potência aparente é o maior valor devido à soma dos vetores decompostos que são a potência ativa e a reativa. Ou seja, nem sempre a potência fornecida pelo gerador e totalmente consumida pelo circuito.

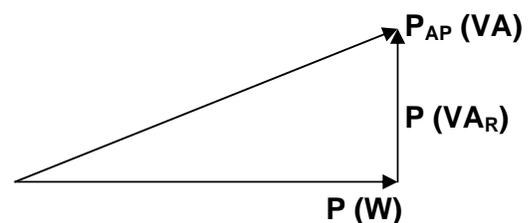
### Triângulo das Potências

Podemos representar as potências em uma impedância por um triângulo de potências.

Na impedância indutiva temos:



Na impedância capacitiva temos:



Deste triângulo, tiramos as seguintes relações entre as potências:

$$P_{AP} = \sqrt{P^2 + P_R^2} \quad \text{e} \quad \varphi = -\arctg \frac{P_R}{P} \quad \text{e ainda}$$

$$P = P_{AP} \cdot \cos \varphi \quad \text{e} \quad P = P_{AP} \cdot \sin \varphi$$

### Fator de Potência

A relação entre a potência ativa (consumida) e a potência aparente (fornecida pelo gerador) é denominada fator de potência FP, que é dado por:

$$FP = \frac{P}{P_{AP}} \quad \text{ou} \quad FP = \cos \varphi$$

O fator de potência é um valor positivo entre 0 e 1 que reflete o quanto da potência aparente fornecida pelo gerador é efetivamente consumida pelo circuito ou impedância.

### A legislação sobre o Fator de Potência

Em conformidade com o estabelecido pelo Decreto nº. 62.724 de 17 de maio de 1968. E com a nova redação dada pelo Decreto nº 75.887 de junho de 1975, as concessionárias de energia elétrica adotaram, desde então, o fator de potência de 0,85 como referências para limitar o fornecimento de energia reativa.

O Decreto nº 479, de 20 de março de 1992, reiterou a obrigatoriedade de se manter o fator de potência o mais próximo possível da unidade (1,00), tanto pelas concessionárias quanto pelos consumidores, recomendando, ainda, ao Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) o estabelecimento de um novo limite de referência para o fator de potência indutivo e capacitivo.

A nova legislação pertinente, estabelecida pelo DNAEE, introduz uma nova forma de abordagem do ajuste pelo baixo fator de potência, com os seguintes aspectos relevantes:

Aumento do limite mínimo do fator de potência de 0,85 para 0,92;

Faturamento de energia reativa capacitiva excedente;

Redução do período de avaliação do fator de potência de mensal para horário, a partir de 1996.

Com isso muda-se o objetivo do faturamento: em vez de ser cobrado um ajuste por baixo fator de potência, como faziam até então, as concessionárias passam a faturar a quantidade de energia ativa que poderia ser transportado no espaço ocupado por esse consumo de reativo. Este é o motivo porque as tarifas aplicadas serem as de demanda e consumo de ativos, inclusive ponta e fora de ponta para os consumidores enquadrados na tarifação horosazonal.

### Características um baixo Fator de Potência

Temos a seguir as características que proporcionam um baixo fator de potência a instalação elétrica:

**Perdas na Instalação** – Ocorrem em forma de calor e são proporcionais ao quadrado da corrente total. Como essa corrente cresce com o excesso de energia reativa, estabelece-se uma relação entre o incremento das perdas e o baixo fator de potência, provocando o aumento do aquecimento de condutores e equipamentos.

**Quedas de Tensão** – O aumento da corrente devido ao excesso de energia reativa leva a queda de tensão acentuada, podendo ocasionar a interrupção do fornecimento de energia elétrica e a sobrecarga em certos elementos da rede. Esse risco é acentuado durante os

períodos em que a rede é fortemente solicitada. As quedas de tensão podem provocar ainda, a diminuição da intensidade luminosa das lâmpadas e aumento da corrente nos motores.

**Sobrecarga da capacidade instalada** – A energia reativa, ao sobrecarregar uma instalação elétrica, inviabiliza sua plena utilização, condicionando a instalação de novas cargas e investimentos que seriam evitados se o fator de potência apresentasse valores bem mais altos. O "espaço" ocupado pela energia reativa poderia ser então utilizado para o atendimento de novas cargas.

Os investimentos em aplicação das instalações estão relacionados principalmente aos transformadores e condutores necessários. O transformador a ser instalado deve atender à potência total dos equipamentos utilizados, mas devido à presença de potência reativa, a sua capacidade deve ser calculada com base na potência aparente das instalações. A tabela abaixo mostra a potência total que deve ter o transformador, para atender uma carga útil de 1000 KW para fatores de potência crescentes.

| VARIAÇÃO DA POTÊNCIA DO TRAFÓ EM FUNÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA |                   |                   |
|--|-------------------|-------------------|
| Potência útil Absorvida KW                                   | Fator de Potência | Potência do Trafo |
|  | 0,50              | 2000              |
| 100  | 0,80              | 1250              |
|  | 1,00              | 1000              |

Também o custo dos sistemas de comando, proteção e controle dos equipamentos crescem com o aumento da energia reativa. Da mesma forma, para transportar a mesma potência ativa sem o aumento de perdas, a seção dos condutores deve aumentar à medida que o fator de potência diminui. A tabela abaixo ilustra a variação da seção de um condutor em função do fator de potência. (Nota-se que a seção necessária, supondo-se um fator de potência 0,70 é o dobro da seção para o fator de potência 1,00).

| VARIAÇÃO DA SEÇÃO DO CABO EM FUNÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA |                   |
|--|-------------------|
| Seção Relativa   | Fator de Potência |
| 1,00   | 1,00              |
| 1,23   | 0,90              |
| 1,56   | 0,80              |
| 2,04   | 0,70              |
| 2,78   | 0,60              |
| 4,00   | 0,50              |
| 6,25   | 0,40              |
| 11,10  | 0,30              |

A correção do fator de potência por si só já libera capacidade para instalação de novos equipamentos, sem a necessidade de investimentos em transformador ou substituição de condutores para esse fim específico.

### Principais Conseqüências

- Acréscimo na conta de energia elétrica por estar operando com baixo fator de potência;
- Limitação da capacidade dos transformadores de alimentação;
- Quedas e flutuações de tensão nos circuitos de distribuição;
- Sobrecarga nos equipamentos de manobra limitando sua vida útil;
- Aumento das perdas elétricas na linha de distribuição pelo efeito Joule;

- Necessidade de aumento do diâmetro dos condutores;
- Necessidade de aumento da capacidade dos equipamentos de manobra e proteção.

### Causas do fator de potência baixo

- Motores de indução trabalhando a vazio;
- Motores superdimensionados para sua necessidade de trabalho;
- Transformadores trabalhando a vazio ou com pouca carga;
- Reatores de baixo fator de potência no sistema de iluminação;
- Fornos de indução ou a arco;
- Máquinas de tratamento térmico;
- Máquinas de solda;
- Nível de tensão acima do valor nominal provocando um aumento de consumo de energia reativa.

### Correção do Fator de Potência

#### Cargas Resistivas e Reativas

Em nível industrial, as cargas reativas indutivas ( $\varphi > 0^\circ$ ) são em grande maioria, embora tenhamos também as resistivas ( $\varphi = 0^\circ$ ) e as cargas reativas capacitivas ( $\varphi < 0^\circ$ ).

As cargas resistivas não provocam defasagem entre tensão e corrente, recebendo do gerador apenas a potência ativa, que é dissipada totalmente. Essas cargas têm como fator de potência ou  $\cos 0^\circ = 1$ . Como exemplos de cargas com esse comportamento têm-se as lâmpadas, os aquecedores entre outros. Os equipamentos resistivos são especificados pela tensão de alimentação  $V_{RMS}$  e pela potência ativa (W).

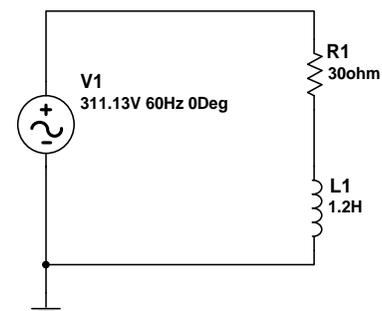
As cargas indutivas atrasam a corrente em relação à tensão, recebendo do gerador as potências ativa e reativa. Enquanto a potência ativa é totalmente dissipada a reativa é devolvida ao gerador. Essas cargas têm como característica o fator de potência sendo menor que 1, ou seja,  $\cos \varphi^+$ . Como exemplos de cargas indutivas têm-se as lâmpadas fluorescentes, os transformadores, os motores CA entre outros. Os equipamentos considerados indutivos são especificados pela tensão de alimentação  $V_{RMS}$ , pela potência ativa (W) ou aparente (VA) e pelo fator de potência.

As cargas capacitivas são aquelas que adiantam a corrente em relação à tensão, recebendo do gerador potências ativas e reativas. Essas cargas produzem um fator de potência negativo e menor que 1, ou seja,  $\cos \varphi^-$ . Esses tipos de cargas não são muito comuns. Uma das exceções é o motor síncrono que, por suas características, pode ter comportamento indutivo, resistivo ou capacitivo em função da corrente de campo (CC).

Para efeito de análise, consideraremos o caso mais geral que é o de uma instalação elétrica composta por cargas indutivas.

Exemplo: Um sistema de lâmpada fluorescente possui um reator com impedância de 1,2H e  $30\Omega$  de resistência em sua bobina qual será o Fator de Potência deste reator sabendo que a tensão de alimentação do sistema é de  $220\angle 0^\circ\text{V}$  e frequência de 60Hz. Conforme o esquema ao lado:

Começamos determinando o  $X_L$ , Z, Defasagem e Fator de potência.



Reatância Indutiva

$$X_L = 2\pi \cdot F \cdot L$$

$$X_L = 2\pi \cdot 60 \cdot 1.2$$

$$X_L = 452,4 \angle 90^\circ \Omega$$

Impedância

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

$$Z = \sqrt{30^2 + 452,4^2}$$

$$Z = 453,4 \angle 86,2^\circ \Omega$$

Fator de Potência

$$FP = \cos = \frac{R}{Z} \quad FP = \cos = \frac{30}{453,4}$$

$$FP = 0,06$$

Defasagem

$$\arccos = \varphi = \frac{R}{Z} \quad \arccos = \varphi = \frac{30}{453,4} \quad \varphi = 86,2^\circ$$

Cálculo das Tensões e Correntes

$$I = \frac{V}{Z} \quad I = \frac{220 \angle 0}{453,4 \angle 86,2^\circ} \quad I = 0,485 \angle -86,2^\circ$$

$$V_R = R \cdot I \quad V_R = 30 \angle 0 \cdot 0,485 \angle -86,2^\circ \quad V_R = 14,56 \angle -86,2^\circ V$$

$$V_{X_L} = X_L \cdot I \quad V_{X_L} = 452,4 \angle 90^\circ \cdot 0,485 \angle -86,2^\circ \quad V_{X_L} = 219,52 \angle 3,8^\circ V$$

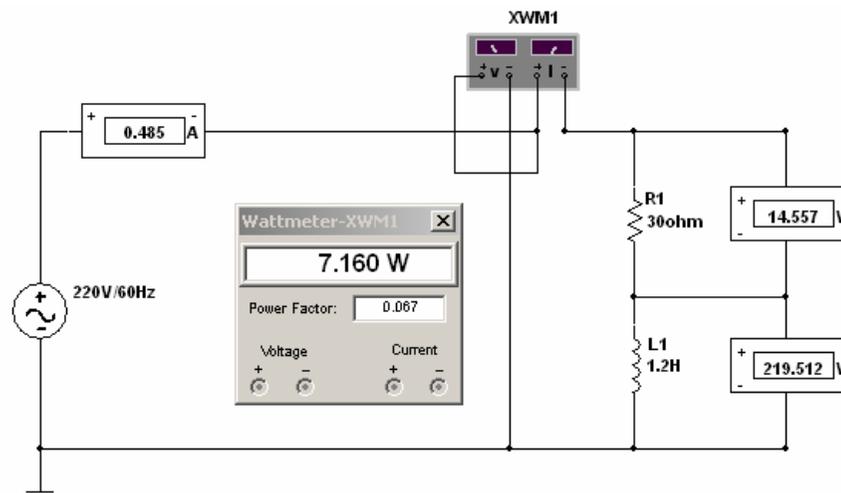
Cálculo das Potências

$$P_{AT} = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad P_{AT} = 220 \cdot 0,485 \cdot \cos 86,2^\circ \quad P_{AT} = 7,06 W$$

$$P_R = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad P_{AT} = 220 \cdot 0,485 \cdot \sin 86,2^\circ \quad P_{AT} = 106,51 VA_R$$

$$P_{AP} = U \cdot I \quad P_{AP} = 220 \cdot 0,485 \quad P_{AP} = 106,75 VA$$

Podemos comprovar os valores calculados através da simulação abaixo:



Agora podemos realizar a correção do Fator de Potência, que consiste em calcularmos um capacitor para compensar o atraso da corrente provocado pelo indutor do reator da lâmpada fluorescente. A correção do fator de potência deve ter seu valor -0,92 a 0,92.

Começamos a correção calculando a corrente para o fator de potência de 0,92 ou  $\cos 23^\circ$ . Usando a potência ativa do circuito proposto, pois é a potência real.

$$P_{AT} = U \cdot I_{COR} \cdot \cos \varphi \quad I_{COR} = \frac{7,06}{220 \cdot \cos 23^\circ} \quad I_{COR} = 34,9mA$$

Com a nova corrente corrigida determinamos a potência corrigida e a potência capacitiva

$$P_{CORRIGIDA} = U \cdot I_{COR} \cdot \sin \varphi \quad P_{RCAP} = P_{IND} - P_{COR}$$

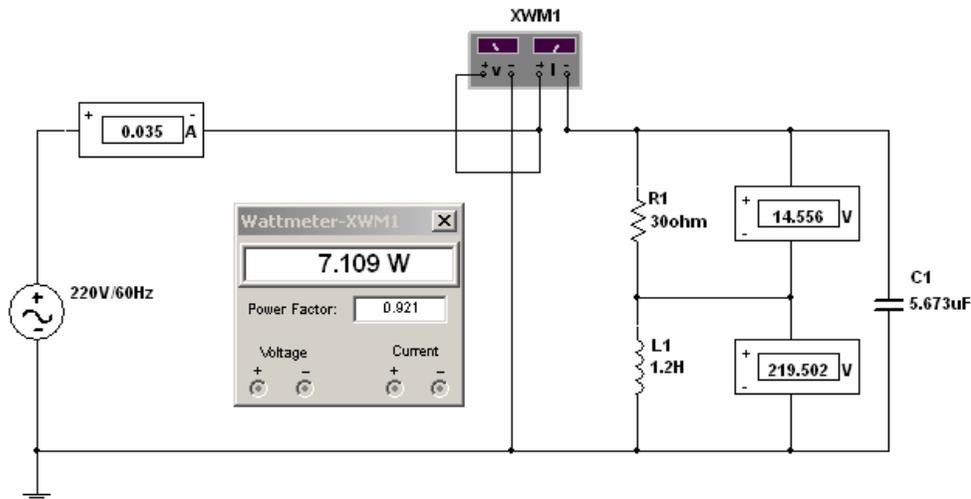
$$P_{CORRIGIDA} = 220 \cdot 0,0349 \cdot \sin 23 \quad P_{RCAP} = 106,5 - 3$$

$$P_{CORRIGIDA} = 3VA_R \quad P_{RCAP} = 103,5VA_R$$

Agora podemos terminar a correção calculando a reatância capacitiva e o capacitor que corrigirá o fator de potência em 0,92. Logo a seguir o circuito com os valores e o capacitor de correção.

$$P_{RCAP} = \frac{U^2}{XC} \quad XC = \frac{220^2}{103,5} \quad XC = 467,6 \angle -90^\circ \Omega$$

$$XC = \frac{1}{2\pi \cdot F \cdot C} \quad C = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 467,6} \quad C = 5,673 \mu F$$



Como vemos através da simulação que os valores de tensão e potência ativa são aproximadamente os mesmos, no entanto a corrente do circuito são apenas 7% do valor obtido sem a correção. Portanto acabamos de comprovar que esse cálculo é bastante importante, e que para indústria e comércio, que normalmente possuem uma carga indutiva muito grande, deveriam possuir um sistema para determinar o Fator de Potência.

#### Observação:

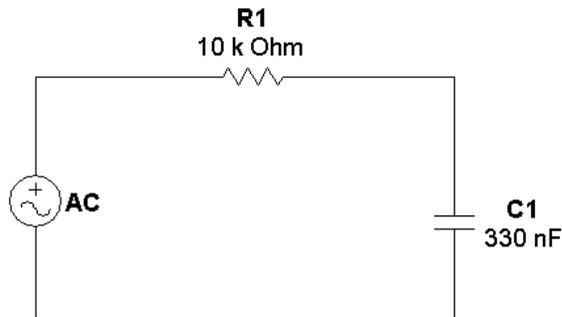
Se possuímos um osciloscópio, wattímetro ou multímetro é possível também determinar o fator de potência e chegar num circuito mais econômico e viável para as instalações elétricas em geral.

# EQUIPAMENTOS E MATERIAIS A SEREM UTILIZADOS

| Qtde. | Descrição            | Especificação        |
|-------|----------------------|----------------------|
| 1     | Fonte de Alimentação | FCC 3005 D           |
| 1     | Multímetro           | Analógico/Digital    |
| 1     | Resistor             | 10KΩ                 |
| 1     | Capacitor            | 330nF / 250V         |
| 1     | Reator               | Lâmpada Fluorescente |
| 1     | Lâmpada              | 220V/40W             |

# CIRCUITOS PROCEDIMENTOS MEDIDAS ANÁLISES

CPMA1 – Montar o circuito RC série



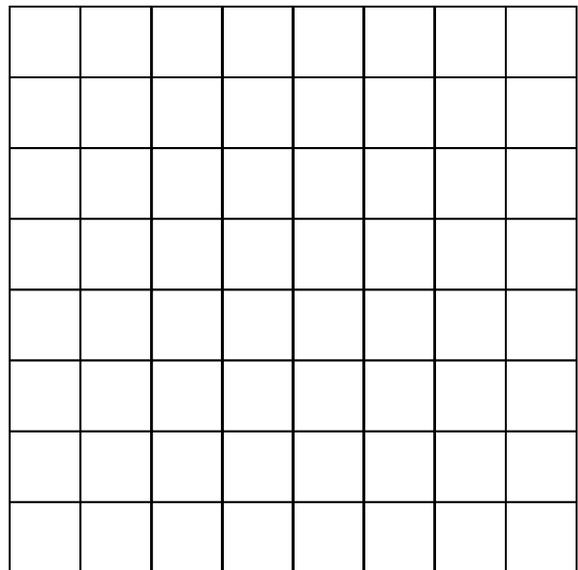
CPMA2 – Medir com o multímetro o que se pede na tabela abaixo:

|          |  |       |  |
|----------|--|-------|--|
| $V_{AC}$ |  | $V_R$ |  |
| $I_T$    |  | $V_C$ |  |

CPMA3 – Ligar no osciloscópio canal 1 a rede elétrica e o canal 2 ligado ao capacitor.

CPMA4 – Ajustar o osciloscópio para que os dois sinais sejam vistos de forma clara no instrumento. Medir e desenhar o sinal de tensão da rede e o sinal de tensão do capacitor e a defasagem entre eles.

|           |  |
|-----------|--|
| $V_{AC}$  |  |
| $V_C$     |  |
| $\varphi$ |  |



CPMA5 – Com os valores obtidos de tensão e corrente no item 2 calcular a impedância, o fator de potência e a defasagem do circuito utilizando as fórmulas abaixo e anotar os valores no quadro.

$$Z = \frac{V_{AC}}{I_T} \quad FP = \frac{V_{AC}}{V_R} \quad \arccos = \varphi = \frac{V_{AC}}{V_R}$$

|   |  |    |  |           |  |
|---|--|----|--|-----------|--|
| Z |  | FP |  | $\varphi$ |  |
|---|--|----|--|-----------|--|

CPMA6 – Calcular o valor da impedância do circuito utilizando processo matemático abaixo::

Calculando a Reatância Capacitiva

$$X_C = \frac{1}{2\pi \times F \times C} \quad \longrightarrow \quad X_C = \text{_____} \quad \longrightarrow \quad X_C = \text{_____}$$

Calculando a Impedância do Circuito

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \quad \longrightarrow \quad Z_s = \sqrt{\text{_____}} \quad \longrightarrow \quad Z_s = \text{_____}$$

Calculando o Fator de Potência e a Defasagem

$$FP = \frac{R}{Z} \quad \longrightarrow \quad FP = \text{_____} \quad \longrightarrow \quad FP = \text{_____} \quad \arccos FP = \text{_____}$$

CPMA7 – Comparando a impedância calculada com os valores práticos de cada circuito podemos observar que os resultados obtidos foram \_\_\_\_\_. Completar a frase com a alternativa correta:

- Aproximadamente idênticos  
 Bastante desiguais

CPMA8 – Realizar a soma vetorial dos valores de tensão medidas no item 2, utilizando o modelo abaixo:

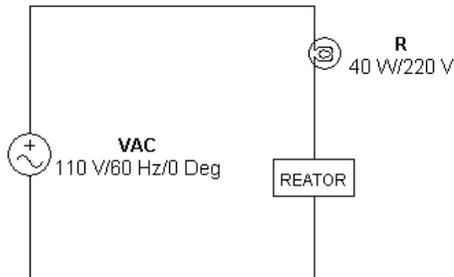
$$V_T = \sqrt{V_R^2 + V_C^2} \quad \longrightarrow \quad V_T = \sqrt{\text{_____}} \quad \longrightarrow \quad V_T = \text{_____}$$

CPMA9 – Comparando os valores calculados da tensão do circuito com o valor de tensão medida na rede elétrica pelo circuito RC podemos observar que os valores são \_\_\_\_\_. Completar a frase com a alternativa correta:

- Aproximadamente idênticos       Bastante desiguais

### Parte demonstrativa

CPMA10 Professor monta o circuito proposto abaixo com o amperímetro e o wattímetro conectado ao circuito



CPMA11 Medir a tensão de cada elemento do circuito com o multímetro, medir a defasagem com o osciloscópio e anotar a corrente e a potência ativa do circuito na tabela a seguir.

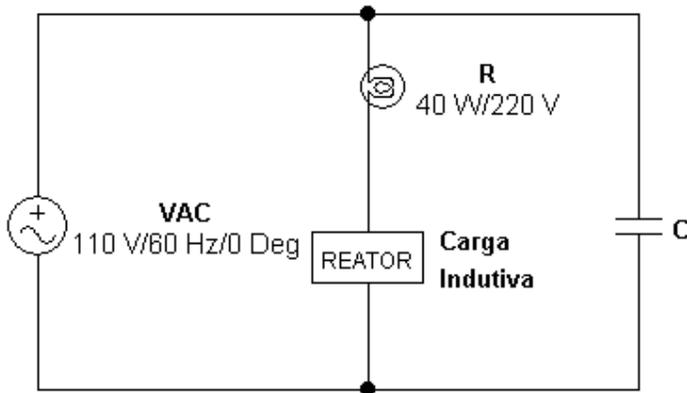
| Tensão Lâmpada | Tensão Reator | Corrente Total | Defasagem | Potência Ativa |
|----------------|---------------|----------------|-----------|----------------|
|                |               |                |           |                |

CPMA12 Calcular a defasagem do circuito usando a potência ativa e a tensão da rede para determinar o fator de potência do circuito. Calcular também o fator de potência do valor medido pelo osciloscópio e responda a alternativa a seguir:

CPMA13 Determinar o capacitor para corrigir o fator de potência para 0,95 calculando todos os itens solicitados a seguir. Ao final anote todos os valores na tabela abaixo:

| $I_{CORRIGIDA}$ | $P_{RCORR}$ | $P_{RCAP}$ | Reatância Capacitiva | Capacitor |
|-----------------|-------------|------------|----------------------|-----------|
|                 |             |            |                      |           |

CPMA14 Montar o circuito proposto com o capacitor de correção



CPMA15 Medir os valores solicitados abaixo e anotá-los na tabela a seguir:

| Tensão Lâmpada | Tensão Reator | Corrente Total | Defasagem | Potência Ativa |
|----------------|---------------|----------------|-----------|----------------|
|                |               |                |           |                |

CPMA16 Comparando os valores obtidos antes e depois da correção podemos afirmar que a mesma se faz necessário sempre que tivermos cargas indutivas instaladas. Assinale a alternativa correta

SIM                       NÃO

CPMA17 Num circuito puramente resistivo o fator de potência é. Assinale a alternativa correta.

0                       1