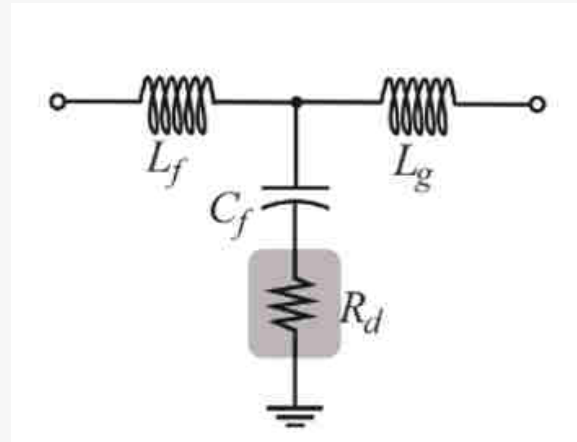
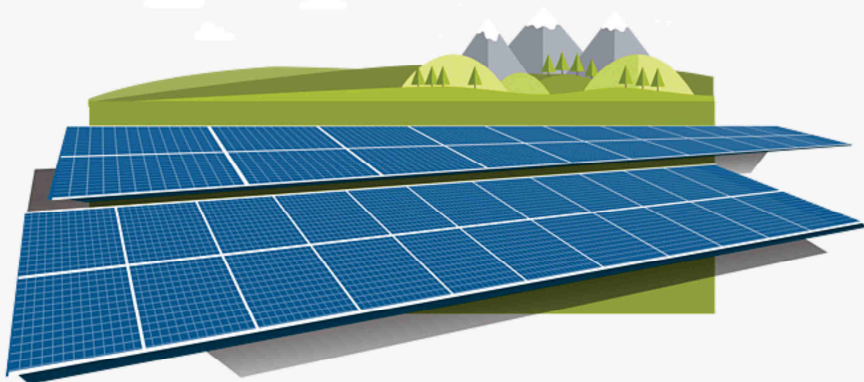




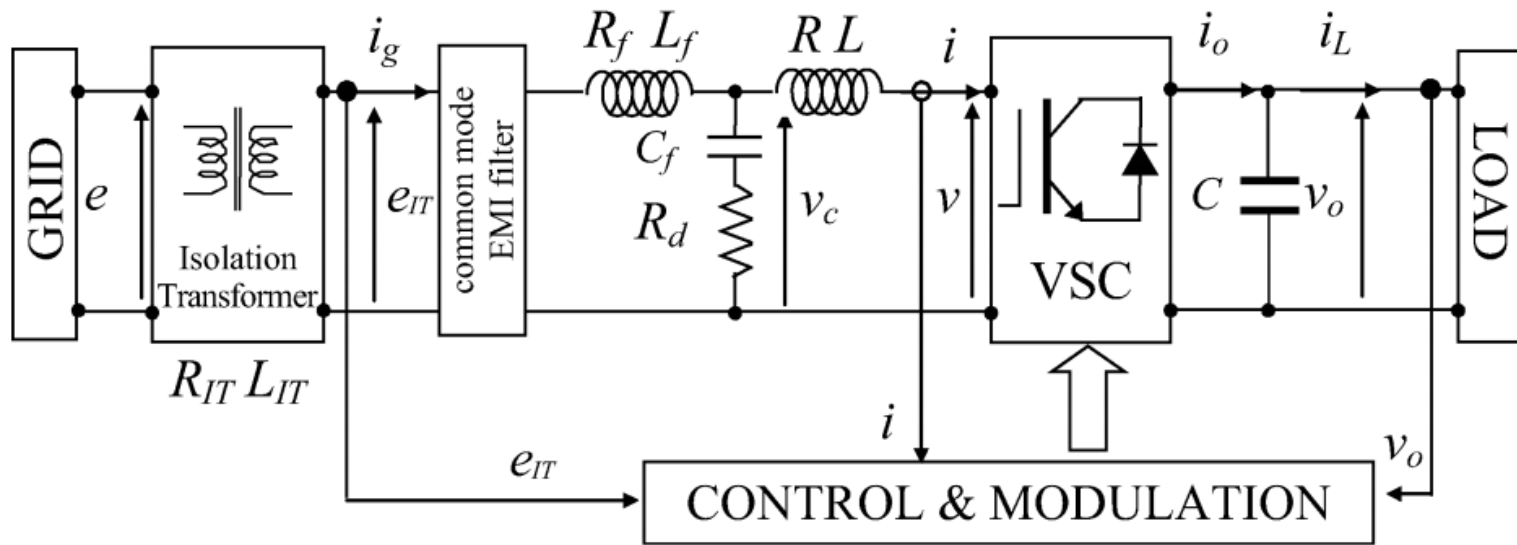
# Modelagem e Controle de Sistemas Fotovoltaicos

## Aula 07 – P2: Design de Filtros LCL

Prof. Heverton Augusto Pereira  
heverton.pereira@ufv.br



# Modelagem dos componentes do filtro LCL: Método 1



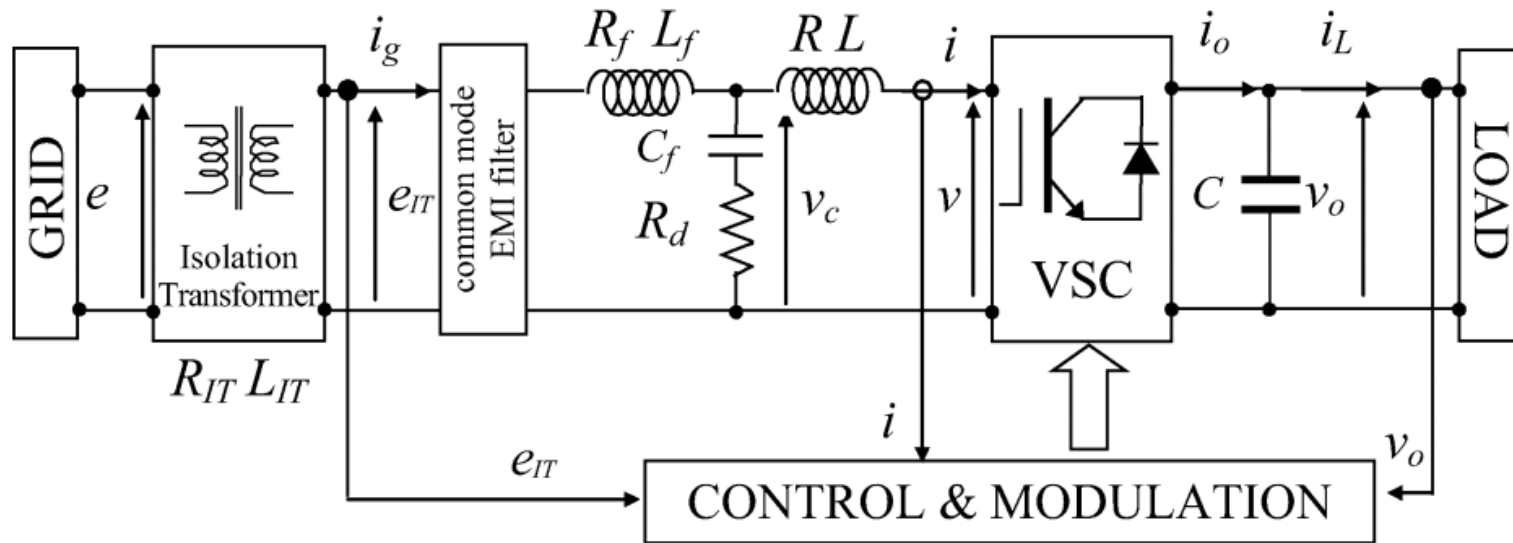
# Modelagem dos componentes do filtro LCL: Método 1

- ✓ De acordo com Liserre et al. (2005) ao se projetar o filtro LCL alguns limites nos parâmetros devem ser introduzidos para se obter melhor desempenho:
  1. O valor do capacitor está limitado pela potência reativa máxima que circula no sistema (geralmente deve ser inferior a 5%)
  2. O valor da indutância total deve ser limitado a fim de reduzir a queda de tensão

## Modelagem dos componentes do filtro LCL: Método 1

3. A frequência de ressonância deve estar dentro de uma faixa que não crie problemas de ressonância nas mais baixas e mais altas frequências:
  - ✓ Entre dez vezes a frequência da rede,  $f_n$ , e
  - ✓ a metade da frequência de chaveamento,  $f_s$ ;
  - ✓ Exemplo:  $f_n = 60$  Hz e frequência de chaveamento = 20 kHz
$$(10f_n < f_{res} < f_s/2) = (10 \times 60 < f_{res} < 20.000/2) = (600 < f_{res} < 10.000)$$
  
4. O valor do resistor de amortecimento  $R_d$  deve ser otimizado, levando em consideração:
  - ✓ A resposta dinâmica do filtro
  - ✓ A frequência de ressonância
  - ✓ As perdas geradas em baixa frequência.

# Modelagem dos componentes do filtro LCL: Método 1



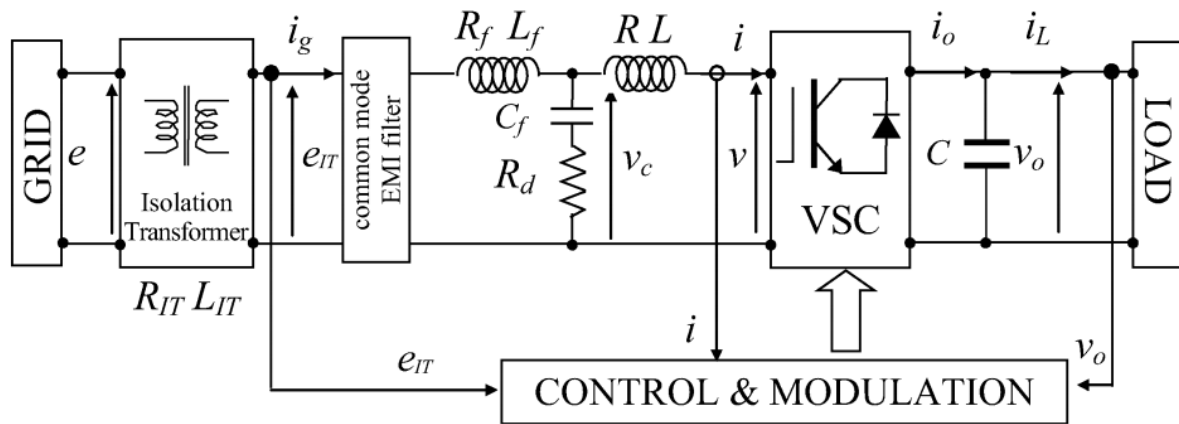
$$Z_b = \frac{e^2}{P_n}$$

$$C_b = \frac{1}{\omega_n Z_b}$$

$$z_{LC}^2 = [L_g C_f]^{-1} \quad (L_g = L_f + L_{IT})$$

$$\omega_{res}^2 = L_T z_{LC}^2 / L$$

# Modelagem dos componentes do filtro LCL: Método 1



$$\frac{i_g(h_{sw})}{v(h_{sw})} = \frac{z_{LC}^2}{\omega_{sw} L \cdot |\omega_{res}^2 - \omega_{sw}^2|}$$

$$\frac{i(h_{sw})}{v(h_{sw})} \approx \frac{1}{\omega_{sw} L}$$

$$\frac{i_g(h_{sw})}{i(h_{sw})} \approx \frac{z_{LC}^2}{|\omega_{res}^2 - \omega_{sw}^2|}$$

# Modelagem dos componentes do filtro LCL: Método 1

## ✓ Passo 1:

O indutor  $L_1$  do filtro será calculado em função da corrente de *ripple* máxima admissível que pode ser obtido por:

$$L_1 = \frac{e}{2\sqrt{6} f_s i_{ripple}}$$

# Modelagem dos componentes do filtro LCL: Método 1

## ✓ Passo 2:

- ✓ O valor do indutor do filtro do lado do conversor  $L_f$ , é relacionado ao indutor  $L_1$  através do parâmetro  $r$ , estimado através da equação de atenuação de corrente.

$$L_f = rL_1$$

- ✓ O valor de  $r$  é escolhido através da equação de atenuação de corrente em função dos parâmetros calculados.

$$\frac{i_g(h_s)}{i(h_s)} = \frac{1}{|1 + r(1 - ax)|} \quad a = L_1 C_b \omega_s^2$$

- ✓ Normalmente, o valor escolhido de atenuação por questões práticas é 20%, encontrando assim o valor de  $r$



# Modelagem dos componentes do filtro LCL: Método 1

✓ **Passo 3:**

- ✓ O valor do capacitor do filtro esta limitado pela potencia reativa que circula do sistema, através do parâmetro  $x$  ( $x = 5\%$ ).

$$C_f = xC_b$$

$$C_f = 0.05 \frac{P_n}{2\pi f_n e^2}$$

# Modelagem dos componentes do filtro LCL: Método 1

- ✓ **Passo 4:**
- ✓ O valor do resistor de amortecimento  $R_d$  inicialmente é definido igual ao dobro da impedância do capacitor na frequência de ressonância

# Modelagem dos componentes do filtro LCL: Método 1

- ✓ **Passo 5:**
- ✓ Calcular a frequência de ressonância

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_1 + L_f}{L_1 L_f C_f}}$$

## Modelagem dos componentes do filtro LCL: Método 2

- ✓ De acordo com Pena et al. (2014) um olhar mais comercial deve ser almejado:

**Passo 1:** consiste na definição da grandeza  $r_f$ , dada por:

$$r_f = \frac{f_{sw}}{f_{res}} .$$

Para o amortecimento passivo, considera-se  $f_{res} \leq \frac{f_{sw}}{2}$ , a fim de que os harmônicos de chaveamento não excitem a frequência de ressonância do filtro.

Como geralmente o controle do conversor é amostrado na frequência de chaveamento,  $r_f \approx 3$  deve ser adotado.

# Modelagem dos componentes do filtro LCL: Método 2

**Passo 2:** definição da grandeza  $r_l$ , dada por:

$$r_l = \frac{L_f}{L_g} .$$

- Utilizando-se  $r_l = 1$ , minimiza-se o valor dos indutores e capacitores do circuito.
- Além disso, esta estratégia é economicamente interessante.
- Como desvantagem, tal escolha resulta na mínima atenuação na frequência de chaveamento.

# Modelagem dos componentes do filtro LCL: Método 2

**Passo 3:** definição da capacitância do filtro.

Esse valor é função da potência reativa do filtro. Esta variável é função da razão entre a impedância do capacitor e dos indutores do filtro em pu, denominada  $r_q$ . Esta pode ser determinada por

$$r_q = \frac{C_f}{l_T} = Z_b^2 \frac{C_f}{L_T}.$$

- onde  $C_f$  é a capacitância do filtro e  $L_T = L_f + L_g$ .  $Z_b = V_g^2 / S_n$  é a impedância base do conversor, calculada em função da tensão nominal de linha eficaz  $V_g$  e a potência nominal  $S_n$ .

# Modelagem dos componentes do filtro LCL: Método 2

**Passo 3:** definição da capacitância do filtro.

- Um valor de  $r_q = 1$ . Resulta em um filtro com fator de potência unitário. Contudo, a escolha de  $r_q = 1$  resulta em indutores tão volumosos quanto se fosse utilizado um filtro indutivo.
- Desta forma, escolhe-se um valor de  $r_q$  maior que 1 com a finalidade de reduzir as indutâncias necessárias.

## Modelagem dos componentes do filtro LCL: Método 2

### Passo 4: Cálculos.

As variáveis do filtro são calculadas de acordo com os seguintes valores:  $Z_b$ ,  $L_b = Z_b / (2 \pi f_n)$ ,  $I_n = S_n / (\sqrt{3} V_{gabc})$ ,  $m_f = f_s / f_n$  e  $\omega_n = 2 \pi f_n$ , onde  $Z_b$  é a impedância base da rede,  $L_b$  é a indutância base,  $I_n$  a corrente base,  $m_f$  a relação entre a  $f_s$  e  $f_n$  e  $\omega_n$  a frequência angular da frequência de rede.

- O valor da indutância total do filtro por unidade (pu) é dada por:

$$l_t = r_f \cdot \frac{f_n}{f_s} \cdot \frac{1 + r_l}{\sqrt{r_l \cdot r_q}}$$



# Modelagem dos componentes do filtro LCL: Método 2

## Passo 4: Cálculos.

- Por sua vez, a estimativa da taxa THD é dada por:

$$THD_{i_g} = \frac{1}{I_n} \frac{\pi V_{dc}}{12Z_b} \cdot \frac{\sqrt{r_l}}{1+r_l} \cdot \frac{\sqrt{r_q}}{r_f^3} \cdot \frac{1}{\left[ \left(1 - \frac{6}{m_f}\right)^2 - \frac{1}{r_f^2} \right]} \cdot \sqrt{f(m)}$$

Sendo<sup>1,2</sup>:

$$m = \frac{2\sqrt{2}}{V_{dc}} \cdot \sqrt{\left(\frac{V_n}{\sqrt{3}}\right)^2 + (\omega_n \cdot L_t \cdot I_n)^2}$$

$$f(m) = \frac{3}{2} \cdot m^2 - \frac{4\sqrt{3}}{\pi} \cdot m^3 + \frac{9}{8} \left( \frac{3}{2} - \frac{9}{8} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\pi} \right) m^4$$

<sup>1</sup> R. Pena-Alzola, M. Liserre, F. Blaabjerg, M. Ordonez, and Y. Yang, "LCL-filter design for robust active damping in grid-connected converters," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2192–2203, 2014

<sup>2</sup> Rafael Peña-Alzola, Marco Liserre, Frede Blaabjerg, Rafael Sebastián, Jörg Dannehl and Friedrich Wilhelm Fuchs. Analysis of the Passive Damping Losses in LCL-filter Based Grid Converters. *IEEE POWER ELECTRONICS LETTERS*, June 2013

# Modelagem dos componentes do filtro LCL: Método 2

## Passo 4: Cálculos.

- Já o fator de potência pode ser estimado por:

$$FP = 1 - \frac{q^2}{2}$$

onde  $q$  é a potência reativa do filtro, dada em pu, descrita por:

$$q = \frac{(r_q - 1)(1 + r_l)}{\sqrt{r_q} \sqrt{r_l}} r_f \frac{f_n}{f_{sw}}$$

# Modelagem dos componentes do filtro LCL: Método 2

## Passo 4: Cálculos.

- As indutâncias, a taxa de distorção harmônica e o fator de potencia FP são plotados em função de  $r_q$ .
- Escolhe-se um valor de  $r_q$  que resulte em indutores relativamente pequenos e com um FP e THD aceitáveis.
- Define-se um fator de potência mínimo de 0,995 e uma taxa de distorção harmônica máxima de 3%.

# Modelagem dos componentes do filtro LCL: Método 2

## Passo 4: Cálculos.

- Definido o valor de  $r_q$ , os valores de indutância, capacitância e frequência de ressonância são calculados por:

$$L = \frac{L_t}{r_l + 1} \quad L_g = r_l L$$

$$C_f = r_q \frac{L_t}{Z_b^2}$$

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_f} \left( \frac{1}{L_f} + \frac{1}{L_g} \right)}$$

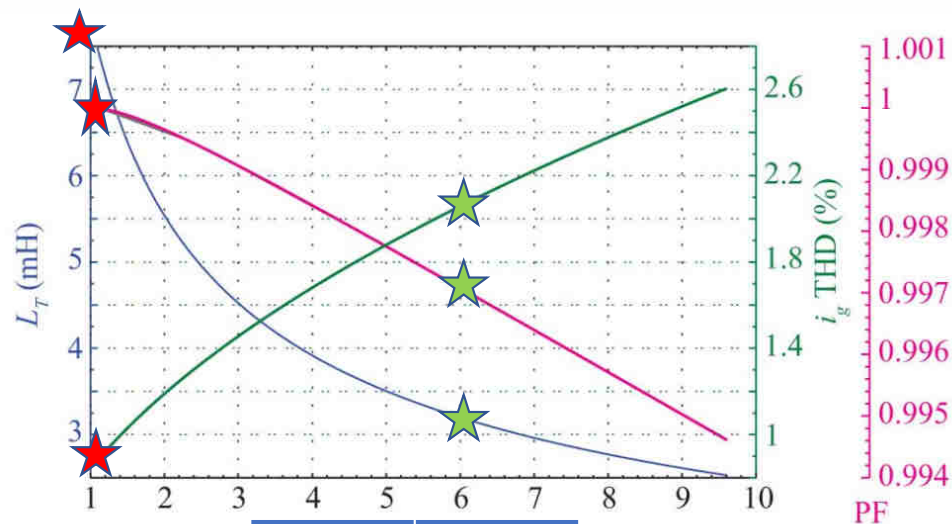
# Modelagem dos componentes do filtro LCL: Método 2

Exemplo:

$S_n$	2,2 kW
$V_g$	380 V
$f_n$	50 Hz
$f_{sw}$	8 kHz
$v_{dc}$	650 V

Escolhendo  $r_q = 1; r_l = 1; r_f = 3.12$

$L$	4,1 mH
$L_g$	4,1 mH
$C_f$	1,9 $\mu$ F
$THD$	< 1%
FP	1



Escolhendo  $r_q = 6,1; r_l = 1; r_f = 3.12$

$L$	1,6 mH
$L_g$	1,6 mH
$C_f$	4,7 $\mu$ F
$THD$	2,17%
FP	0,997



[www.gesep.ufv.br](http://www.gesep.ufv.br)



Gesep



gesep\_vicosa



Gesep UFV



Estimate - Sistemas  
Fotovoltaicos



<https://play.google.com/store/apps/details?id=br.developer.gesep.estimate>



# Obrigado!

---

**Heverton Augusto Pereira**

Prof. Departamento de Engenharia Elétrica | UFV

Coordenador da Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência | Gesep

Membro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica | PPGEL/CEFET-MG

E-mail: [heverton.pereira@ufv.br](mailto:heverton.pereira@ufv.br)