



# **UNICAMP - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS** **FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DA COMPUTAÇÃO**

LCEE - Laboratório de Condicionamento de Energia Elétrica

Título: Projeto do Conversor Buck em Modo de Condução Contínuo e do Controle

Nome: **Tiago Davi Curi Busarello**

Data: Out/2011

Obs: Projeto de três tipos de controladores aplicado ao Conversor Buck. O modelo do Conversor Buck é o de Modo de Condução Contínuo ideal. Controle da Tensão de Saída. Projetos dos Controladores Baseado no Fator k.

=====

## Especificações do Projeto

|                        |  |
|------------------------|--|
| $V_i := 100$           | Tensão de Entrada                        |
| $P_o := 1000$          | Potência de Saída                        |
| $V_o := 65$            | Tensão de Saída Desejada                 |
| $f_s := 20 \cdot 10^3$ | Frequencia de Chaveamento                |
| $\Delta V_o := 2$      | % da Variação da Saída Aceitável         |
| $\Delta I_o := 5$      | % da Ondulação de Corrente no Indutor    |
| $V_p := 22$            | Amplitude da Onda Triangular (Portadora) |
| $V_{ref} := 6.5$       | Tensão de Referência Disponível          |

## Projeto de Potência

$$R_o := \frac{V_o^2}{P_o} \quad \text{Resistência de Saída Máxima}$$

$$R_o = 4.225$$

$$I_o := \frac{V_o}{R_o} \quad \text{Corrente de Saída Máximo}$$

$$I_o = 15.385$$

$$D := \frac{V_o}{V_i} \quad \text{Cálculo do Ponto de Operação}$$

$$D = 0.65$$

$$L_{1\min} := \frac{V_i \cdot (1 - D) \cdot D}{f_s \cdot 2 \cdot I_o}$$

Indutância Mínima Necessária Para Garantir MCC

$$L_{1\min} = 3.697 \times 10^{-5}$$

$$L_f := 10 \cdot L_{1\min}$$

Indutância do Filtro de Saída

$$L_f = 3.697 \times 10^{-4}$$

$$C_{\min} := \frac{V_o \cdot (1 - D)}{f_s^2 \cdot 8 \cdot \frac{L_f \cdot \Delta V_o}{100}}$$

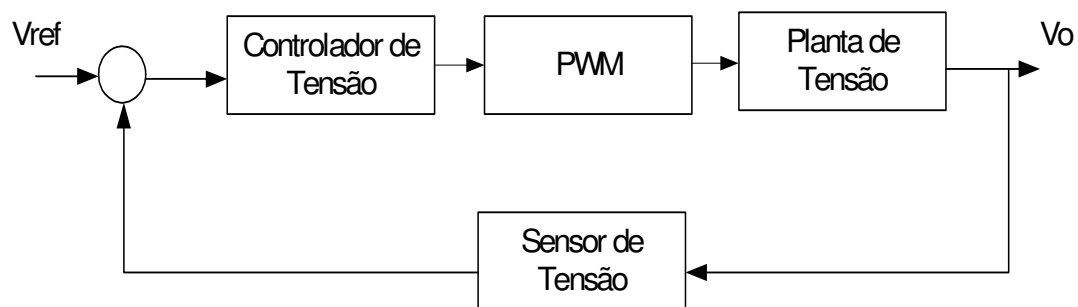
Cálculo do Capacitor de Saída Mínimo para Garantir a Ondulação Desejada

$$C_{\min} = 9.615 \times 10^{-4}$$

$$C_f := 3 \cdot C_{\min}$$

$$C_f = 2.885 \times 10^{-3}$$

### Projeto dos Controladores



$$G_V(f) := \frac{V_o}{D} \cdot \frac{1}{1 + 2 \cdot \pi \cdot f \cdot i \cdot \frac{L_f}{R_o} + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot i)^2 \cdot L_f \cdot C_f}$$

Modelo Da Planta de Tensão do Conversor Buck em MCC ideal. FT entre Saída e Sinal de Controle

$$PWM(f) := \frac{1}{V_P}$$

Modelo do Modulador  
PWM

$$G_{\text{sensor}} := \frac{V_{\text{ref}}}{V_O}$$

Ganho do Sensor Necessário

$$G_{\text{sensor}} = 0.1$$

$$H_v(f) := G_{\text{sensor}}$$

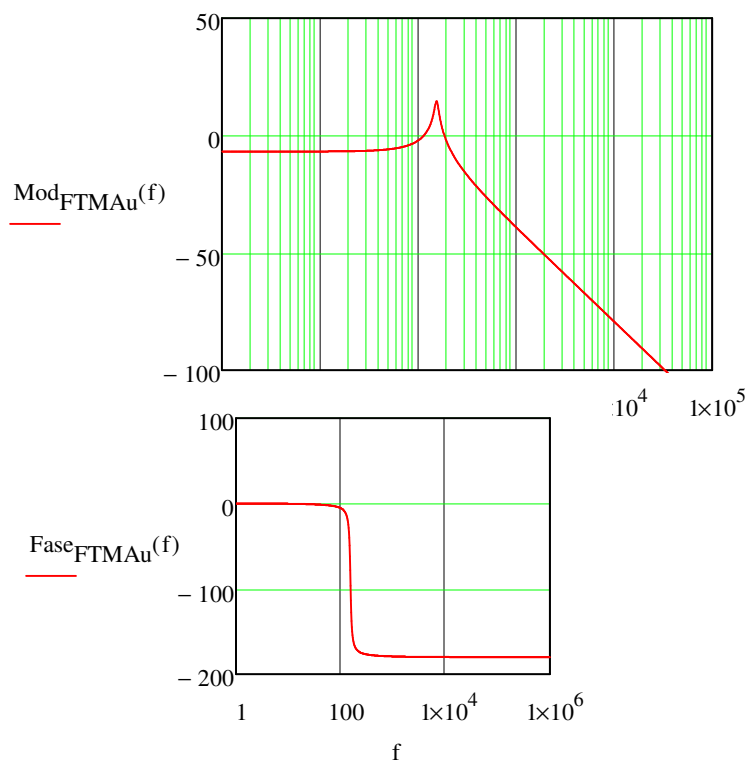
Modelo do Sensor de Tensão

$$FTMAu(f) := PWM(f) \cdot G_v(f) \cdot H_v(f)$$

FT de Malha Aberta Total Sem  
Compensação. u: uncompensated

$$\text{Mod}_{FTMAu}(f) := 20 \cdot \log(|FTMAu(f)|)$$

$$\text{Fase}_{FTMAu}(f) := \arg(FTMAu(f)) \cdot \frac{180}{\pi}$$



### Controlador Tipo1

$$n_1 := 10$$

Quantidade de Vezes menor da frequência de Chaveamento que  
terá a Frequência de Corte

$$f_{c1} := \frac{f_s}{n_1}$$

$$f_{c1} = 2 \times 10^3 \quad \text{Frequencia de Corte Desejada}$$

$$MF_1 := \frac{\pi}{3} \quad \text{Margem de Fase Desejada}$$

$$G_{1dB} := \text{Mod}_{FTMAu}(f_{c1}) \quad \text{Ganho a ser compensador [dB]}$$

$$G_{1dB} = -51.324$$

$$G_1 := 10^{\frac{|G_{1dB}|}{20}} \quad \text{Ganho Real do Controlador}$$

$$G_1 = 368.288$$

$$MF_{fc1} := \text{Fase}_{FTMAu}(f_{c1}) \cdot \frac{\pi}{180} \quad \text{Margem de Fase provocada pelo sistema na frequência de corte desejada (Em radianos)}$$

$$MF_{fc1} = -3.135$$

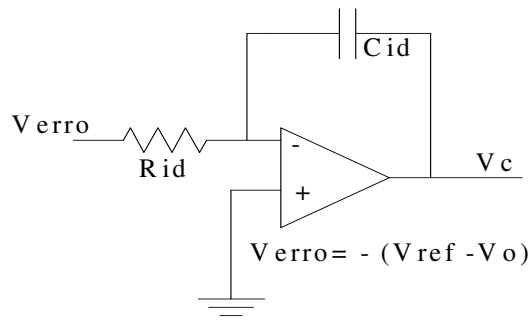
$$\alpha_1 := MF_1 - MF_{fc1} - \frac{\pi}{2} \quad \text{Avanço de Fase a ser compensado (Em radianos)}$$

$$k_1 := 1 \quad \text{Fator } k=1 \text{ para controlador Tipo 1}$$

$$\alpha_1 = 2.611$$

$$\text{Prod}_1 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{c1} \cdot G_1} \quad \text{Produto entre } C_{id} \text{ e } R_{id} \text{ do Controlador Conforme Diagrama Abaixo. Frequência de Ganho Unitário é a própria frequência de corte}$$

$$\text{Prod}_1 = 2.161 \times 10^{-7}$$



$$C_{id} := 15 \cdot 10^{-9} \quad \text{Valor Adotado}$$

$$R_{id} := \frac{\text{Prod}_1}{C_{id}}$$

$$R_{id} = 14.405$$

$$C_{\text{tipo1}}(f) := \frac{-1}{R_{id} \cdot C_{id} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot i} \quad \text{FT do Controlador}$$

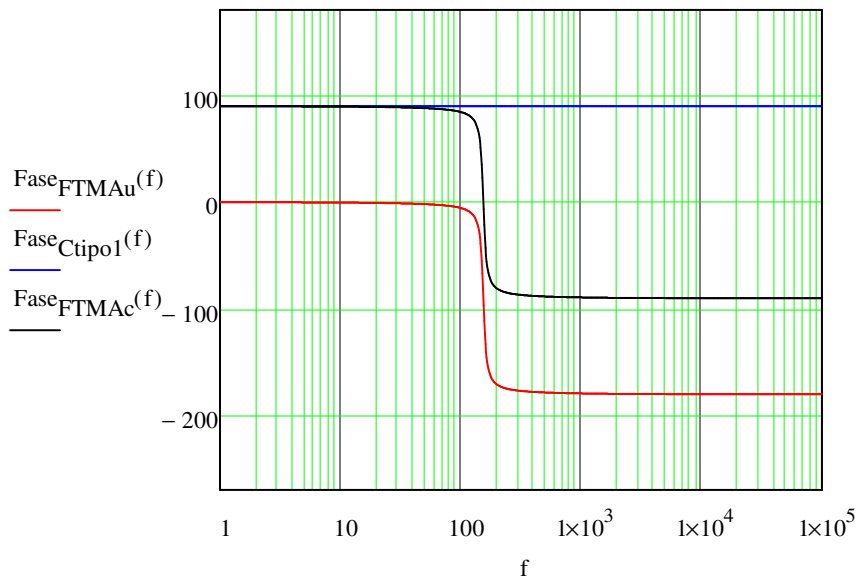
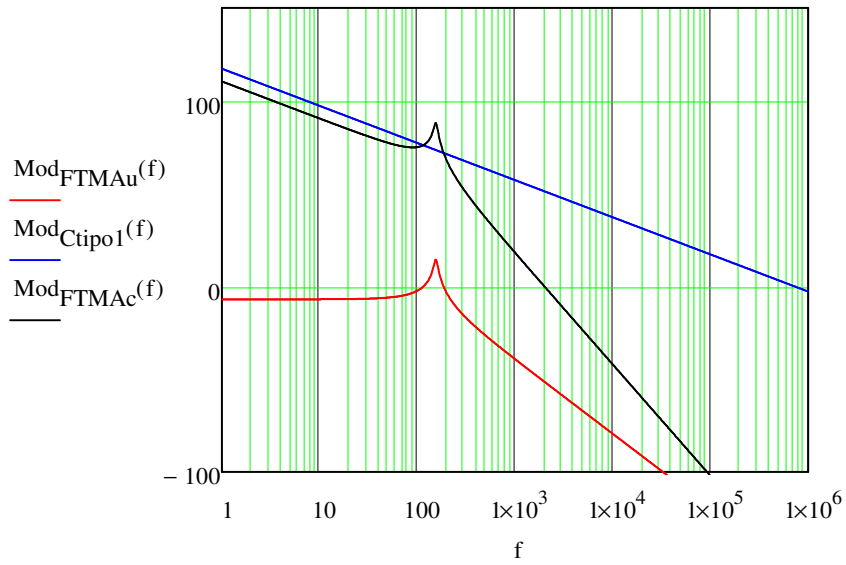
$$\text{Mod}_{C_{\text{tipo1}}}(f) := 20 \cdot \log(|C_{\text{tipo1}}(f)|)$$

$$\text{Fase}_{C_{\text{tipo1}}}(f) := \arg(C_{\text{tipo1}}(f)) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$\text{FTMAc}(f) := \text{FTMAu}(f) \cdot C_{\text{tipo1}}(f) \quad \text{FT Total em Malha Aberta (Envolvendo o Controlador Porjetado). c:compensated}$$

$$\text{Mod}_{\text{FTMAc}}(f) := 20 \cdot \log(|\text{FTMAc}(f)|)$$

$$\text{Fase}_{\text{FTMAc}}(f) := \arg(\text{FTMAc}(f)) \cdot \frac{180}{\pi}$$



Valores Obtidos Pelos Diagramas de Bode Utilizando "Trace"

$$f_{wi} := 2000$$

$$MF_{i1} := 110 \quad [\text{graus}]$$

O controlador do Tipo 1 eleva a fase do sistema em  $90^\circ$  e este valor não pode ser escolhido

$$E(f) := \frac{V_{\text{ref}}}{1 + \text{FTMAc}(f)} \cdot 2\pi \cdot f \cdot i \quad \text{FT do Erro}$$

$$E(10^{-5}) = 1.22 \times 10^{-14}$$

Erro em Regime Permanente

---

### Controlador Tipo 2

$$n_2 := 10$$

$$f_{c2} := \frac{f_s}{n_2}$$

$$f_{c2} = 2 \times 10^3$$

$$MF_2 := 60 \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$MF_2 = 1.047$$

$$G_{2dB} := \text{Mod}_{FTMAu}(f_{c2})$$

$$G_{2dB} = -51.324$$

$$G_2 := 10^{\frac{|G_{2dB}|}{20}}$$

$$G_2 = 368.288$$

$$MF_{fc2} := \text{Fase}_{FTMAu}(f_{c2}) \cdot \frac{\pi}{180}$$

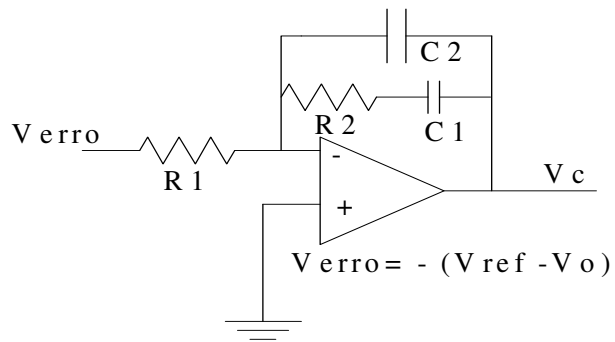
$$MF_{fc2} = -3.135$$

$$\alpha_2 := \left( MF_2 - MF_{fc2} - \frac{\pi}{2} \right) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$\alpha_2 = 149.624 \quad [\text{em graus}]$$

Se alfa2 for maior que 90° o controlador do tipo 2 já não é suficiente para controlar o sistema. Deve-se passar para o controlador do tipo 3. O controlador do tipo 2 consegue adicionar um avanço de fase entre 0 e 90°





### Controlador Tipo 3

$$n_3 := 10$$

$$f_{c3} := \frac{f_s}{n_2}$$

$$f_{c3} = 2 \times 10^3$$

$$MF_3 := 60 \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$MF_3 = 1.047$$

$$G_{3\text{dB}} := \text{Mod}_{\text{FTMAu}}(f_{c3})$$

$$G_{3\text{dB}} = -51.324$$

$$G_3 := 10^{\frac{|G_{3\text{dB}}|}{20}}$$

$$G_3 = 368.288$$

$$MF_{f_{c3}} := \text{Fase}_{\text{FTMAu}}(f_{c3}) \cdot \frac{\pi}{180}$$

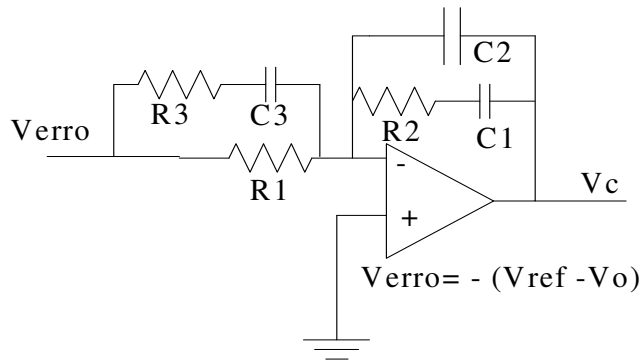
$$MF_{f_{c3}} = -3.135$$

$$\alpha_3 := \left( MF_3 - MF_{f_{c3}} - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$\alpha_3 = 2.611$$

$$K_3 := \left( \tan\left(\frac{\alpha_3}{4} + \frac{\pi}{4}\right) \right)^2$$

$$K_3 = 56.258$$



$$f_{z3} := \frac{f_{c3}}{\sqrt{K_3}}$$

$$f_{z3} = 266.647$$

$$f_{p3} := \sqrt{K_3} \cdot f_{c3}$$

$$f_{p3} = 1.5 \times 10^4$$

$$AV_1 := \frac{G_3}{\sqrt{K_3}}$$

Ganho na Frequência do zero duplo. Valor obtido por interpolação linear

$$AV_1 = 49.101$$

$$AV_2 := G_3 \cdot \sqrt{K_3}$$

Ganho na Frequência do pólo duplo

$$AV_2 = 2.762 \times 10^3$$

$$C_3 := 15 \cdot 10^{-9}$$

Valor Adotado

$$C_2 := \frac{C_3}{AV_2}$$

$$C_2 = 5.43 \times 10^{-12}$$

$$N_c := 1000$$

Veze maior que C1 é de C2

$$C_1 := N_c \cdot C_2$$

$$C_1 = 5.43 \times 10^{-9}$$

$$R_2 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_2 \cdot f_{p3}}$$

$$R_2 = 1.954 \times 10^6$$

$$R_3 := \frac{R_2}{AV_2}$$

$$R_3 = 707.303$$

$$R_1 := \frac{R_2}{AV_1}$$

$$R_1 = 3.979 \times 10^4$$

De fato,  $R_1 \gg R_3$

$$UFG := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot (C_1 + C_2)}$$

Frequência de Ganho Unitário

$$UFG = 735.841$$

$$C_{\text{tipo3}}(f) := \frac{\left[ \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot i \cdot C_2)} \cdot \left[ R_2 + \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot i \cdot C_1)} \right] \right]}{\frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot i \cdot C_2)} + R_2 + \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot i \cdot C_1)}} \cdot \frac{R_1 \cdot \left[ R_3 + \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot i \cdot C_3)} \right]}{R_1 + R_3 + \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot i \cdot C_3)}}$$

FT do Controlador Tipo3

$$\text{Mod}_{C_{\text{tipo3}}}(f) := 20 \cdot \log(|C_{\text{tipo3}}(f)|)$$

$$\text{Fase}_{C_{\text{tipo3}}}(f) := \arg(C_{\text{tipo3}}(f)) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$\text{FTMAc3}(f) := \text{FTMAu}(f) \cdot C_{\text{tipo3}}(f)$$

$$\text{Mod}_{\text{FTMAc3}}(f) := 20 \cdot \log(|\text{FTMAc3}(f)|)$$

$$\text{Fase}_{\text{FTMAc3}}(f) := \arg(\text{FTMAc3}(f)) \cdot \frac{180}{\pi}$$

