

# PEA2503 Laboratório de Qualidade de Energia

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

Prof. Lourenço Matakas Jr    Versão 29/07/2005, 19/8/15

### 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 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)=====

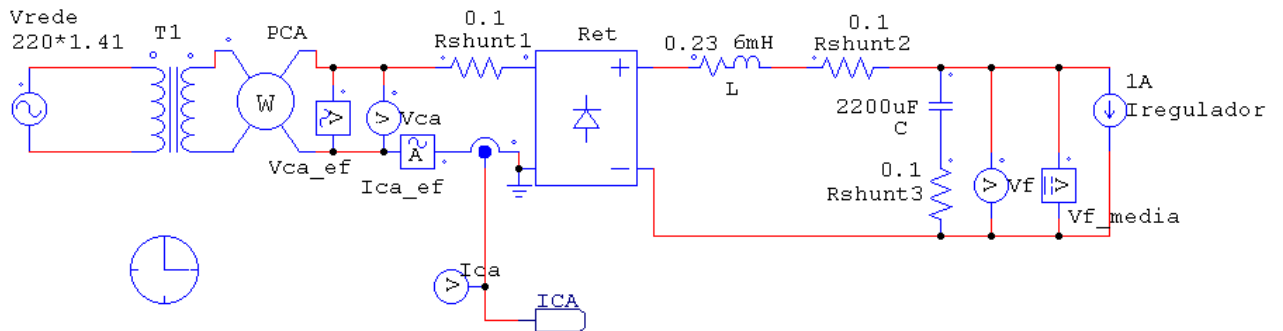
### 2. Verificando o efeito do Indutor no desempenho do retificador com Filtro LC

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  $L = 0$ , a tensão no capacitor de filtro apresenta valor médio  $V_{f1}$  dado pela equação 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  $V_{f2}$ , 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.

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

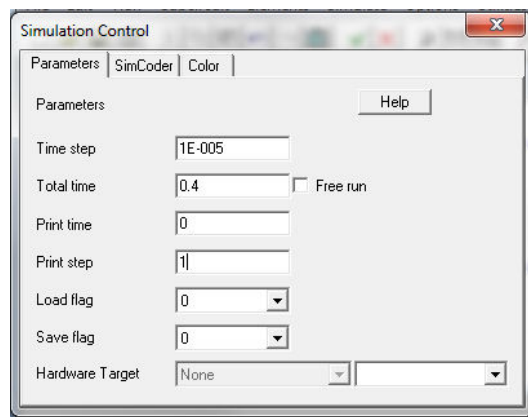
$$V_{f2} \cong 0.9V_{CA\_ef} - 2V_{diodo} - (\text{quedas resistivas}) \quad (2)$$

O circuito da figura 1 está disponível no arquivo **exp2\_3.sch**. Os valores dos parâmetros da figura 1 correspondem aos do kit experimental do Laboratório de Eletrônica de Potência (abrir o bloco do trafo para obter 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.



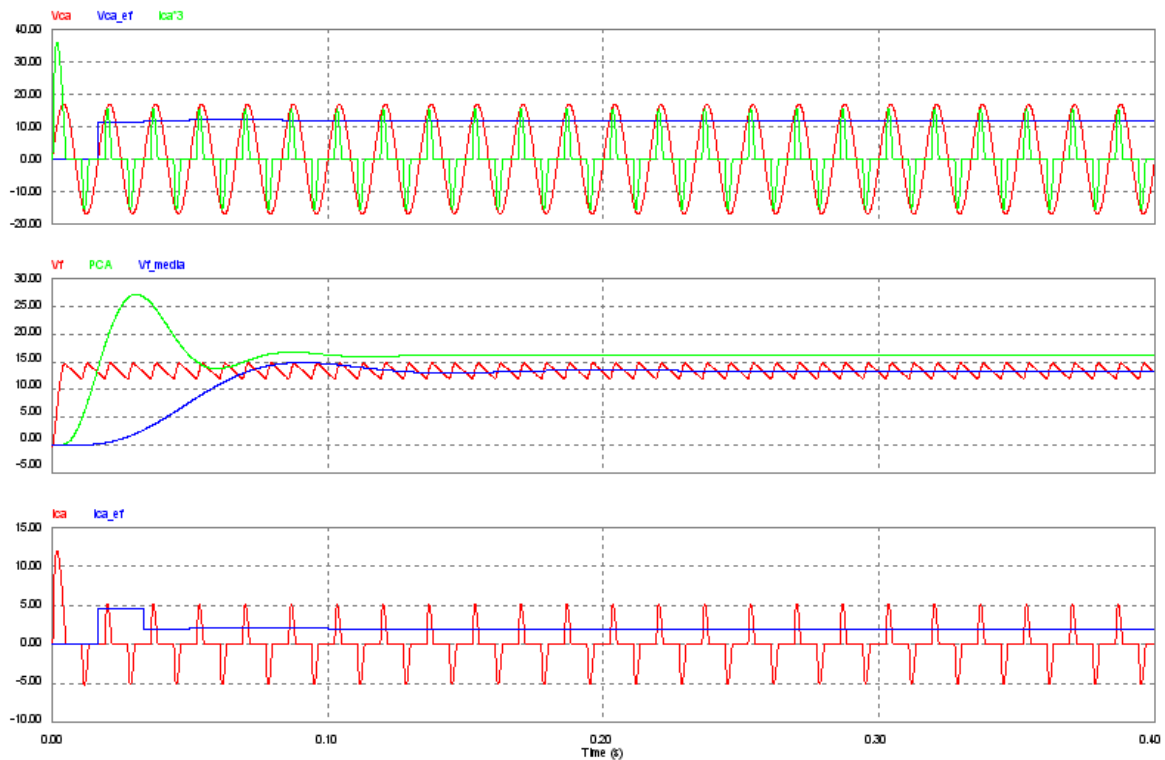
**Figura 2** Sugestão de ajuste inicial do menu “Simulation Control”

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  $V_{ca}$ ,  $V_{ca\_ef}$  e  $I_{ca}$ ; o segundo com  $V_f$ ,  $V_{f\_media}$  e  $PCA$ , e o terceiro com  $I_{ca}$  e  $I_{ca\_ef}$ .



**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 botão “redraw” 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 “redraw” 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  $FP = Pca / (Vca\_ef \cdot Ica\_ef)$

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

2.2 Verificação da corrente de inrush do retificador.

- 2.2.1 Repita os 5 casos acima, visualizando os primeiros ciclos apenas para a corrente de entrada ( $I_{ca}$ ).
- 2.2.2 Obtenha os valores de pico inicial da corrente  $i_{ca}(t)$  na rede (corrente de inrush).
- 2.2.3 Que problemas podem ocorrer para valores elevado 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?

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. Sugiro mostrar pelo menos uma amostra de 60ms.
- 2.3.2 Explique o seu comportamento.
- 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 mostrando-se na 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). Para isso sugere-se retirar um dos instrumentos (o medidor  $V_f$  médio, por exemplo)**
- 2.3.5 Preencha a quinta coluna da tabela três com o valor de ondulação de corrente calculado pela eq.3, que já foi deduzida no curso de Eletrônica de Potência I. **Lembrar que esta fórmula só vale quando a corrente no indutor for não sofrer descontinuidade.**

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




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			

=====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  do SIMVIEW, desativar a opção “**auto-scale**”, 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  do SIMVIEW cria-se o gráfico de barras com o espectro da forma de onda exibida.
- utilizando-se o botão  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 equação 4, calcular o valor eficaz de  $i_{CA}(t)$  e compará-lo com  $I_{ca\_ef}$  obtido na tabela II.

$$I_{CA\_ef} = \sum_{h=0}^{\infty} I_{h\_ef}^2 \quad (4)$$

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

$I_{1\_ef}$	$I_{3\_ef}$	$I_{5\_ef}$	$I_{7\_ef}$	$I_{9\_ef}$	$I_{11\_ef}$	$I_{13\_ef}$	$I_{15\_ef}$	$I_{CA\_ef}$ calculado	$I_{CA\_ef}$ 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.

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

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

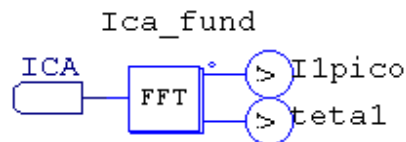
As equações 5 e 6 mostram que o fator de potência pode se tornar baixo com o aumento da defasagem  $\theta_1$ , ou pelo aumento do conteúdo harmônico da corrente. Assim, corrigir o fator de potência significa minimizar a defasagem  $\theta_1$ , e minimizar o fator de distorção. Pela eq. 4 nota-se que 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 para o 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	$I_{1\_ef}$ (A)	$\theta_1$ ** (grau)	$I_{ca\_ef}$ (A) tab. II	$\cos(\theta_1)$	$\frac{I_{1\_ef}}{I_{CA\_ef}}$	FP eq.4	FP <sup>*3</sup> tab. .II
A							
B							
C							
D							
E							

\*\* O valor de  $I_{1\_ef}$  pode ser obtido através do SIMVIEW, conforme feito no item 3, 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 Function 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 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?
- 5.2** Justifique.
- 5.3** Qual é o maior fator de potência que se consegue empregando-se compensação capacitiva para o caso A? Justifique.
- 5.4** Para o caso C, calcular o capacitor que torna  $\theta_1 = 0$ .
- 5.5** 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 item anterior.
- 5.6** Qual é o maior fator de potência que se consegue empregando-se compensação capacitiva