



Universidade de São Paulo

- *Escola de Engenharia de São Carlos*

- *Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação*

Regulação de Tensão e Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas Elétricos de Potência

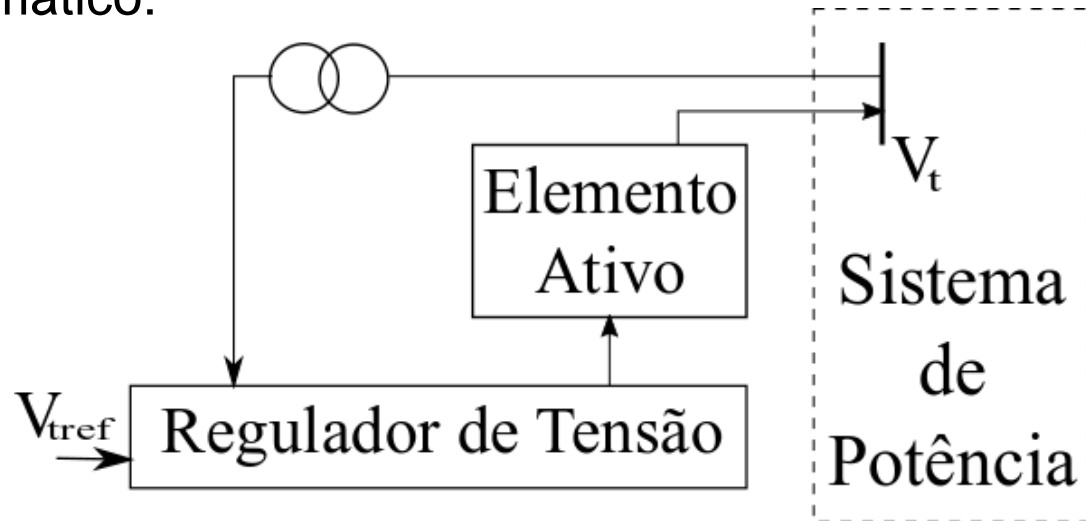
Rodrigo Andrade Ramos

Estrutura da Apresentação

- Regulação de Tensão em Sistemas de Potência
- Estudos de Estabilidade em Sistemas de Potência
- Oscilações Eletromecânicas
- Controladores de Amortecimento
- Modelos Padronizados
- Conclusões e Perspectivas

Regulação de Tensão em SEP

- **Reguladores de Tensão em SEP:** controladores destinados a manter a tensão em uma determinada barra do sistema próxima de um valor de referência.
- Diagrama esquemático:



- Nessa apresentação: elemento ativo será um **gerador síncrono**.

Regulação de Tensão em SEP

- Principais objetivos da regulação de tensão em SEP:
 - Em regime permanente, contribuir para o estabelecimento do **perfil de tensão** desejado para o sistema;
 - Em condições transitórias, permitir uma **rápida recuperação da tensão** após a ocorrência de uma perturbação.

Regulação de Tensão em SEP

- Regulação de tensão de um SEP em condições transitórias:
 - Problema pode ser formulado como **controle robusto de um sistema dinâmico não linear**;
 - Aspectos importantes que devem ser garantidos são a **estabilidade** e o **desempenho** do sistema controlado.

Estudos de Estabilidade em SEP

- Classificação dos estudos de estabilidade:



Estudos de Estabilidade em SEP

- Formulação típica para o estudo de estabilidade em SEP:

$$\dot{x} = f(x, u, z, p)$$

$$y = g(x, u, z, p)$$

$$0 = h(x, z, p)$$



Sistema de Equações
Algébrico-Diferenciais
Não Lineares

x - vetor de variáveis de estado

u - vetor de variáveis de entrada

y - vetor de variáveis de saída

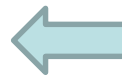
z - vetor de variáveis algébricas

p - vetor de parâmetros

Estudos de Estabilidade em SEP

- Formulação para o estudo de estabilidade a pequenas perturbações em SEP:

$$\begin{aligned}\dot{\Delta x} &= A(p)\Delta x + B(p)\Delta u \\ \Delta y &= C(p)\Delta x + D(p)\Delta u\end{aligned}$$



Sistema de Equações
Diferenciais Linearizadas

Δx - vetor de variáveis de estado

Δu - vetor de variáveis de entrada

Δy - vetor de variáveis de saída

p - vetor de parâmetros

Notação Δ - representa desvio em relação ao equilíbrio

Estudos de Estabilidade em SEP

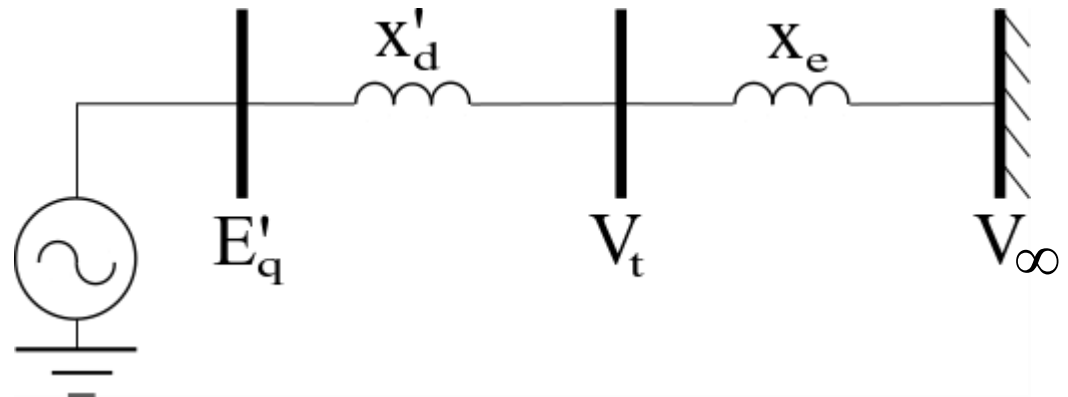
- Formulação bem conhecida para aplicações de controle linear.
 - Ainda forma a base para a **solução utilizada como padrão pela indústria**;
 - Permite a identificação de características desejadas para o controle a ser projetado (tais como, por exemplo, **robustez em relação ao ponto de operação**).

Oscilações Eletromecânicas

- Exemplo: Sistema Máquina Versus Barra Infinita (SMIB)

$$\dot{\delta} = \omega_s \omega - \omega_s$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2H} (P_m - E'_q I_q)$$



- Natureza das **oscilações eletromecânicas** está nessas duas equações.

$$I_q = \frac{E'_q V_\infty \sin \delta}{x'_d + x_e}$$



$$\ddot{\delta} = \bar{f}(\delta)$$

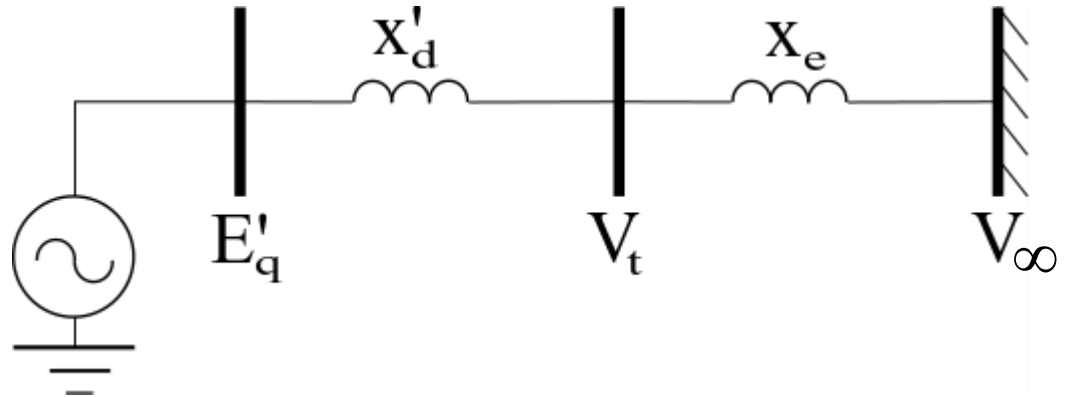
Característica de Oscilador
Não Amortecido

Oscilações Eletromecânicas

- Exemplo: Sistema Máquina Versus Barra Infinita (SMIB)

$$\dot{\delta} = \omega_s \omega - \omega_s$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2H} (P_m - E'_q I_q)$$



- Modelo clássico não é suficiente para explicar **condições instáveis** ($D < 0$).
- É necessário acrescentar a dinâmica do **circuito de campo**.

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{\tau'_{do}} [E_{FD} - E'_q + (x_d - x'_d)I_d]$$

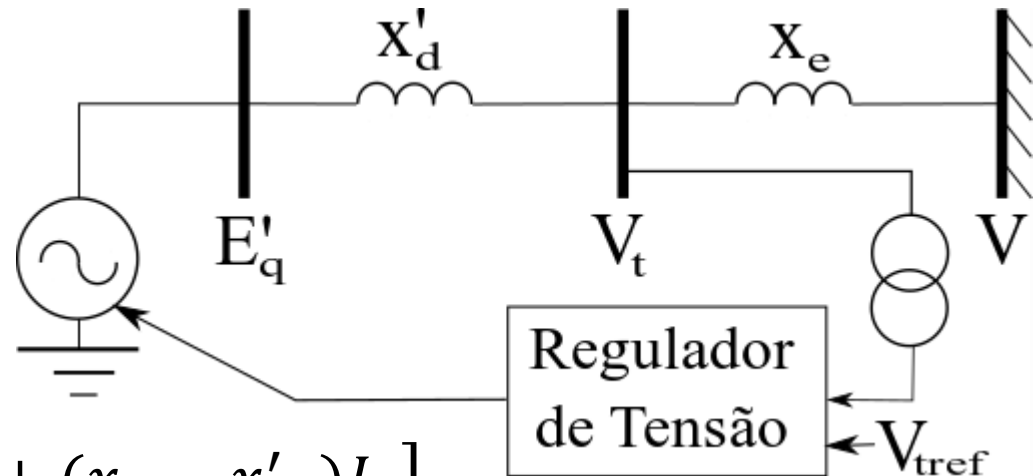
Oscilações Eletromecânicas

- Exemplo: Sistema Máquina Versus Barra Infinita (SMIB)

$$\dot{\delta} = \omega_s \omega - \omega_s$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2H} (P_m - E'_q I_q)$$

$$E'_q = \frac{1}{\tau'_{do}} [E_{FD} - E'_q + (x_d - x'_d) I_d]$$



- O **regulador de tensão** altera a tensão de campo E_{FD} para controlar V_t .
- Este regulador deve possuir **alto ganho de regime permanente** para que o erro entre V_t e V_{tref} seja pequeno.

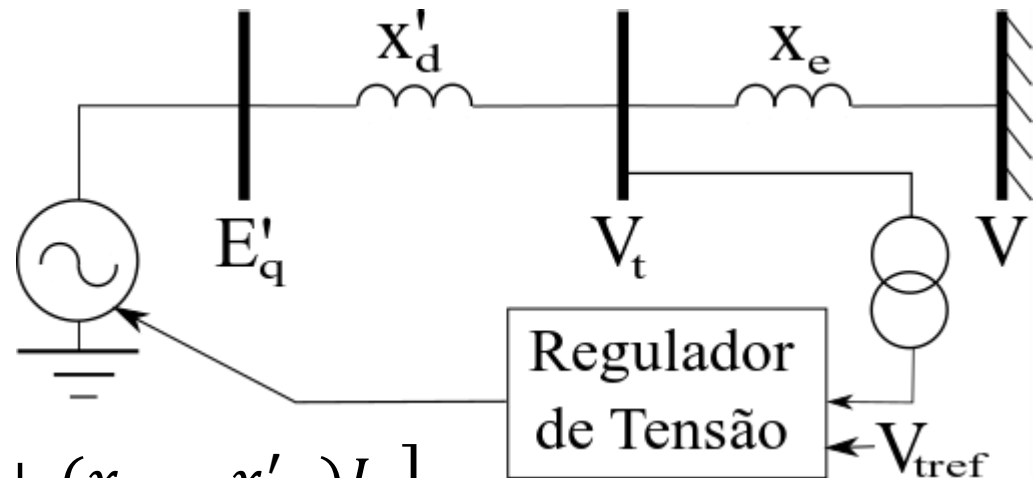
Oscilações Eletromecânicas

- Exemplo: Sistema Máquina Versus Barra Infinita (SMIB)

$$\dot{\delta} = \omega_s \omega - \omega_s$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2H} (P_m - E'_q I_q)$$

$$E'_q = \frac{1}{\tau'_{do}} [E_{FD} - E'_q + (x_d - x'_d) I_d]$$



- Considera-se, por simplicidade, um regulador de tensão de **primeira ordem**.

$$\dot{E}_{FD} = \frac{1}{T_e} [K_e (V_t - V_{tref} + V_s) - E_{FD}]$$

Oscilações Eletromecânicas

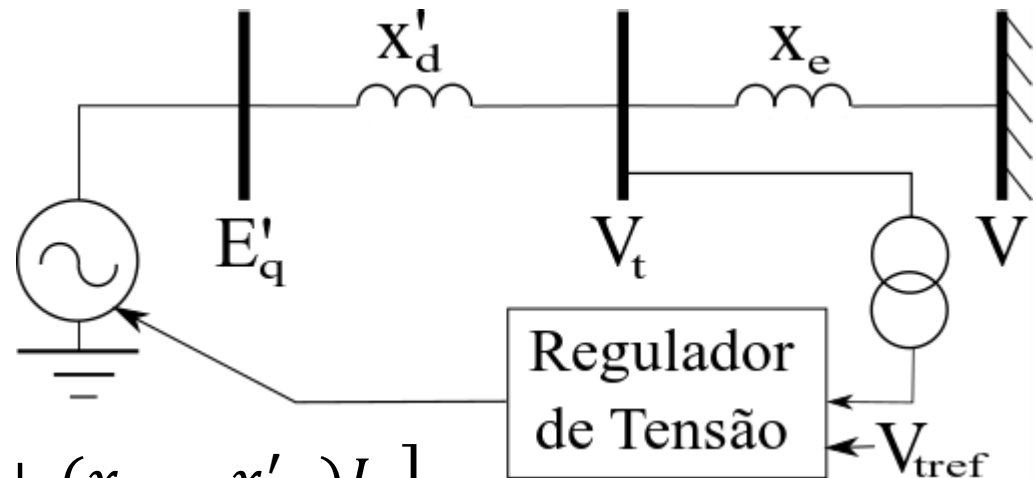
- Exemplo: Sistema Máquina Versus Barra Infinita (SMIB)

$$\dot{\delta} = \omega_s \omega - \omega_s$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2H} (P_m - E'_q I_q)$$

$$E'_q = \frac{1}{\tau'_{do}} [E_{FD} - E'_q + (x_d - x'_d) I_d]$$

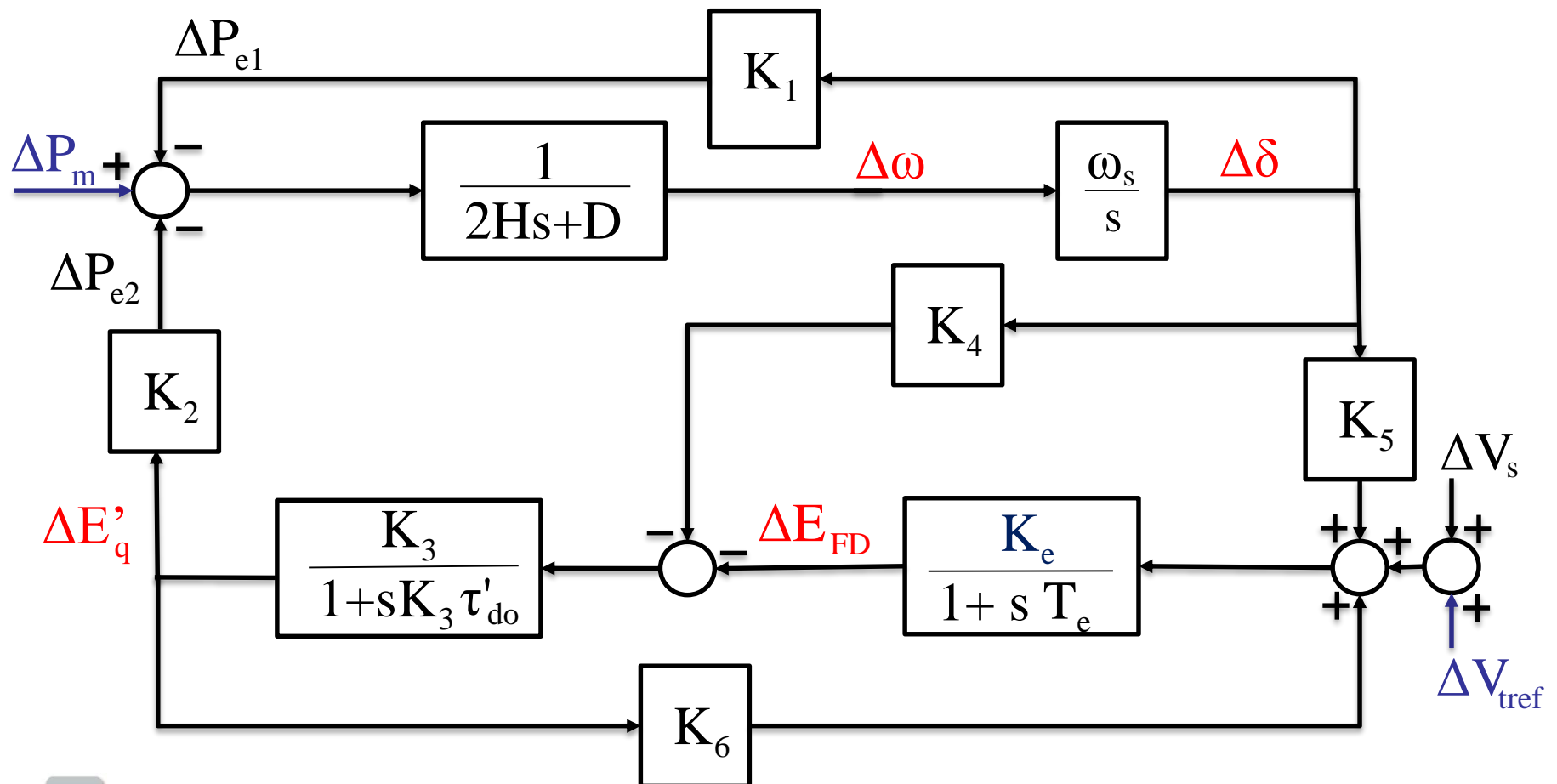
$$E_{FD} = \frac{1}{T_e} [K_e (V_t - V_{tref} + V_s) - E_{FD}]$$



- Há também restrições algébricas em I_q , I_d e V_t .

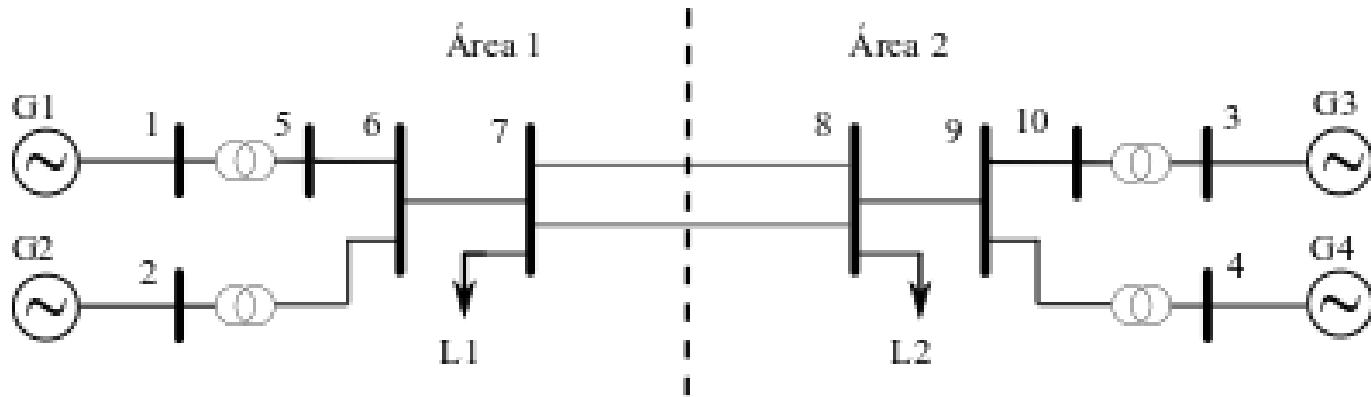
Oscilações Eletromecânicas

- Modelo **Heffron-Phillips** (linearização do modelo SMIB)



Oscilações Eletromecânicas

- Simulação: Sistema de 2 áreas (4 geradores)



- Sistema fictício utilizado para a análise de **múltiplos modos de oscilação**;
- Simulações seguintes se referem ao **gerador G1**.

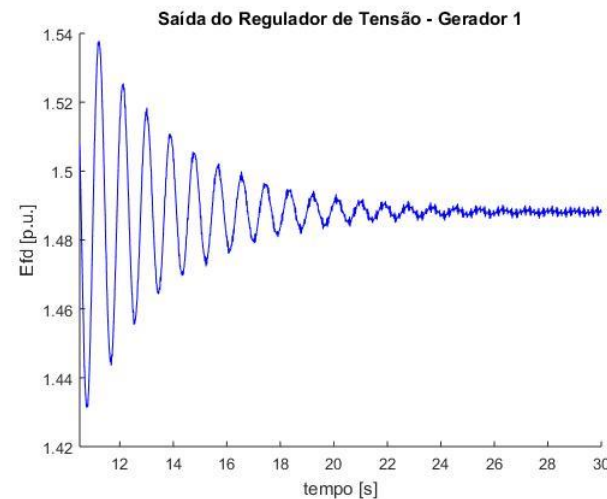
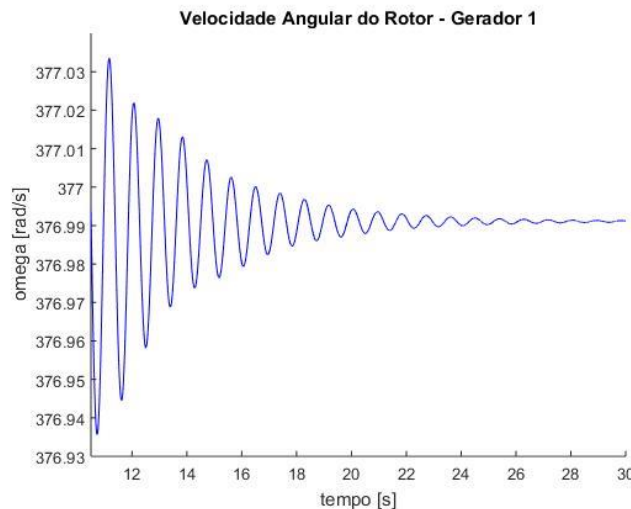
Oscilações Eletromecânicas

- Ilustração: sistema de 2 áreas com $K_{e1} = 19 \text{ p.u./p.u.}$

Resultados da análise linearizada

$$\lambda_i = \sigma_i + j\varphi_i = -0,30 + j7,43 \quad ; \quad \xi_i = \frac{-\sigma_i}{|\lambda_i|} = 0,04 \text{ (4\%)}$$

Resultados de simulação não-linear (integração numérica)



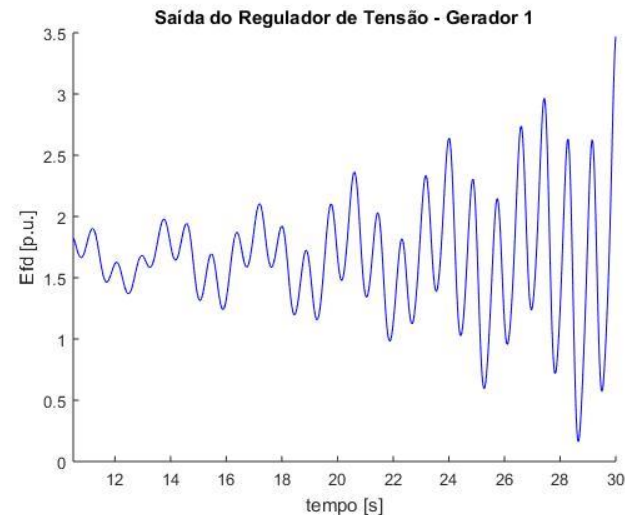
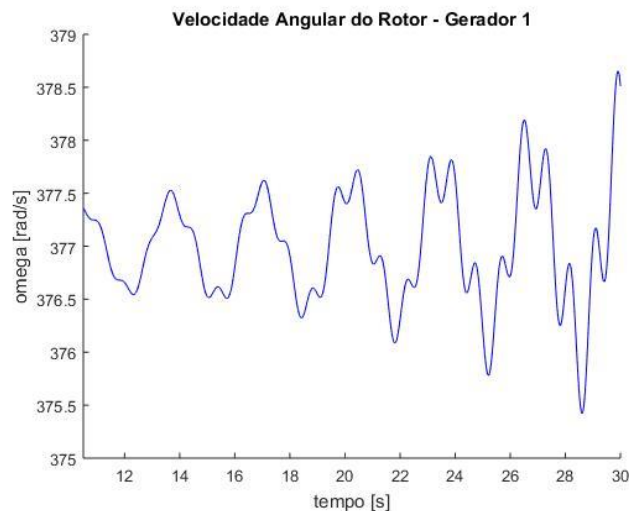
Oscilações Eletromecânicas

- Ilustração: sistema de 2 áreas com $K_{e1} = 199 \text{ p.u./p.u.}$

Resultados da análise linearizada

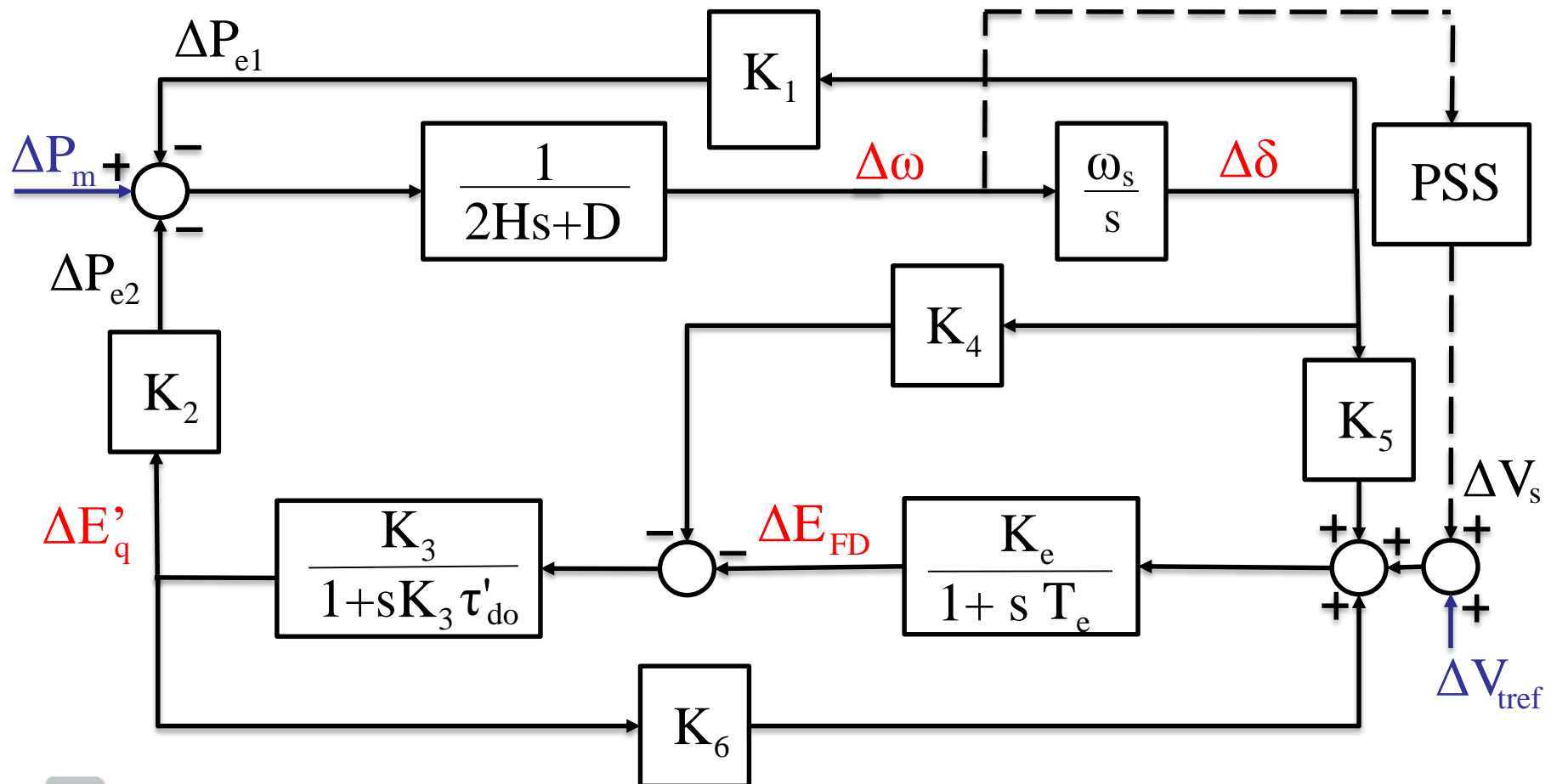
$$\lambda_i = \sigma_i + j\varphi_i = 0,12 + j7,42 \quad ; \quad \xi_i = \frac{-\sigma_i}{|\lambda_i|} = -0,02 \text{ } (-2\%)$$

Resultados de simulação não-linear (integração numérica)



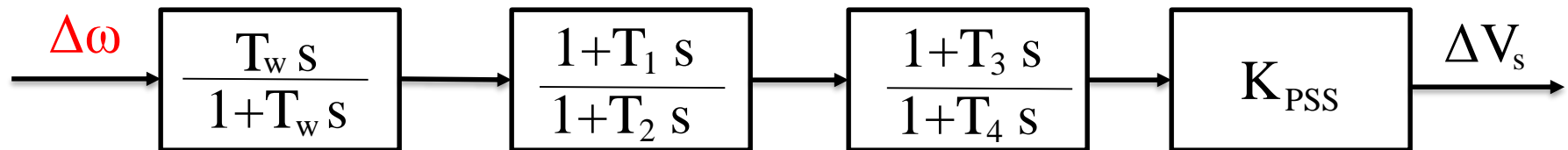
Controladores de Amortecimento

- Controlador *Power System Stabilizer* (PSS)



Controladores de Amortecimento

- Estrutura clássica de um PSS:



- Bloco washout (filtro passa-altas)
- Compensadores de fase
- Ganho estático ajustável

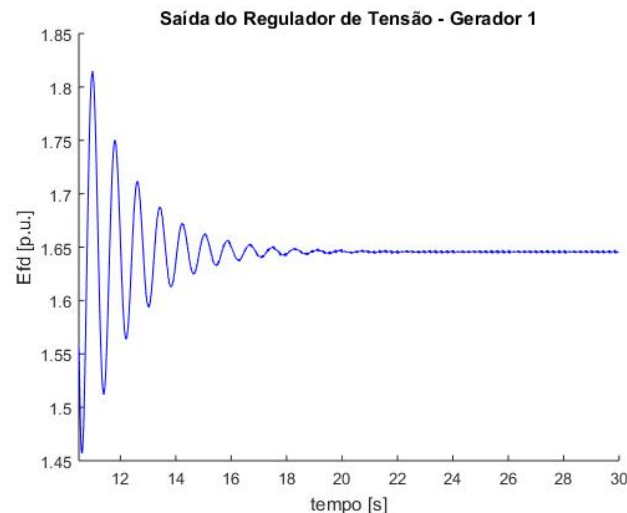
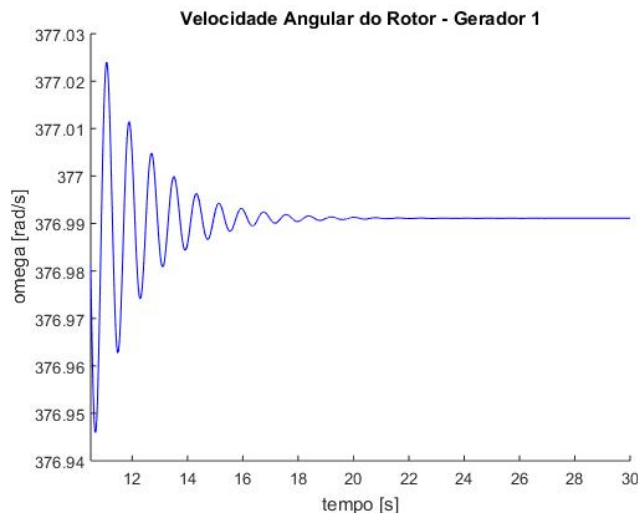
Oscilações Eletromecânicas

- Ilustração: sistema de 2 áreas com $K_{pss1} = 10 \text{ p.u./p.u.}$

Resultados da análise linearizada

$$\lambda_i = \sigma_i + j\varphi_i = -0,57 + j7,8 \quad ; \quad \xi_i = \frac{-\sigma_i}{|\lambda_i|} = 0,07 \text{ (7\%)}$$

Resultados de simulação não-linear (integração numérica)



Controladores de Amortecimento

- Desvantagens associadas ao PSS clássico:
 - Resultados garantidos apenas para um ponto nominal de operação (envolve linearização);
 - Precisa ser sintonizado para amortecer múltiplos modos de oscilação;
 - Não pode interagir de forma detrimental com outros controladores do sistema;
 - É necessária a sintonia de múltiplos parâmetros para atender os requisitos anteriores.