

# PEA3504 Laboratório de Qualidade de Energia

## Retificadores Monofásicos com Filtros C e LC – Simulações utilizando o Programa PSIM

**Prof. Lourenço Matakas Jr**

Versão 15/Ago/2018 (editado pelo prof. Wilson Komatsu)

### 1. Objetivos

- Reforçar os conceitos relativos aos retificadores monofásicos com filtros C e LC;
- Verificar o efeito do indutor no desempenho do filtro LC;
- Aprender a obter o espectro de formas de onda, fator de potência, fator de defasagem e fator de deformação a partir do software PSIM;
- Aprender a melhorar o fator de potência de uma carga através da compensação do fator de defasagem;
- Solução de problemas envolvendo circuitos lineares com excitação não senoidal periódica, a partir do emprego da série de Fourier e do teorema da superposição.

=====PARTE-I (com relatório correspondente à 2ª aula) =====

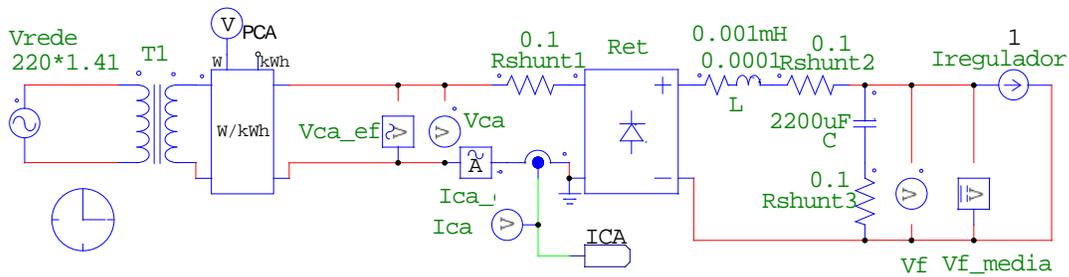
### 2. Verificando o efeito do Indutor no desempenho do retificador com Filtro LC

O filtro LC com  $L = 0H$ , corresponde a um filtro C. Ao se incrementar o valor de L, verifica-se que o pico da corrente  $i(t)$  no lado CA se reduz ao mesmo tempo que a largura do pulso de corrente aumenta, elevando-se o valor do fator de potência. Do lado CC, se  $L = 0H$ , a tensão no capacitor de filtro apresenta valor médio  $V_{f1}$  dado pela eq. (1), que é próximo ao valor de pico da rede CA. Aumentando-se o valor de L, a tensão média decresce até o patamar definido por  $V_{f2}$  da eq. (2), que é próximo do valor médio da tensão de rede CA retificada. Este patamar ocorre a partir do ponto onde a corrente no indutor de filtro não sofre descontinuidade. Este comportamento será detalhadamente analisado nos próximos subitens.

$$V_{f1} \cong V_{CA\_pico} - 2V_{diodo} - (\text{quedas resistivas}) \quad (1)$$

$$V_{f2} \cong 0.9V_{CA\_ef} - 2V_{diodo} - (\text{quedas resistivas}) \quad (2)$$

O circuito da figura 1 está disponível no arquivo **exp2\_3.psimsch**. Os valores dos parâmetros da figura 1 correspondem aos de um equipamento existente, o kit experimental do Laboratório de Eletrônica de Potência (abrir o bloco do Trafo T1 para visualizar seus parâmetros).



**Figura 1:** Retificador com Filtro LC, diagrama a ser simulado.

Para valores elevados de L, o tempo necessário para se atingir o regime permanente torna-se bastante elevado. **O aluno deve verificar se todas as variáveis atingiram o regime permanente antes de efetuar medidas.** Sugere-se que o “Simulation Control” seja ajustado inicialmente como indicado na figura 2.



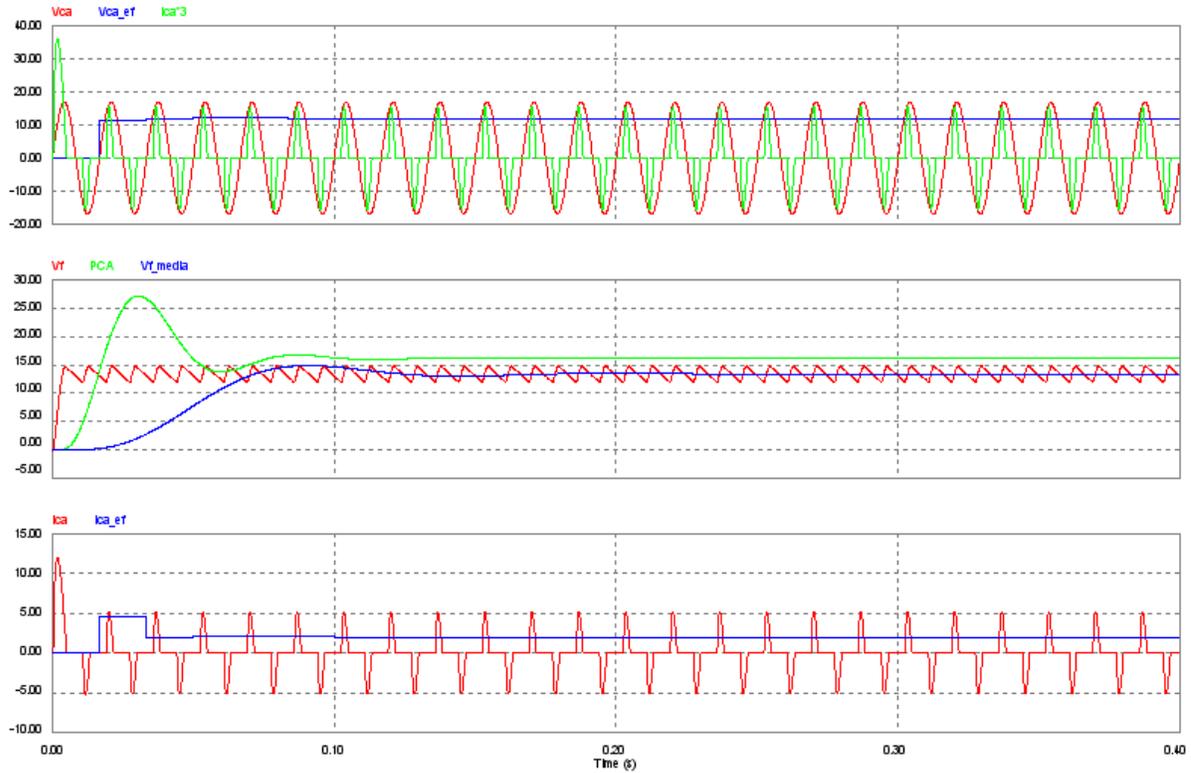
**Figura 2:** Sugestão de ajuste inicial do menu “Simulation Control”.

**2.1** Levantamento de formas de onda e medidas relevantes para o retificador com filtro LC. Simular o circuito da figura 1 variando o valor de L e sua resistência interna conforme indicado na tabela I.

**Tabela I** valores da do indutância e da resistência interna do indutor de filtro

| Caso   | L(mH) | R(Ohms) |
|--|-------|---------|
| A(filtro capacitivo)                               | 0.001 | 0.0001  |
| B  | 2     | 0.23    |
| C  | 6     | 0.23    |
| D limite da descontinuidade da corrente no indutor | 10    | 0.23    |
| E Indutor com valor elevado                        | 25    | 0.23    |

Sugere-se que para cada valor de L, as formas de onda sejam agrupadas em três gráficos em uma única página, conforme mostrado no exemplo da figura 3. O primeiro com Vca, Vca\_ef e Ica\*3; o segundo com Vf, Vf\_media e PCA, e o terceiro com Ica e Ica\_ef.



**Figura 3:** Sugestão para facilitar a visualização das diversas variáveis.

*\*\*Antes de simular um novo caso, obtenha os valores solicitados na tabela II, a partir do SIMVIEW, utilizando-se os cursores.*

*\*\* Aplicar o comando “View” → “Re-draw” após cada simulação para acertar as escalas automaticamente*

*\*\* Ao rodar um novo caso, não é necessário fechar o SIMVIEW. Isso permite que os gráficos sejam redesenhados automaticamente. O único problema é que serão utilizadas as escalas do caso anterior, tornando-se necessário aplicar o comando “View” → “Re-draw” para redefinir as escalas automaticamente.*

**Tabela II** valores significativos obtidos das simulações para a condição de REGIME PERMANENTE

| caso | L(mH) | Pca (W) | Ica_ef (A) | Ica_pico (A) | Vca_ef (V) | FP <sup>*1</sup> | Vf_media (V) | $\Delta V_f$ <sup>*2</sup> (V) |
|------|-------|---------|------------|--------------|------------|------------------|--------------|--------------------------------|
| A    | 0.001 |         |            |              |            |                  |              |                                |
| B    | 2     |         |            |              |            |                  |              |                                |
| C    | 6     |         |            |              |            |                  |              |                                |
| D    | 10    |         |            |              |            |                  |              |                                |
| E    | 25    |         |            |              |            |                  |              |                                |

<sup>\*1</sup> FP= fator de potência calculado por  $FP = P_{ca} / (V_{ca\_ef} \cdot I_{ca\_ef})$

<sup>\*2</sup>  $\Delta V_f$  = ondulação pico a pico da tensão  $V_f$

- 2.2 Verificação da corrente de *inrush* do retificador.
- 2.2.1 Repita os cinco casos acima, visualizando os primeiros ciclos apenas para a corrente de entrada ( $I_{ca}$ ). Plotar estes casos.
- 2.2.2 Obtenha os cinco valores de pico inicial da corrente  $i_{ca}(t)$  na rede (corrente de *inrush*). Para o relatório, sugere-se colocar os valores em uma tabela.
- 2.2.3 Que problemas podem ocorrer para valores elevados de corrente de *inrush*?
- 2.2.4 O que acontece com este valor, ao variarmos L?
- 2.2.5 Que providências podem ser tomadas em equipamentos comerciais para se reduzir o seu valor? (Sugestão: pesquise usando *inrush* como palavra-chave, mas use os resultados obtidos com bom senso e de modo breve)
- 2.3 Verificação da ondulação na corrente do indutor e dos regimes de continuidade e descontinuidade de corrente.
- 2.3.1 Inclua um medidor de corrente média no indutor de filtro. Repetir os cinco casos da tabela I, plotando a corrente no indutor L e sua **corrente média em regime**, acrescentando-se à tabela III. Sugere-se mostrar pelo menos uma amostra de 60ms.
- 2.3.2 Explique o comportamento da corrente do indutor.
- 2.3.3 O que se entende por regime de corrente descontínua no indutor?
- 2.3.4 Obtenha também os valores médio e pico a pico da corrente no indutor, acrescentando-se à tabela III, e comentando seus comportamentos. **Se você estiver utilizando o programa “demo”, será impedido de medir a oitava variável (com um probe de corrente ou setando o flag de corrente do indutor com (“Current Flag”=1). Para isso sugere-se retirar um dos instrumentos (o medidor Vf medio, por exemplo)**
- 2.3.5 Preencha a quinta coluna da tabela III com o valor de ondulação de corrente calculado pela eq.3, que já foi deduzida no curso de Eletrônica de Potência II (Apostila Fontes Lineares, versão 1.2.5, equação 3.9). **Lembrar que esta fórmula só vale quando a corrente no indutor não sofrer descontinuidade.** Comentar a diferença entre valores simulados e calculados.

$$\Delta I \approx \frac{0.42V_{CA\_pico}}{\omega L} \quad (3)$$

**Tabela III** valores médio e de pico a pico da corrente no indutor.

| caso | L (mH) | $I_{Lmédio}$ (A) | Ondulação pico a pico de $I_L$ (A) -simulado | Ondulação pico a pico de $I_L$ (A) calculada |
|------|--------|------------------|--|--|
| A    | 0.001  |                  |  |  |
| B    | 2      |                  |  |  |
| C    | 6      |                  |  |  |
| D    | 10     |                  |  |  |
| E    | 25     |                  |  |  |

=====FINAL DA PARTE-I (com relatório correspondente à 2ª aula) =====

=====PARTE-II (com relatório correspondente à 3ª aula) =====

**3. Obtenção do espectro e cálculo de valores eficazes a partir dos harmônicos**

**3.1** Obtenha o espectro da corrente da rede  $i_{ca}(t)$  para os cinco casos. Para tanto se sugere que todos os cinco casos sejam rodados, exibindo-se apenas  $i_{ca}$ . O espectro é obtido seguindo-se os passos a seguir:

- utilizando-se o botão **X** do SIMVIEW, ajustando a escala de tempo para que se visualize apenas um período da frequência da rede, **após o término do transitório**. Outra opção seria o pré-ajuste de “Print time” e de “Total time” no menu “Simulation control” de modo a coletar os dados de **apenas um ciclo em regime permanente**.
- Pressionando-se o botão **FFT** do SIMVIEW cria-se o gráfico de barras com o espectro da forma de onda exibida.
- utilizando-se o botão **X** do SIMVIEW, pode-se retocar a escala de frequência, para que se visualize bem os harmônicos relevantes. Neste caso obtém-se bons resultados com  $0 < f < 1000\text{Hz}$ .

**3.2** Comentar o comportamento dos espectros obtidos.

**3.3** Preencha a tabela IV, com os valores eficazes dos harmônicos, para o caso A. Lembre-se que o programa fornece os valores de pico, que devem ser divididos por  $\sqrt{2}$ . A seguir, utilizando a eq. (4), calcular o valor eficaz de  $i_{CA}(t)$  e compará-lo com  $I_{CA\_ef}$  obtido na tabela II. Comentar os resultados obtidos.

$$I_{CA\_ef} = \sum_{h=0}^{\infty} I_{h\_ef}^2 \tag{4}$$

**Tabela IV** valores dos harmônicos de corrente e cálculo do valor eficaz a partir deles

| $I_{1\_ef}$ | $I_{3\_ef}$ | $I_{5\_ef}$ | $I_{7\_ef}$ | $I_{9\_ef}$ | $I_{11\_ef}$ | $I_{13\_ef}$ | $I_{15\_ef}$ | $I_{CA\_ef}$<br>calculado | $I_{CA\_ef}$<br>tabela II |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------|---------------------------|
|             |             |             |             |             |              |              |              |                           |                           |

**4. Medida dos fatores de deformação e de defasagem**

Sabe-se que, para um sistema com tensão senoidal e corrente deformada, o fator de potência é dado pelas equações (5) e (6), onde  $\theta_1$  é a defasagem entre a tensão e o componente fundamental da corrente.

$$FP = \frac{P_{CA}}{S} = \frac{P_{CA}}{V_{ca\_ef} I_{CA\_ef}} = \frac{V_{ca\_ef} I_{1\_ef} \cos(\theta_1)}{V_{ca\_ef} I_{CA\_ef}} = \frac{I_{1\_ef}}{I_{CA\_ef}} \cos(\theta_1) \tag{6}$$

$$FP == (\text{Fator Distorção}) \times (\text{Fator de Defasagem}) \tag{5}$$

As equações (5) e (6) mostram que o fator de potência pode se tornar baixo com o aumento da defasagem  $\theta_1$ , ou pelo aumento do conteúdo harmônico da corrente. Assim, corrigir o

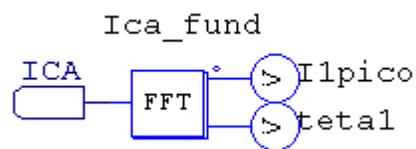
fator de potência significa minimizar a defasagem  $\theta_1$ , e minimizar o fator de distorção. Pela eq. (4) nota-se que correntes com baixo conteúdo harmônico apresentam  $I_{CA\_ef} \cong I_{1\_ef}$ , o que implica em maiores valores para o fator de distorção e conseqüentemente maior fator de potência.

4.1 Calcular e mostrar na tabela V os valores dos fatores de defasagem e distorção para cada caso da tabela 1.

**Tabela V** valores dos fatores de defasagem e distorção

| caso | $I_{1\_ef}$<br>(A) | $\theta_1$ **<br>(grau) | $I_{ca\_ef}$<br>(A)<br>tab. II | $\cos(\theta_1)$ | $\frac{I_{1\_ef}}{I_{CA\_ef}}$ | FP<br>eq.4 | FP <sup>*3</sup><br>tab. .II |
|------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------------|------------------------------|
| A    |                    |                         |                                |                  |                                |            |                              |
| B    |                    |                         |                                |                  |                                |            |                              |
| C    |                    |                         |                                |                  |                                |            |                              |
| D    |                    |                         |                                |                  |                                |            |                              |
| E    |                    |                         |                                |                  |                                |            |                              |

\*\* O valor de  $I_{1\_ef}$  pode ser obtido através do SIMVIEW, conforme feito no item 3.1, utilizando-se o botão FFT. O SIMVIEW, no entanto, não fornece a fase dos componentes harmônicos. Para tanto pode-se utilizar o bloco “FFT” do PSIM que se encontra no menu “Elements” → “Control” → “Other Funtion Blocks” → “FFT”. Este bloco, mostrado na figura 4 fornece a amplitude e a fase do componente fundamental do sinal aplicado a sua entrada. Para a obtenção de  $I_{1\_ef}$  e  $\theta_1$  da tabela V deve-se conectar o circuito da figura 4 ao ponto “ICA” da figura 1. Deve-se lembrar de excluir alguns instrumentos caso esteja utilizando a versão “demo”. Deve-se ajustar o bloco “FFT” para “No of Samples”=128 e “Fundamental Freq”=60.



**Figura 4:** Utilização do bloco FFT do PSIM.

4.2 Comentar o comportamento dos fatores de defasagem e distorção com a variação de L.

## **5. Verificando a possibilidade de se elevar o FP pela compensação do fator de defasagem**

Para os casos B, C, D e E acima simulados o fator de defasagem tem característica indutiva, ou seja, o componente fundamental da corrente está atrasado em relação à tensão de rede. Este componente pode ser compensado através da inserção de um capacitor em paralelo com a entrada CA do retificador. Tendo este fato em mente, perguntam-se:

- 5.1** Qual o máximo valor de FP que pode ser obtido para os casos B, C, D e E, através de compensação capacitiva? Justifique.
- 5.2** Qual é o maior fator de potência que se consegue empregando-se compensação capacitiva para o caso A? Justifique.
- 5.3** Para o caso C, calcular o capacitor que torna  $\theta_1 = 0$ .
- 5.4** Simular o caso C com o capacitor conectado em paralelo com a entrada da ponte retificadora, verificando se o novo fator de potência corresponde ao calculado no ítem anterior.
- 5.5** Qual é o maior fator de potência que se consegue empregando-se compensação capacitiva? Justifique.

(Dica desta parte 5: se um circuito é linear, o teorema da superposição pode ser aplicado.)

**====FINAL DA PARTE-II (com relatório correspondente à 3ª aula)====**