

Potência em corrente alternada senoidal

1) Introdução

A apostila teórica desta experiência é muito boa. Sugiro que leiam-na com cuidado.

Em DC, tensão, corrente, resistência e potência são números reais.

Em AC, tensão, corrente e impedância são números complexos (tensão e corrente são fasores e impedância é complexa). E a potência?

Fisicamente, potência é um número real. Porém, usando números complexos para representar potência de um circuito AC (figura 1), fica mais fácil resolver os problemas. A potência aparente complexa pode ser calculada:

$$P_{ap} = \hat{V} \hat{I}^* \quad (\text{unidade do módulo em VA}).$$

onde \hat{I}^* é o conjugado complexo do fasor da corrente. A potência complexa não é fasor, isto é, não representa amplitude e fase de uma senoide.

O ângulo da potência aparente complexa é o mesmo da impedância complexa.

Parte real da potência aparente complexa é a potência ativa (em W). É quem realmente realiza o trabalho.

Parte imaginária da potência aparente complexa é a potência reativa (em VAR). Não realiza trabalho.

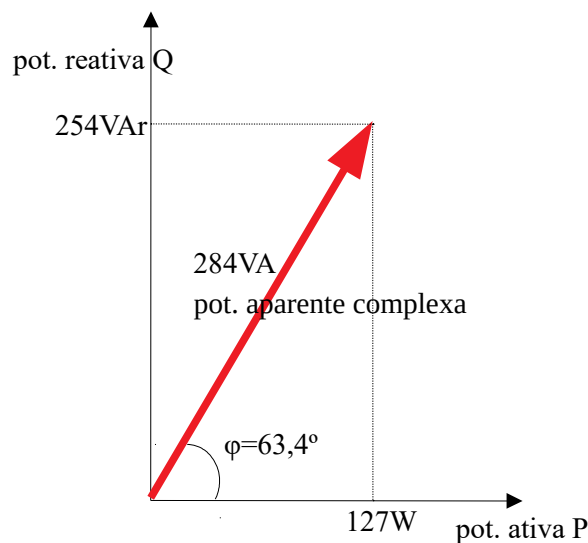


Figura 1

2) Carga resistiva

Vamos colocar um resistor de 127Ω na rede elétrica de $127V$ e $60Hz$ (figura 2a). Vai passar por ele uma corrente de $1A$ e o resistor vai consumir $127W$. O resistor esquenta, indicando que há consumo de potência.

Na figura 3, tensão (vermelho) e corrente (verde) estão em fase (ambos sobem e descem ao mesmo tempo). Multiplicando os gráficos da tensão da corrente, obtemos a potência instantânea (ciano). A frequência da potência instantânea é $120Hz$. A potência instantânea é sempre não-negativa. A média da potência instantânea é $127W$.

Usando fasores e números complexos:

$$\hat{V} = 127 \angle 0^\circ \text{ V}, \quad Z_R = 127 \angle 0^\circ \Omega, \quad \hat{I} = 1 \angle 0^\circ \text{ A}, \quad P_{ap} = \hat{V} \hat{I}^* = 127 \angle 0^\circ$$

$$P = V_{ef} I_{ef} \cos\varphi = V_{ef} I_{ef} \times 1 = 127W.$$

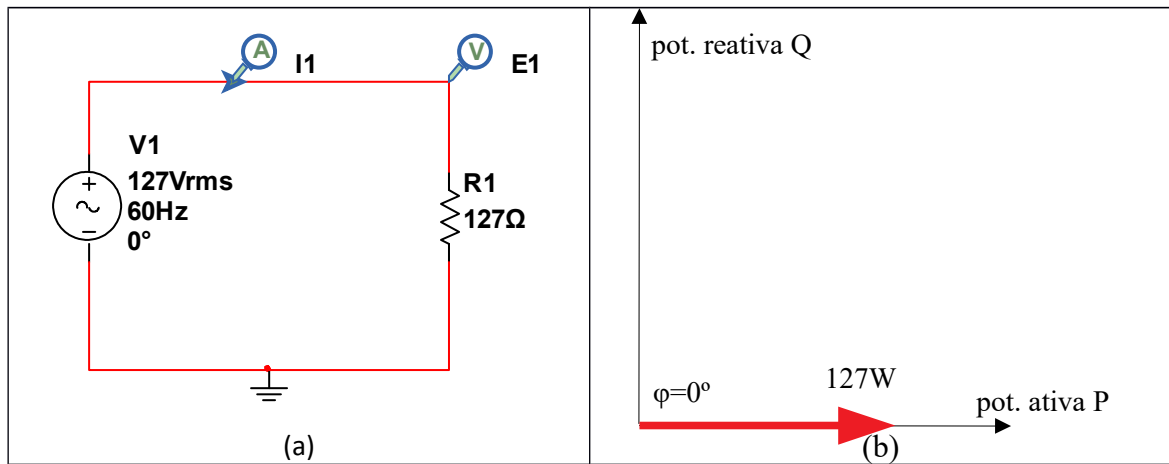


Figura 2

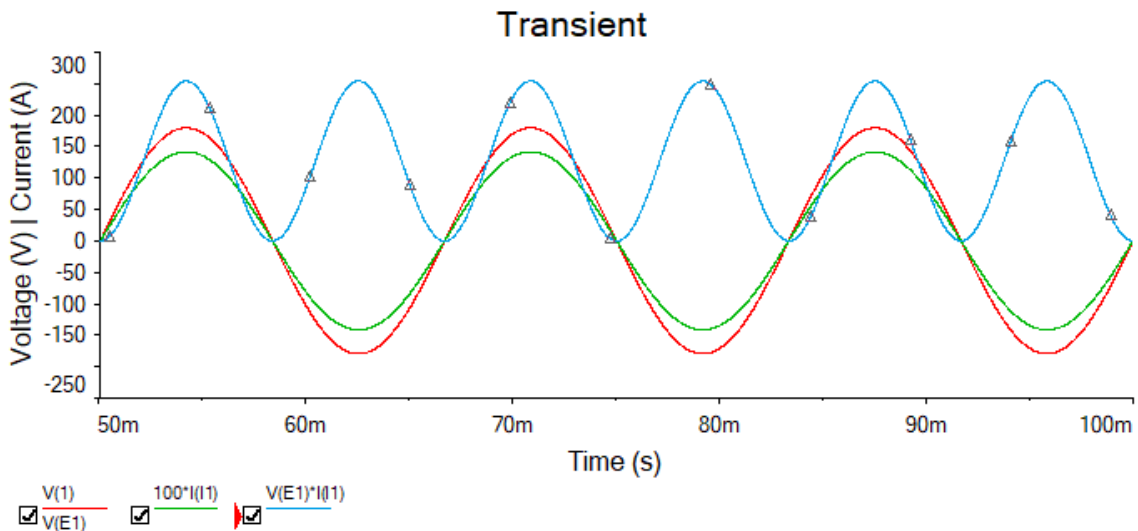


Figura 3

3) Carga puramente capacitiva

Vamos colocar um capacitor de 20,9 μ F (no lugar do resistor) na rede elétrica de 127V e 60Hz (figura 4). Se fizer isso (capacitor deve ter tensão isolamento maior que 127x1,42), o capacitor vai continuar frio, indicando que não há consumo de potência. O amperímetro vai medir 1A e voltímetro vai medir 127V, resultando numa potência aparente de 127VA (tudo igual ao caso anterior com resistor). Porém, não há consumo de potência.

Na figura 5, tensão (vermelho) está atrasada 90° em relação à corrente (verde). A potência instantânea (ciano) oscila em torno de zero. A média da potência instantânea é zero, indicando potência ativa zero. Corrente passa pelo circuito mas o bipolo não recebe potência.

Potência ativa é 0W, potência reativa é 127VAr e potência aparente é 127VA.

$$\hat{V} = 127 \angle 0^\circ \text{ V}, Z_c = 1/(j\omega C) = 127 \angle -90^\circ \Omega, \hat{I} = 1 \angle 90^\circ \text{ A},$$

$$P_{ap} = \hat{V} \hat{I}^* = 127 \angle -90^\circ \text{ W}, P = V_{ef} I_{ef} \cos\varphi = V_{ef} I_{ef} \cos(-90^\circ) = 0$$

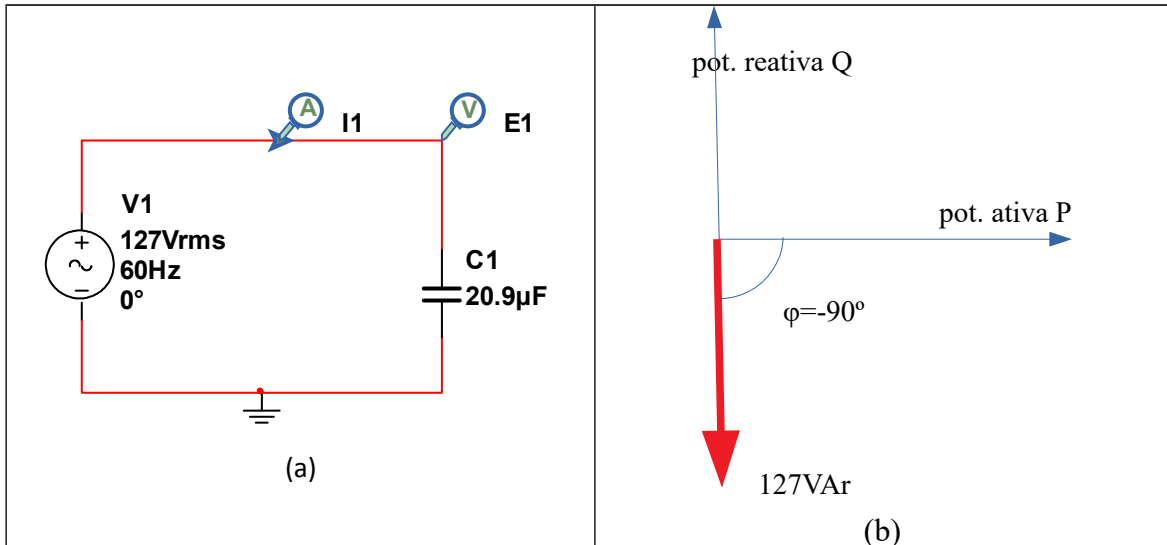


Figura 4

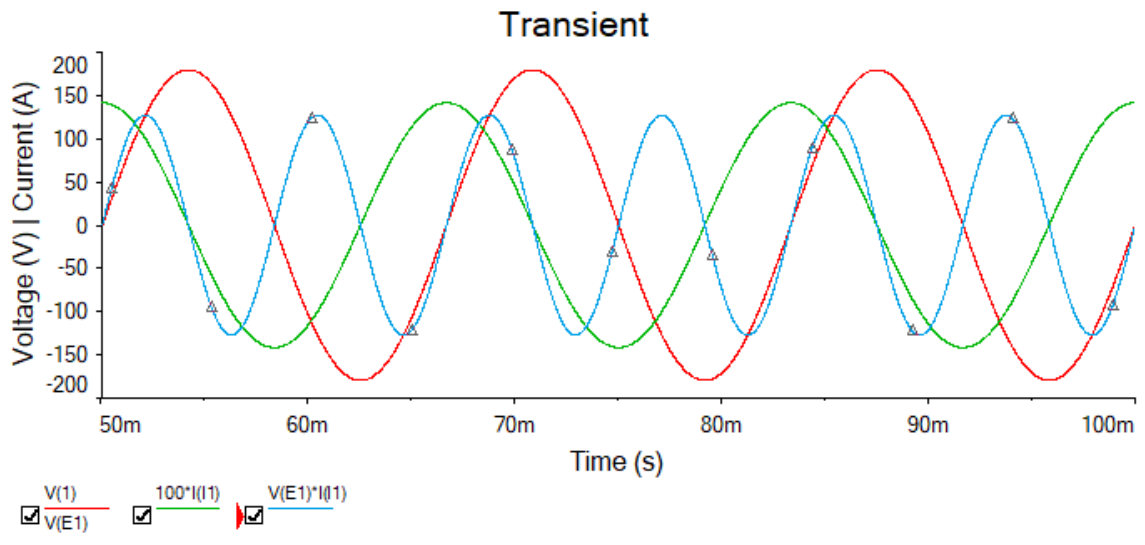


Figure 5

4) Carga indutiva

Vamos substituir resistor/capacitor por uma bobina cuja impedância complexa tem componentes indutivo e resistivo ($Z = 56,9 \angle 63,4^\circ = 25,5 + 50,9j$ ou resistor de $25,5\Omega$ em série com indutor de 135mH). Indutor puro não consome potência, mas o resistor consome. Portanto, a bobina consome potência.

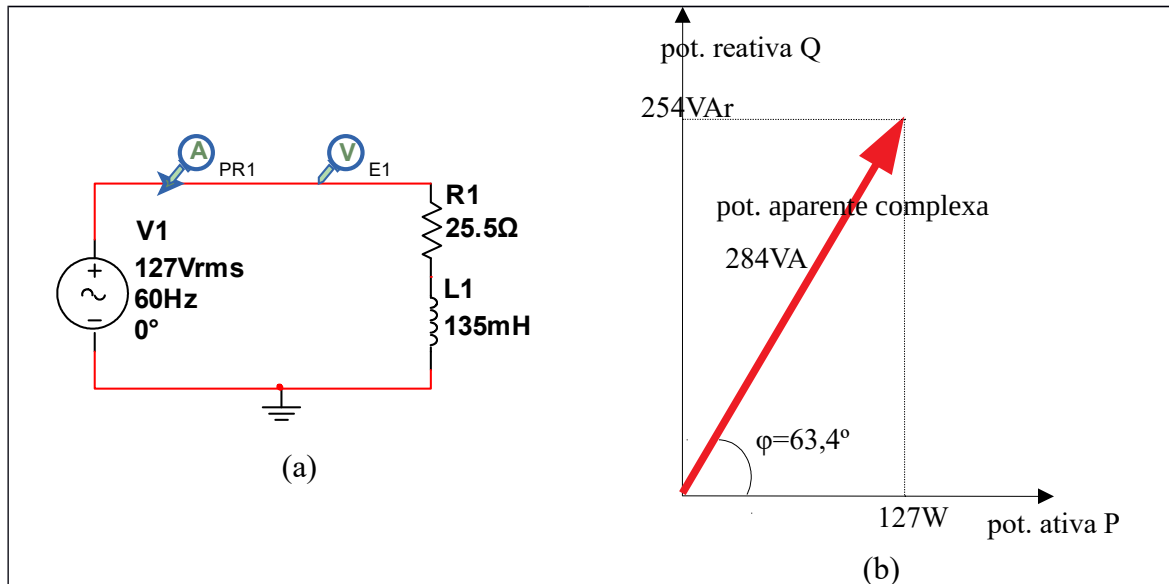


Figura 6

Calculando potência aparente complexa, obtemos $284 \angle 63,4^\circ$. A potência aparente pode ser decomposta na parte real (ativa) e imaginária (reativa) - figura 6b.

$$\text{Potência ativa: } P = |P_{ap}| \cos \phi = V_{ef} I_{ef} \cos \phi = 127 \text{ W}$$

$$\text{Potência reativa: } Q = |P_{ap}| \sin \phi = V_{ef} I_{ef} \sin \phi = 254 \text{ VAr}$$

A potência ativa é igual ao resistor. Porém, passa pelo circuito corrente de $2,236\text{A}$, bem maior do que 1A do caso resistivo.

Figura 7 mostra que tensão (vermelho) está adiantada 63° em relação à corrente (verde). A potência (ciano) oscila em torno de 127.

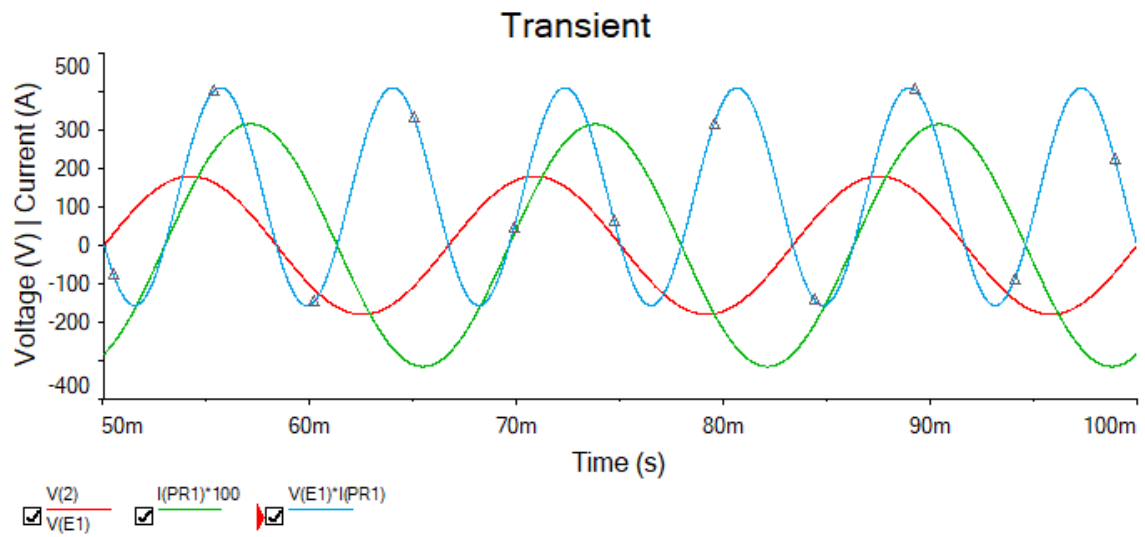


Figura 7

5) Correção de fp por capacitor

A definição do fator de potência é $fp = \frac{P}{|P_{ap}|}$.

No caso senoidal, também vale a equação $fp = \cos \varphi$.

No caso de resistor, $fp=1$. No caso de capacitor ou indutor ideal, $fp=0$.

No exemplo da bobina acima:

$$fp = 127/284 = 0,447 \text{ ou}$$

$$fp = \cos 63,4^\circ = 0,447 = 44,7\%.$$

fp baixo aumenta as perdas nos fios elétricos e nos transformadores, pois circula corrente desnecessariamente alta pelos fios e transformadores.

Se a carga é indutiva, costuma-se colocar capacitor em paralelo para aumentar fp. No exemplo da bobina acima, para atingir $fp=1$, precisaria colocar um capacitor com potência reativa de -254 VAr para anular a potência reativa de $+254 \text{ VAr}$ da bobina. Calculando o valor do capacitor necessário (figura 7) obtemos $C=41,7\mu\text{F}$.

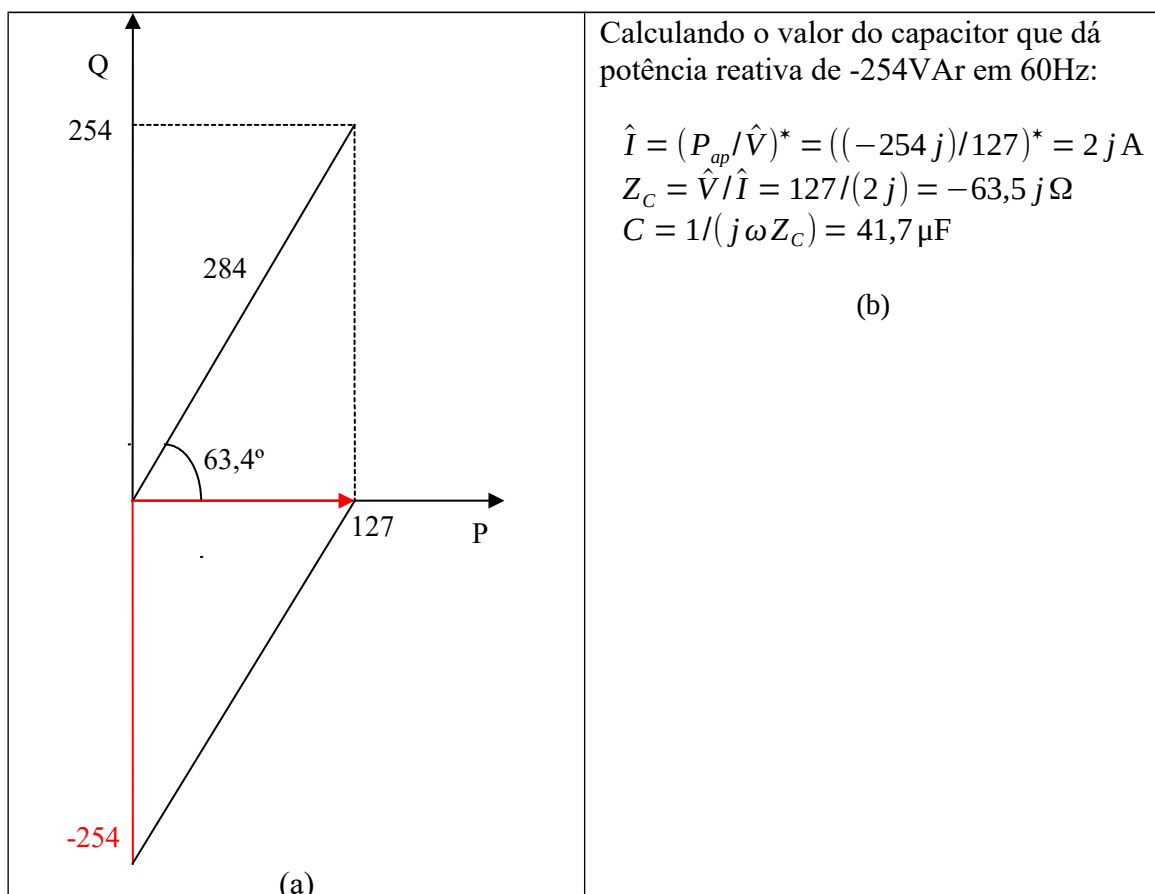


Figura 8

Figura 10 mostra o circuito com correção de fp. Tensão (vermelho) e corrente (verde) estão em fase. Potência (ciano) assume somente valores positivos e oscila em torno de 127. O gráfico ficou igualzinho ao caso do resistor (figura 1).

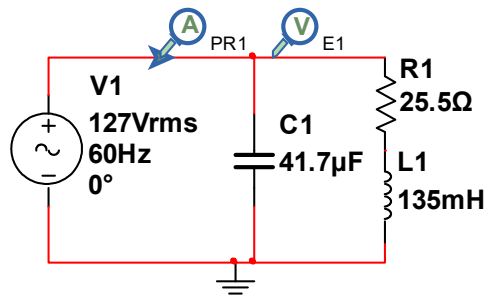


Figura 9

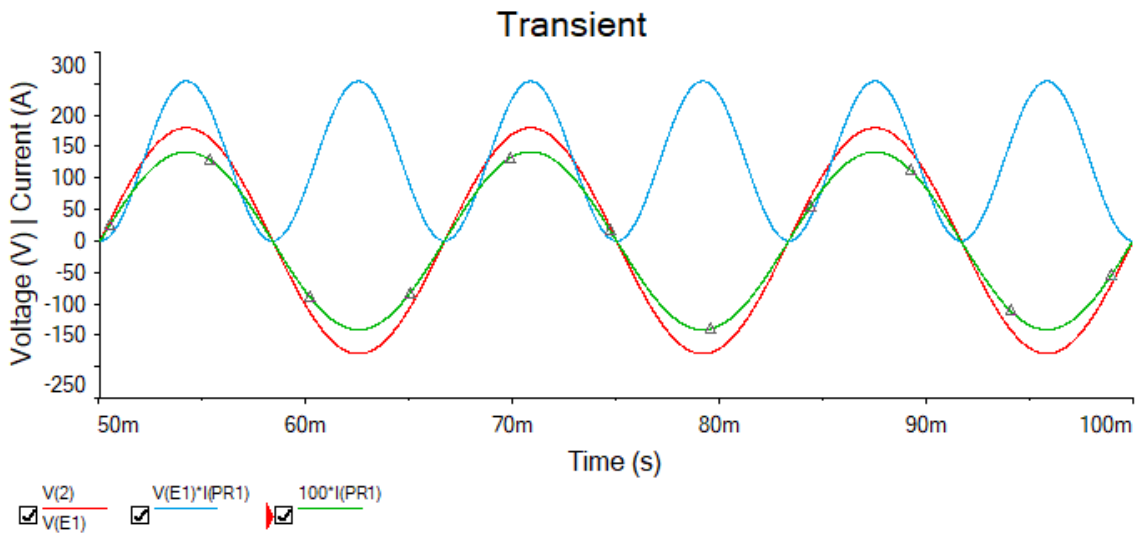


Figura 10

6) Carga resistiva deste ano

Os circuitos que vocês vão simular este ano são um pouco diferentes daqueles que mostrei acima.

A rede elétrica monofásica consiste de fios fase e neutro (mais opcionalmente um fio terra). Note que neutro é diferente da terra. Como sabemos, o osciloscópio só mede as tensões em relação à terra. Portanto, não há como osciloscópio medir diretamente as tensões de pontos elétricos ligados diretamente à rede elétrica. Assim, para poder fazer o experimento, vamos colocar um transformador de isolamento 1:1 e ligar a terra no secundário do transformador. Assim, será possível usar osciloscópio para medir as tensões de pontos ligados ao secundário do transformador (figura 11).

Observe as ligações V e I do wattímetro. V precisa medir a tensão em cima do bipolo. I precisa medir a corrente que passa pelo bipolo.

Observe o "current clamp", usado para transformar a corrente que passa pelo bipolo em tensão de entrada do osciloscópio.

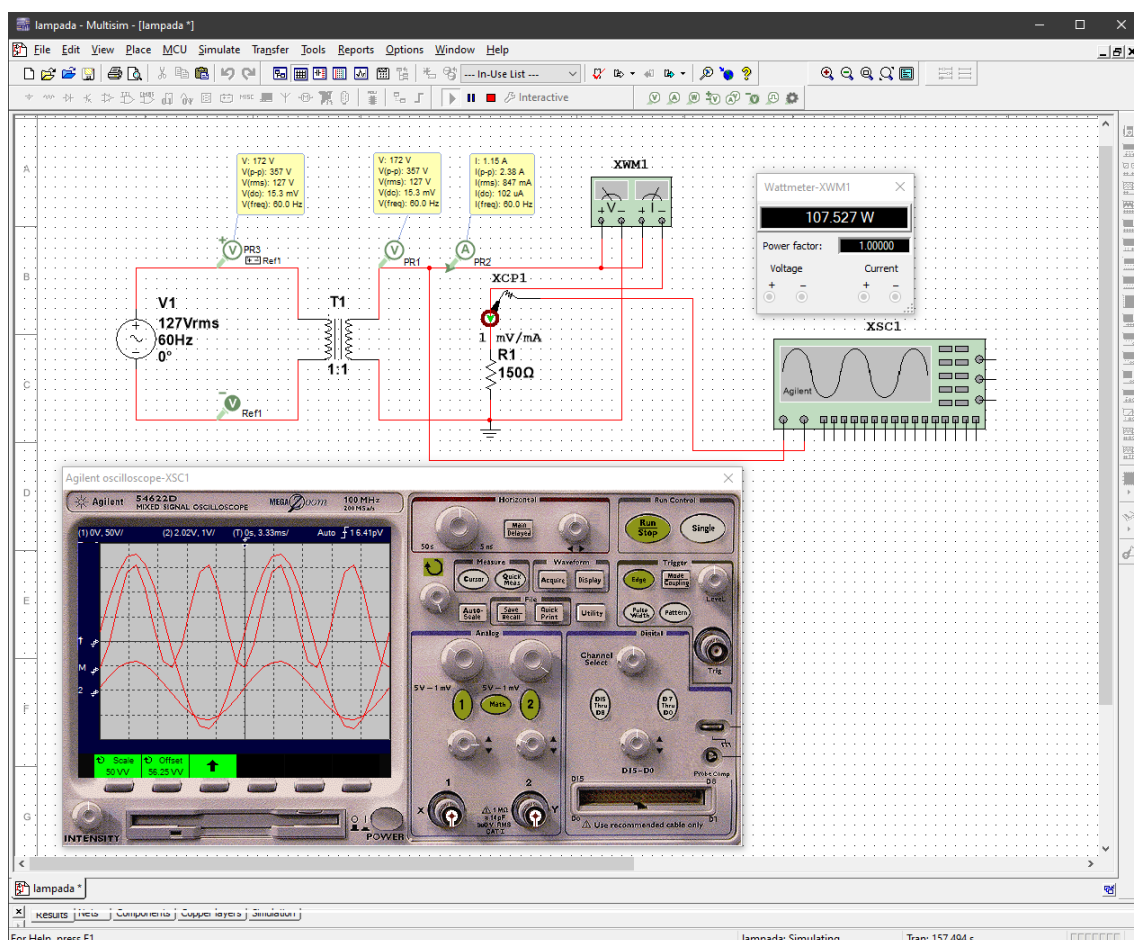


Figura 11: Carga resistiva. 107W, 847mA.

7) Carga capacitiva deste ano

Colocando carga puramente capacitiva, a potência torna-se nula (-201nW indica potência nula), apesar de passar corrente de 243mA pelo capacitor.

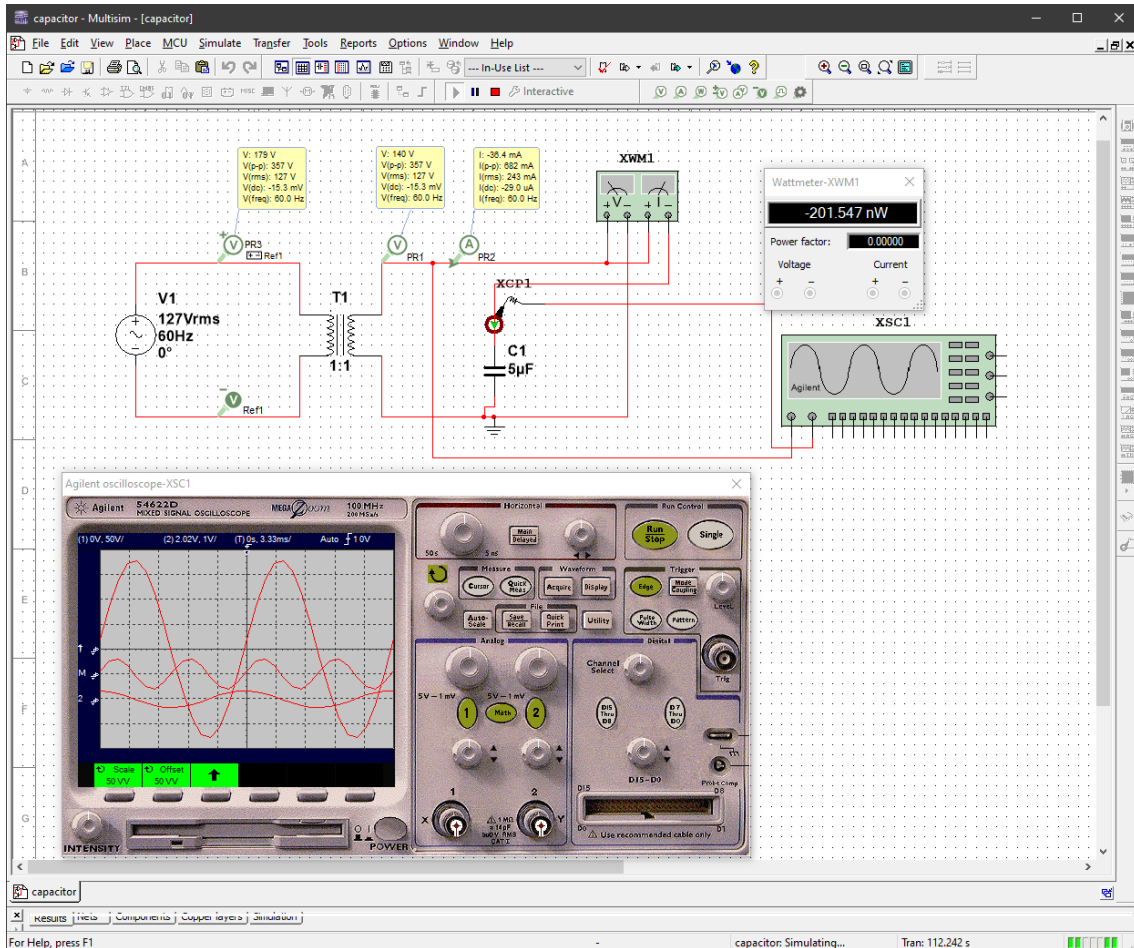


Figura 12: Carga capacitiva. 0W, 243mA.

8) Carga indutiva+resistiva deste ano

Colocando carga indutiva+resistiva *em série*, temos 117W de potência mas 1,29A de corrente. Note que, se a carga fosse puramente resistiva, passando 1,29A de corrente deveríamos ter $127 \times 1,29 = 163,8\text{W}$ de potência. Porém, estamos obtendo somente 117W de potência por que a carga não é resistiva. $\text{fp} = 117/163,8 = 0,714$.

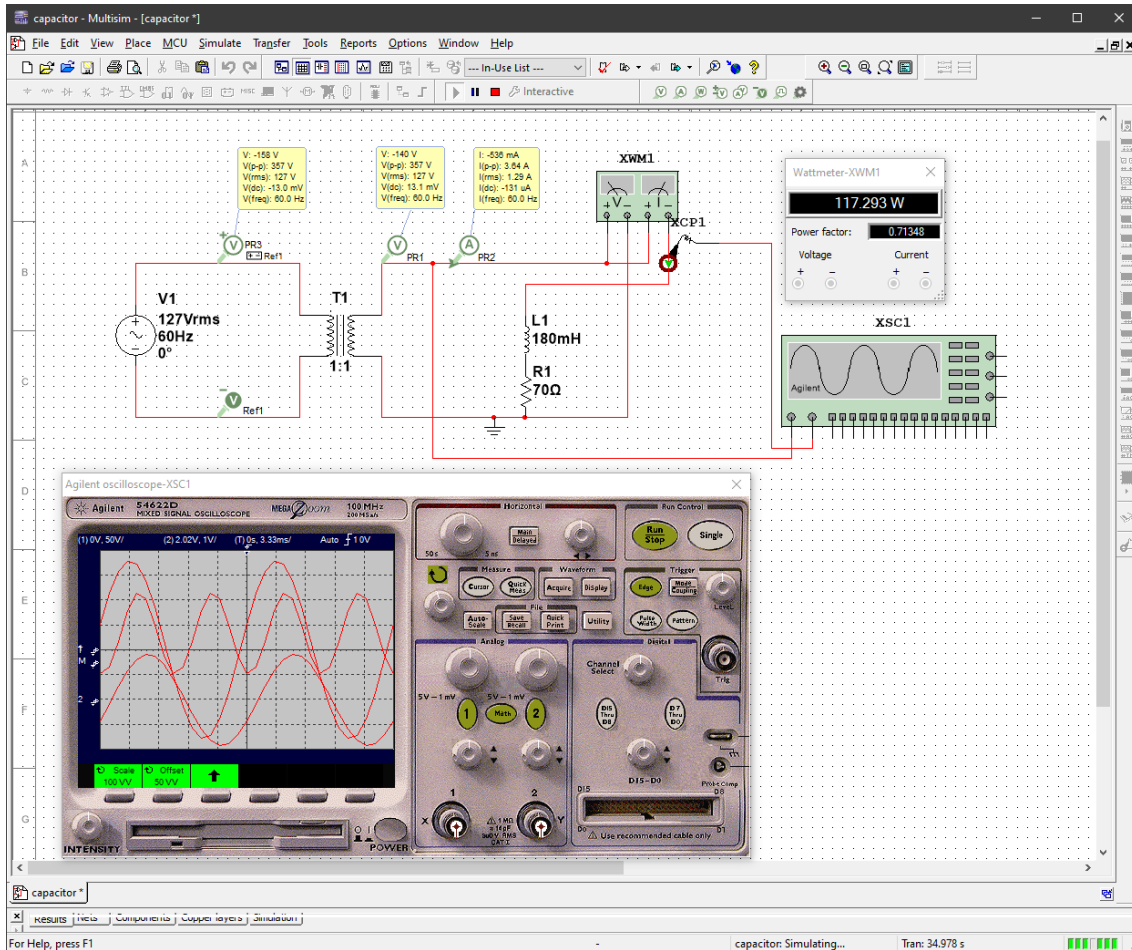


Figura 13: Carga indutiva+resistiva. Consome 117W mas com 1,29A de corrente. Fator de potência = 0,714.

9) Carga indutiva+resistiva com capacitor deste ano

Colocando um capacitor em paralelo com a carga no exemplo acima, a corrente diminuiu de 1,29A para 1,14A. Porém, a potência ativa se manteve intacta em 117W. Com isso, fator de potência aumentou para $fp = 117/(127 \times 1,14) = 0,808$.

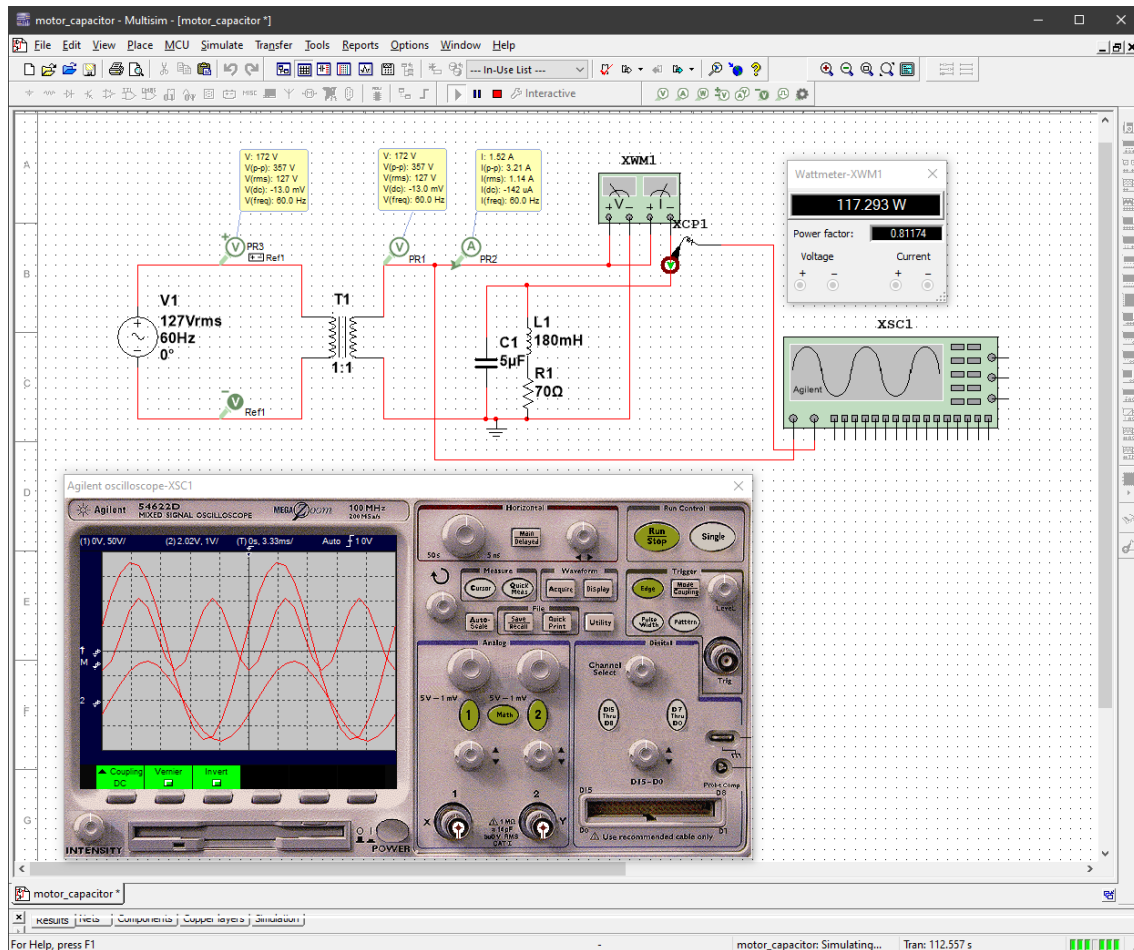


Figura 14: Carga indutiva+resistiva em paralelo com capacitor. 117W, 1,14A.

10) Carga indutiva+resistiva com correção de fp por capacitor deste ano

Qual é o valor do capacitor que faz a corrente se tornar mínima? Ou seja, qual é o valor do capacitor que faz fp se tornar um?

11) Notas e cuidados quando forem fazer experiência física no ano que vem:

a) Transformador e sensor Hall permitem medir tensão e corrente, isolado da rede. Isto é necessário pois o osciloscópio só mede tensão em relação à terra.

b) Um capacitor pode ter carga, mesmo que esteja desconectado de qualquer circuito. Assim, se você colocar os dedos nos dois terminais de um capacitor grande (capacitância grande e tensão de isolamento grande) pode levar choque, mesmo que o capacitor não esteja ligado a nada. Além disso, se você ligar capacitor com carga num circuito delicado, pode queimá-lo. Assim, é importante descarregar capacitores grandes antes e depois de usá-lo. Dá para fazer isto curto-circuitando os terminais e/ou descarregando a carga do capacitor através de um resistor. O capacitor do laboratório está dentro de uma caixa - isto não elimina o perigo.

c) Na hora de desligar wattímetro, não o coloque na escala de Ω com o aparelho ligado a um circuito energizado. Pode queimá-lo. O wattímetro do laboratório possui uma proteção que não permite colocá-lo na escala de Ω , mas serve como um aviso para situações imprevistas que você pode encontrar no futuro.

d) Coloque a bobina de 10 voltas numa posição fixa. Se a bobina ficar se mexendo, a leitura da potência pode ficar variando.