



Modelagem e Controle de Conversores

Controle clássico de conversores:

Projeto de compensadores

Prof. Cassiano Rech
cassiano@ieee.org

Sumário

- Controle clássico de conversores estáticos
 - Projeto de compensadores

Controle clássico de conversores: Projeto de compensadores

Especificações

1. As variáveis controladas devem permanecer dentro de uma faixa especificada mesmo com **variações na carga**
 - Ganho em malha aberta elevado
2. As variáveis controladas devem permanecer dentro de uma faixa especificada mesmo com **variações nas fontes de energia**
 - Ganho em malha aberta elevado
3. O sistema deve responder a distúrbios com uma **rápida resposta transitória**
 - Elevada frequência de cruzamento do ganho
4. As variáveis controladas usualmente devem apresentar **sobre-sinal e oscilações reduzidas**
 - Margem de fase suficientemente grande

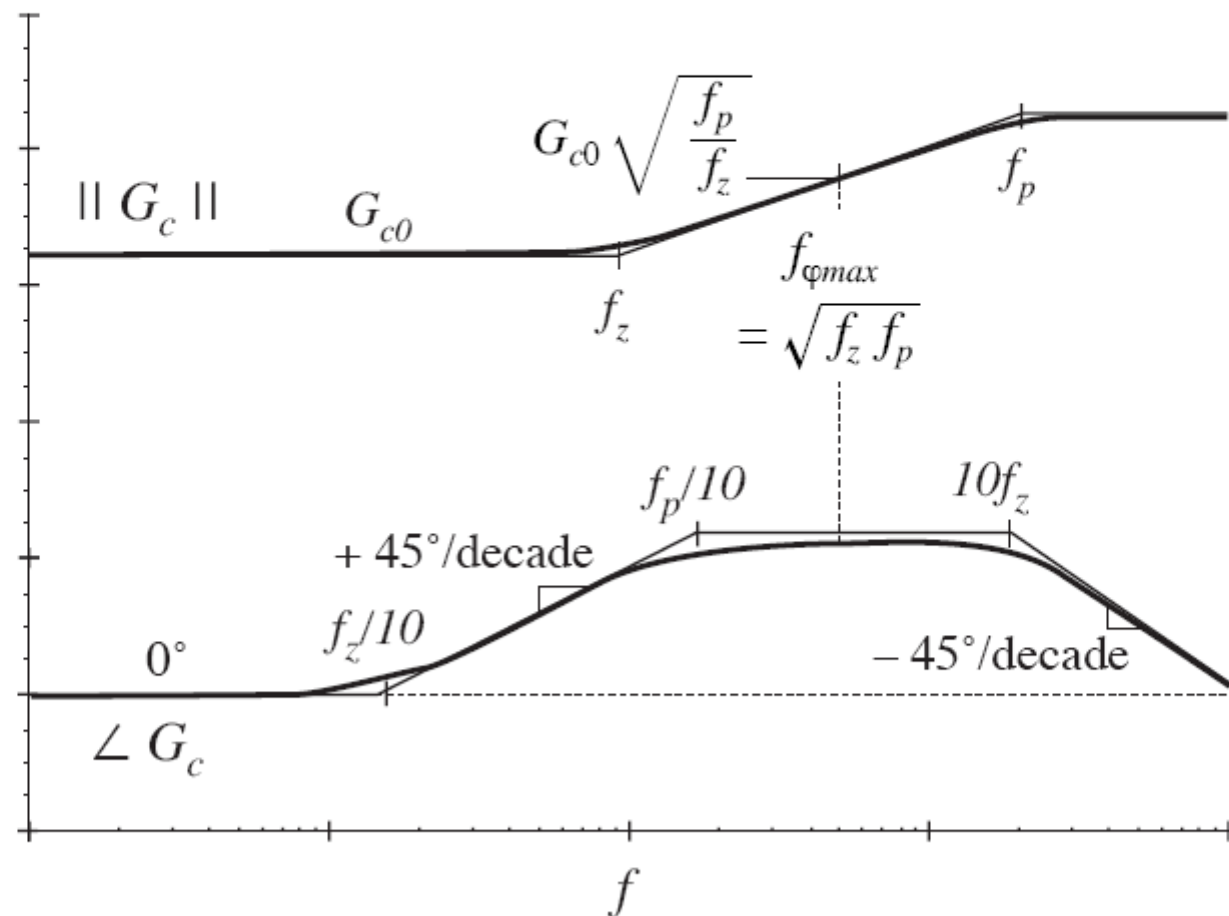
Controle clássico de conversores: Projeto de compensadores

Compensador em avanço (Proporcional-Derivativo – PD)

- Empregado para **aumentar a margem de fase**.
- A **freqüência de cruzamento** do sistema realimentado também **pode ser aumentada**, mantendo uma margem de fase adequada.
- Um **zero é adicionado** em $T(s)$, em uma freqüência f_z suficientemente menor que a freqüência de cruzamento f_c , tal que a margem de fase de $T(s)$ é aumentada de um valor desejado.
- Devido à inclusão do zero, o ganho do compensador aumenta com a freqüência em uma taxa de +20 db/dec. Caso o ganho do compensador seja elevado na freqüência de comutação, os harmônicos produzidos pelas comutações serão amplificados pelo compensador e podem prejudicar a operação do PWM.
- Assim, é usual **adicionar pólo(s)** em freqüência(s) menor(es) que a freqüência de comutação.
- Normalmente, a freqüência de cruzamento é limitada em torno de 10% da freqüência de comutação.

Controle clássico de conversores: Projeto de compensadores

$$G_c(s) = G_{c0} \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_z}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_p}\right)}$$



Controle clássico de conversores: Projeto de compensadores

A máxima defasagem introduzida pelo compensador ocorre na frequência $f_{\varphi\max}$, dada pela média geométrica das frequências do zero e do pólo:

$$f_{\varphi\max} = \sqrt{f_z f_p}$$

Para obter o máxima acréscimo na margem de fase, o compensador deve ser projetado para que a frequência $f_{\varphi\max}$ coincida com a frequência de cruzamento desejada. Esta especificação é alcançada quando:

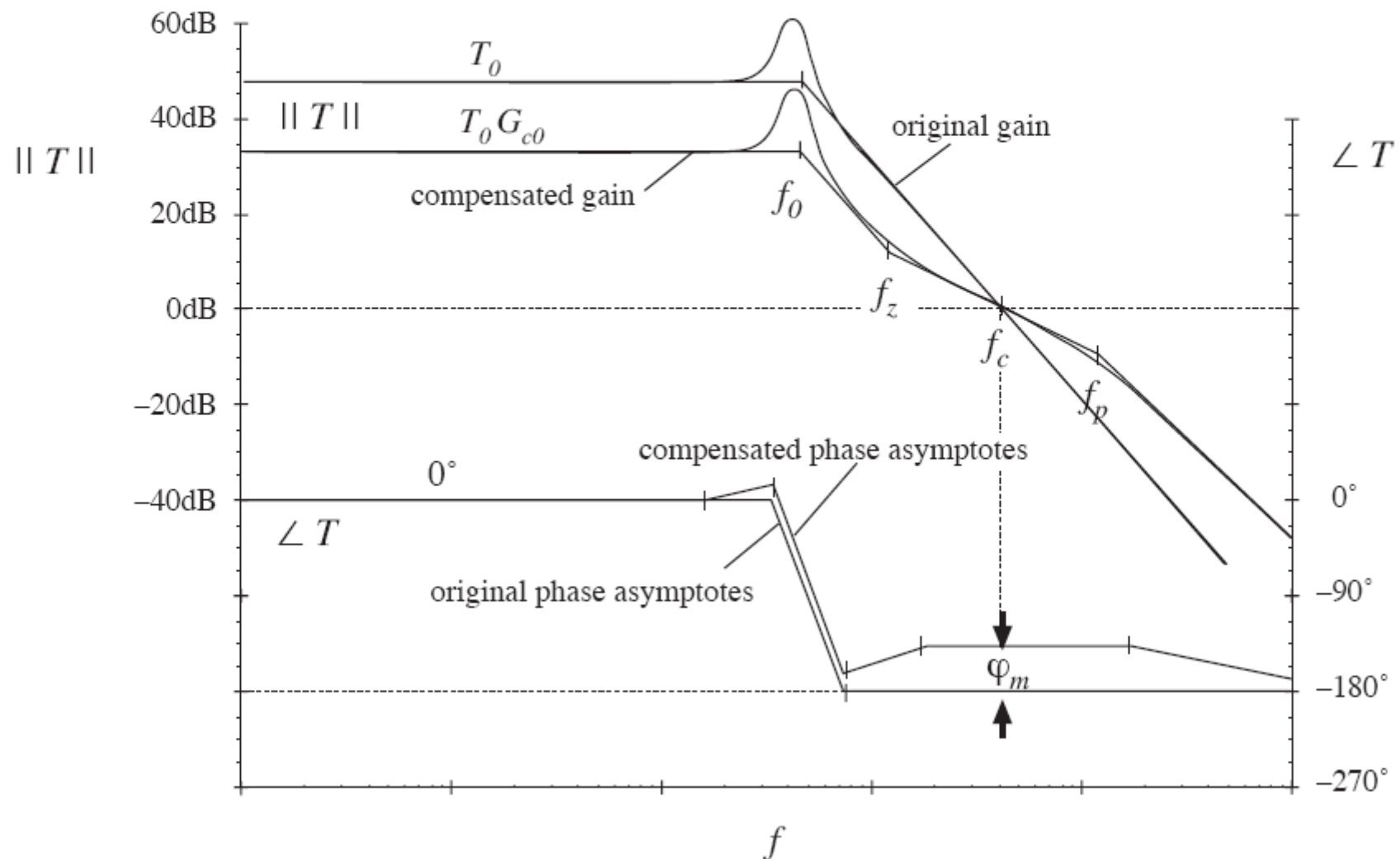
$$f_z = f_c \sqrt{\frac{1 - \sin(\theta)}{1 + \sin(\theta)}}$$

$$f_p = f_c \sqrt{\frac{1 + \sin(\theta)}{1 - \sin(\theta)}}$$

onde θ é o avanço de fase introduzido pelo compensador para atingir a margem de fase desejada.

O **ganho do compensador** deve ser selecionado para selecionar a frequência de cruzamento desejada.

Controle clássico de conversores: Projeto de compensadores



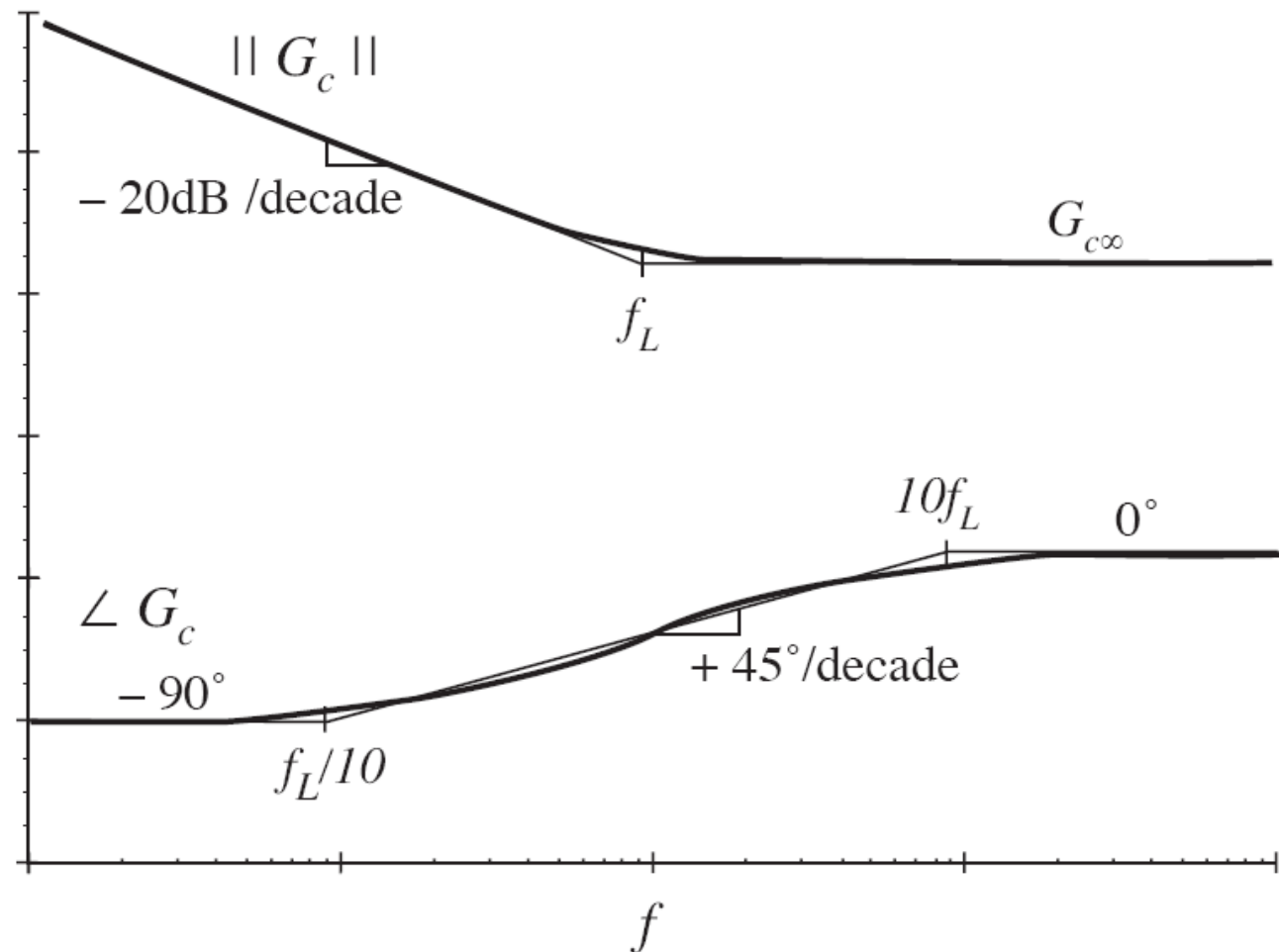
Controle clássico de conversores: Projeto de compensadores

Compensador em atraso (Proporcional-Integral – PI)

- Empregado para **aumentar o ganho em malha aberta em baixas frequências**, de tal forma que a saída apresenta melhor regulação em frequências bem abaixo da frequência de cruzamento do ganho.
- Um **pólo é adicionado na origem** para aumentar o ganho CC de $T(s)$.
- Com a inclusão do pólo na origem, o erro em regime permanente é nulo para entradas do tipo degrau. Além disso, a função de transferência da saída em relação a um distúrbio é zero para corrente contínua.
- Um **zero é adicionado** em uma frequência f_L suficientemente menor que a frequência do cruzamento do ganho (usualmente uma década abaixo), de tal forma que a margem de fase não se modifique.
- O **ganho do compensador** deve ser selecionado para selecionar a frequência de cruzamento desejada.

Controle clássico de conversores: Projeto de compensadores

$$G_c(s) = G_{c\infty} \left(1 + \frac{\omega_L}{s} \right)$$



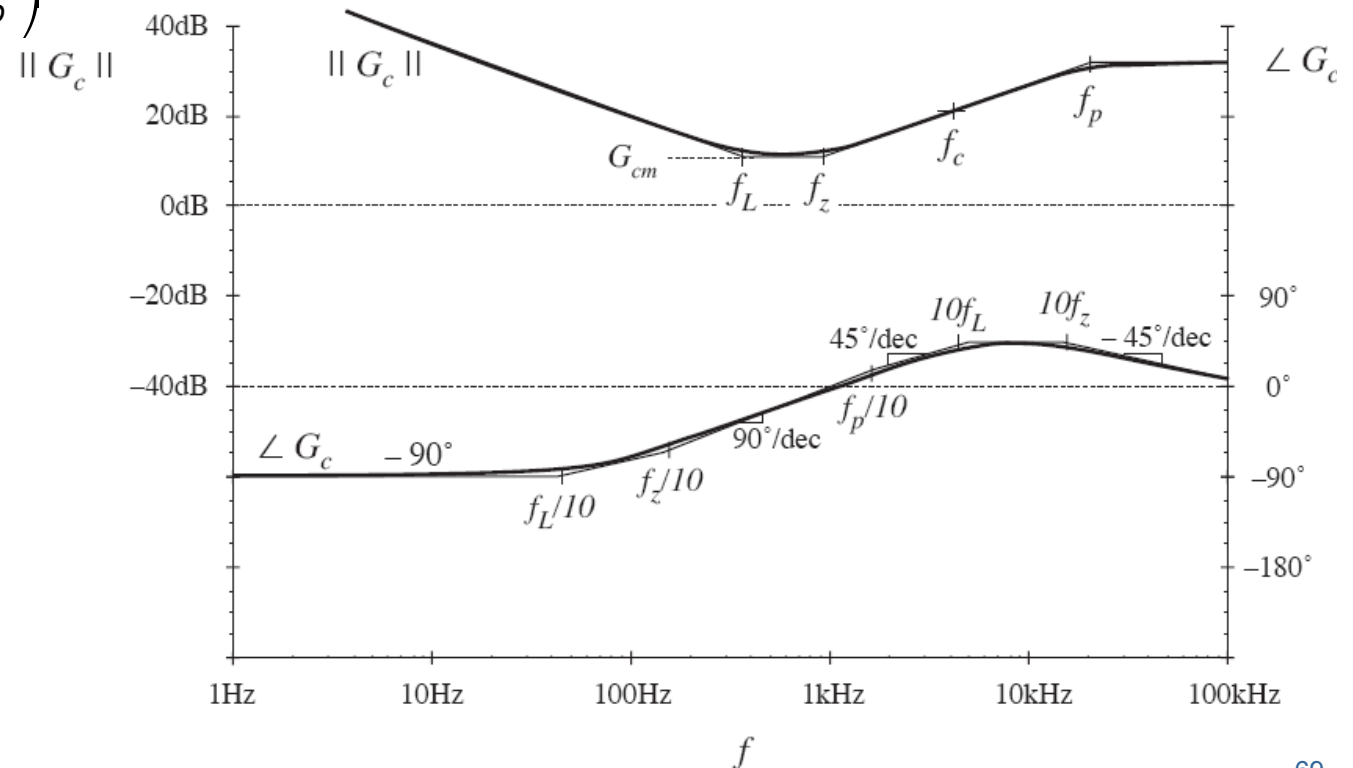
Controle clássico de conversores: Projeto de compensadores

Compensador Proporcional-Integral-Derivativo – PID)

- As vantagens dos compensadores PD e PI podem ser combinadas para obter uma larga banda passante e para eliminar o erro em regime permanente
- Em baixas frequências, o compensador integra o sinal de erro, aumentando o ganho CC de $T(s)$ e melhorando a regulação em baixa frequência das variáveis a serem controladas.
- Em altas frequências, em torno da frequência de cruzamento, o compensador introduz um avanço de fase em $T(s)$, melhorando a margem de fase.

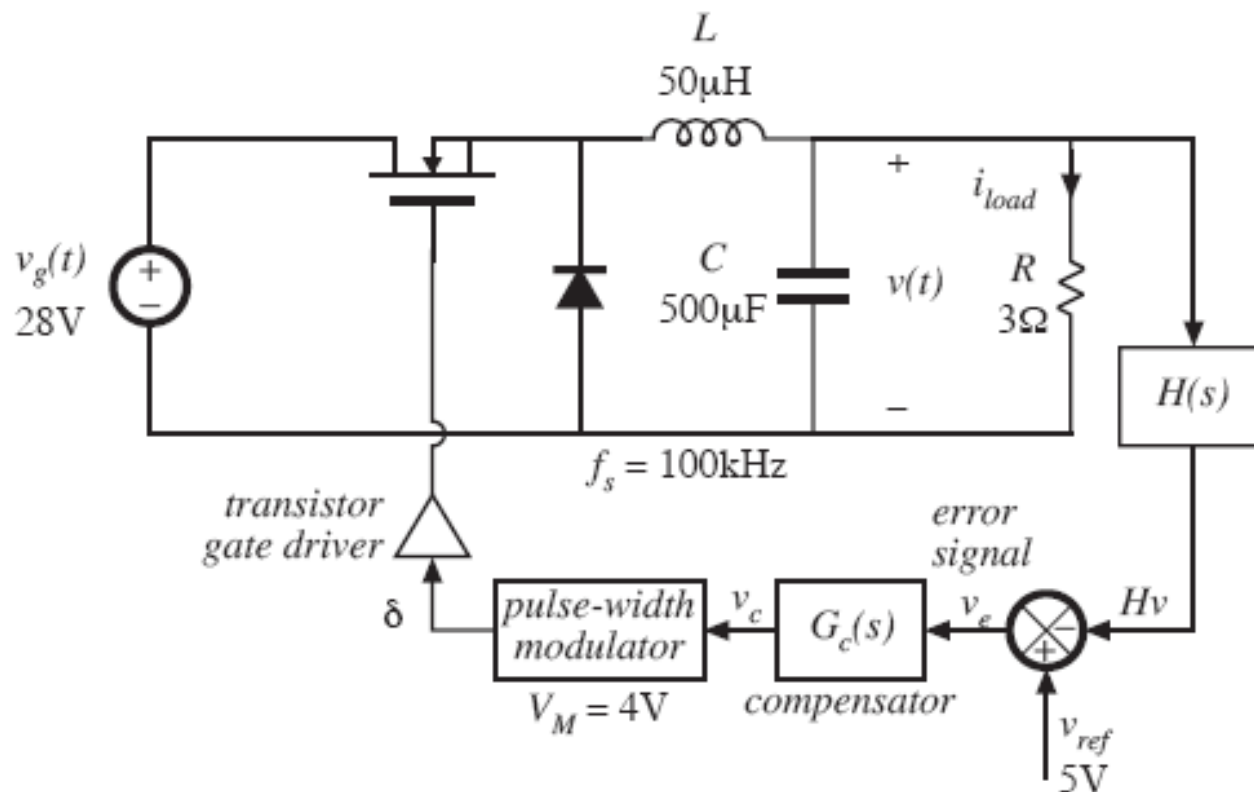
Controle clássico de conversores: Projeto de compensadores

$$G_c(s) = G_{cm} \frac{\left(1 + \frac{\omega_L}{s}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_z}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_p}\right)}$$



Controle clássico de conversores: Projeto de compensadores

Exemplo: Controle da tensão de saída de um conversor buck CC-CC



Especificações:

$$V_o = 15\text{ V } (H = 1/3)$$

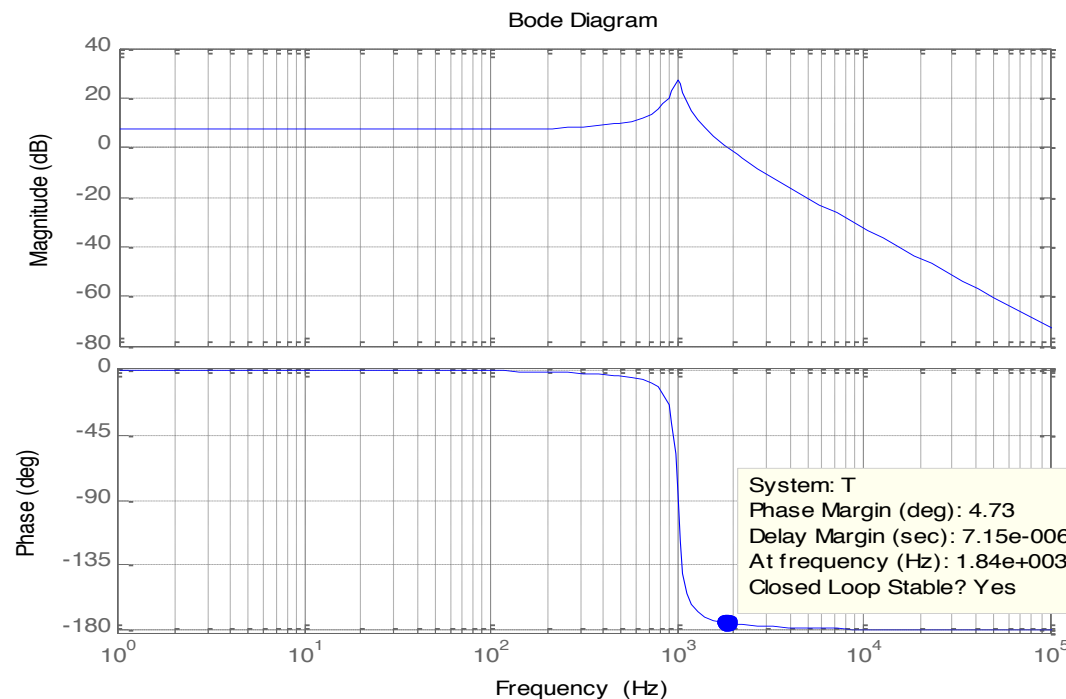
$$f_c = 10\text{ kHz}$$

$$\text{Margem de fase} = 60^\circ$$

Controle clássico de conversores: Projeto de compensadores

- Função de transferência em malha aberta não compensada:

$$T(s) = G_{vd}(s)H(s)\frac{1}{V_M} \quad \text{onde:} \quad G(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = V_g \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}}$$



Controle clássico de conversores: Projeto de compensadores

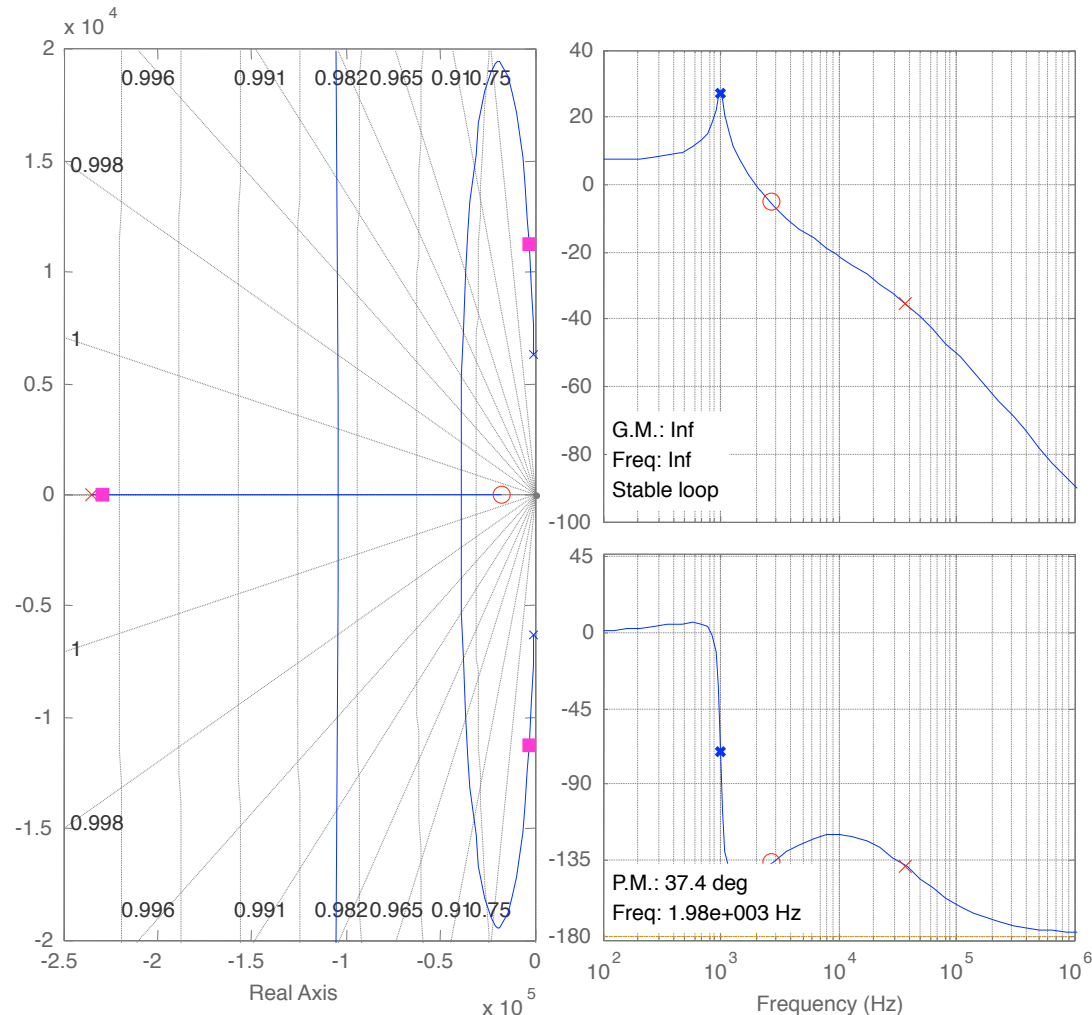
Projeto PD:

$$f_z = f_c \sqrt{\frac{1 - \sin(\theta)}{1 + \sin(\theta)}}$$

$$f_z = 2,7 \text{ kHz}$$

$$f_p = f_c \sqrt{\frac{1 + \sin(\theta)}{1 - \sin(\theta)}}$$

$$f_p = 37,3 \text{ kHz}$$



Controle clássico de conversores: Projeto de compensadores

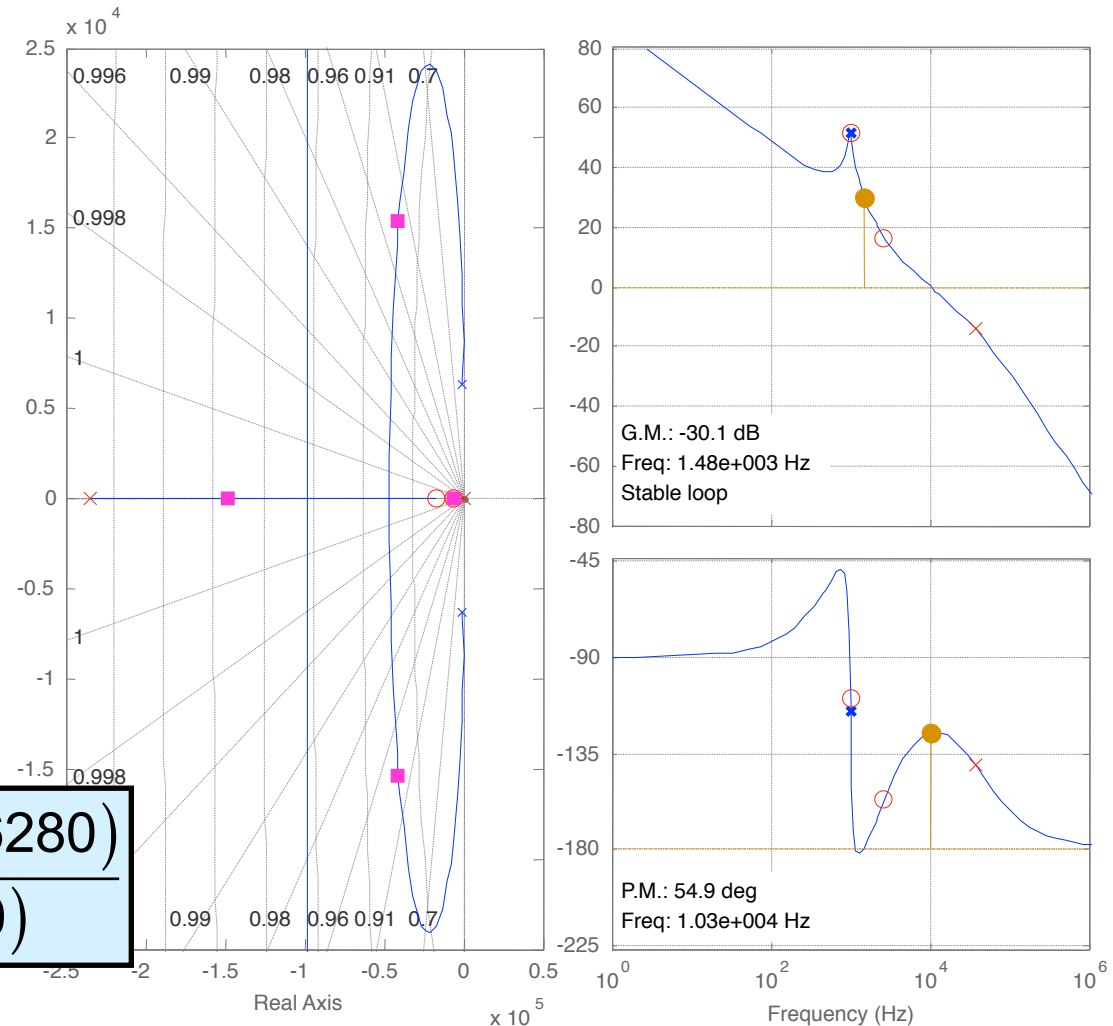
Projeto PD + PI:

$$f_L = \frac{f_c}{10}$$

$$f_L = 1 \text{ kHz}$$

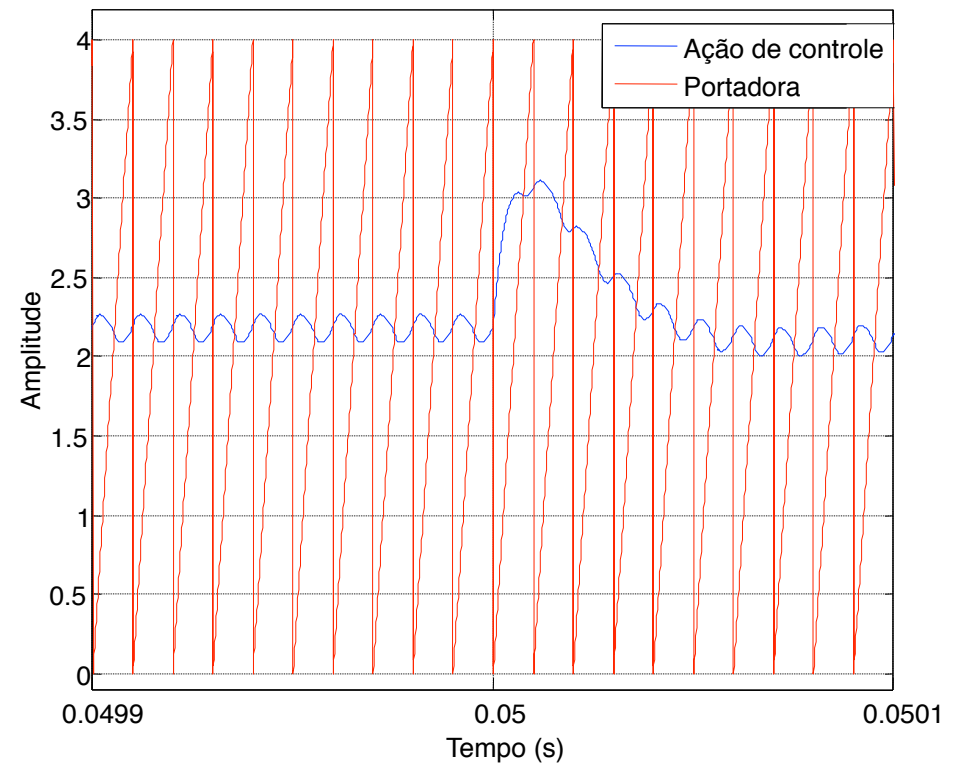
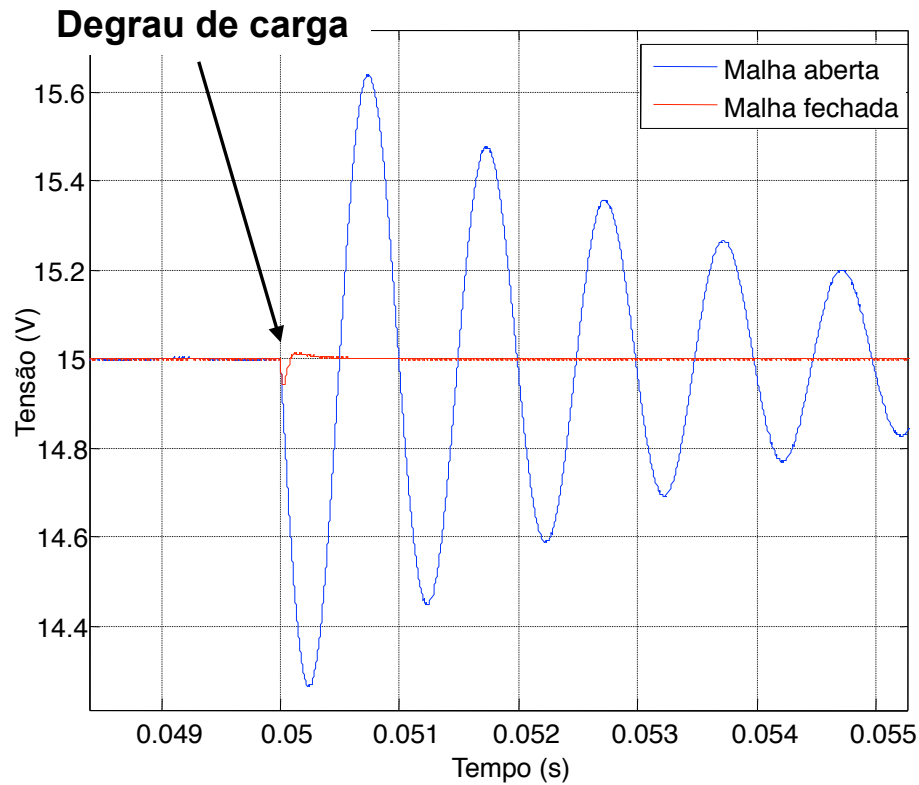
Ganho ajustado no
sisotool

$$C_{pid}(s) = 161 \frac{(s + 17000)(s + 6280)}{s(s + 234000)}$$



Controle clássico de conversores: Projeto de compensadores

▪ Simulação: Malha aberta *versus* Malha fechada



Bibliografia

- R. W. Erickson, D. Maksimovic, “*Fundamentals of Power Electronics*”, Second edition.
- J. G. Kassakian, M. F. Schlecht, G. C. Verghese, “*Principles of Power Electronics*”.
- K. Ogata, “*Engenharia de Controle Moderno*”, 4ª edição.