

Modelo de Heffron-Phillips para Máquina-Barra Infinita

Prof. Antonio Simões Costa

Grupo Sist. Potência - UFSC

Modelos de Gerador para análise do controle da excitação sobre a estabilidade a pequenas perturbações

- Os modelos de máquina previamente desenvolvidos *não são adequados* para análise dos efeitos do controle da excitação sobre a estabilidade:

Modelos de Gerador para análise do controle da excitação sobre a estabilidade a pequenas perturbações

- Os modelos de máquina previamente desenvolvidos *não são adequados* para análise dos efeitos do controle da excitação sobre a estabilidade:
- *Modelo usado em estudos de controle de velocidade:*

Modelos de Gerador para análise do controle da excitação sobre a estabilidade a pequenas perturbações

- Os modelos de máquina previamente desenvolvidos *não são adequados* para análise dos efeitos do controle da excitação sobre a estabilidade:
- *Modelo usado em estudos de controle de velocidade:*
 - não representa o enrolamento de campo do gerador \Rightarrow não é possível analisar o controle da excitação;

Modelos de Gerador para análise do controle da excitação sobre a estabilidade a pequenas perturbações

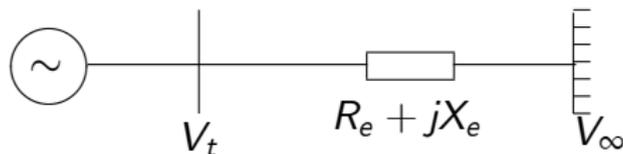
- Os modelos de máquina previamente desenvolvidos *não são adequados* para análise dos efeitos do controle da excitação sobre a estabilidade:
- *Modelo usado em estudos de controle de velocidade:*
 - não representa o enrolamento de campo do gerador \Rightarrow não é possível analisar o controle da excitação;
- *Modelo utilizado para análise e projeto da malha de controle da excitação:*

Modelos de Gerador para análise do controle da excitação sobre a estabilidade a pequenas perturbações

- Os modelos de máquina previamente desenvolvidos *não são adequados* para análise dos efeitos do controle da excitação sobre a estabilidade:
- *Modelo usado em estudos de controle de velocidade:*
 - não representa o enrolamento de campo do gerador \Rightarrow não é possível analisar o controle da excitação;
- *Modelo utilizado para análise e projeto da malha de controle da excitação:*
 - não representa a dinâmica eletromecânica do gerador \Rightarrow não se presta para análise de estabilidade do sistema de potência.

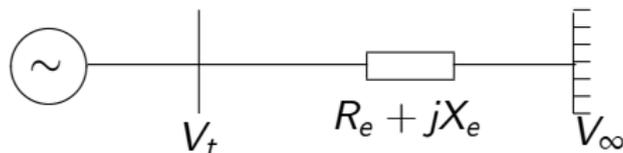
Modelo Linearizado de Heffron-Phillips

- Aplicável a estudos de estabilidade de gerador ligado a barra infinita através de impedância externa:



Modelo Linearizado de Heffron-Phillips

- Aplicável a estudos de estabilidade de gerador ligado a barra infinita através de impedância externa:



- Gerador representado por modelo de 3a. ordem, capaz de representar tanto a dinâmica eletromecânica quanto a dinâmica do campo do gerador.

Estrutura do Modelo de Heffron-Phillips (I)

- Variáveis do modelo de H-P classificadas em 3 categorias:

Estrutura do Modelo de Heffron-Phillips (I)

- Variáveis do modelo de H-P classificadas em 3 categorias:
 - Variáveis de entrada:

Estrutura do Modelo de Heffron-Phillips (I)

- Variáveis do modelo de H-P classificadas em 3 categorias:
 - Variáveis de entrada:
 - torque mecânico da turbina, T_m ;

Estrutura do Modelo de Heffron-Phillips (I)

- Variáveis do modelo de H-P classificadas em 3 categorias:
 - Variáveis de entrada:
 - torque mecânico da turbina, T_m ;
 - tensão de campo do gerador, E_{fd} .

Estrutura do Modelo de Heffron-Phillips (I)

- Variáveis do modelo de H-P classificadas em 3 categorias:
 - Variáveis de entrada:
 - torque mecânico da turbina, T_m ;
 - tensão de campo do gerador, E_{fd} .
 - Variáveis de Estado:

Estrutura do Modelo de Heffron-Phillips (I)

- Variáveis do modelo de H-P classificadas em 3 categorias:
 - Variáveis de entrada:
 - torque mecânico da turbina, T_m ;
 - tensão de campo do gerador, E_{fd} .
 - Variáveis de Estado:
 - ângulo de torque, δ ;

Estrutura do Modelo de Heffron-Phillips (I)

- Variáveis do modelo de H-P classificadas em 3 categorias:
 - Variáveis de entrada:
 - torque mecânico da turbina, T_m ;
 - tensão de campo do gerador, E_{fd} .
 - Variáveis de Estado:
 - ângulo de torque, δ ;
 - desvio de velocidade, $\omega_g = \dot{\delta}$;

Estrutura do Modelo de Heffron-Phillips (I)

- Variáveis do modelo de H-P classificadas em 3 categorias:
 - Variáveis de entrada:
 - torque mecânico da turbina, T_m ;
 - tensão de campo do gerador, E_{fd} .
 - Variáveis de Estado:
 - ângulo de torque, δ ;
 - desvio de velocidade, $\omega_g = \dot{\delta}$;
 - tensão proporcional ao fluxo ψ_d, E'_q .

Estrutura do Modelo de Heffron-Phillips (I)

- Variáveis do modelo de H-P classificadas em 3 categorias:
 - Variáveis de entrada:
 - torque mecânico da turbina, T_m ;
 - tensão de campo do gerador, E_{fd} .
 - Variáveis de Estado:
 - ângulo de torque, δ ;
 - desvio de velocidade, $\omega_g = \dot{\delta}$;
 - tensão proporcional ao fluxo ψ_d, E'_q .
 - Variáveis de Saída:

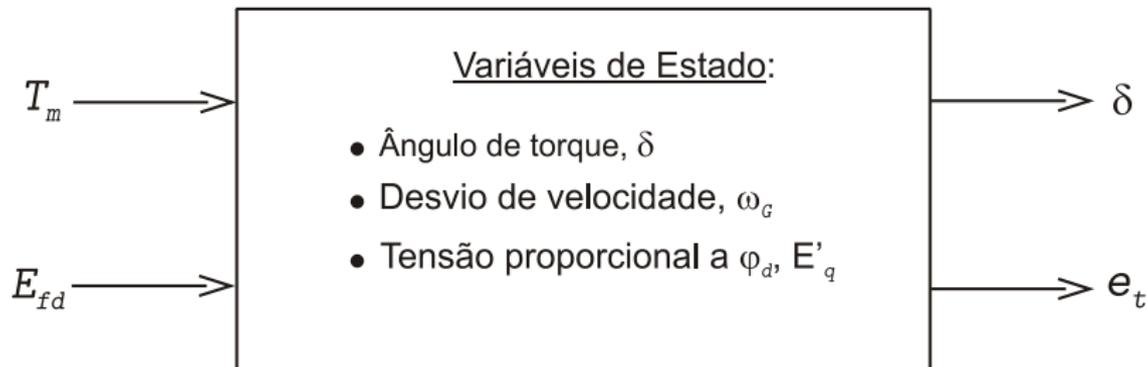
Estrutura do Modelo de Heffron-Phillips (I)

- Variáveis do modelo de H-P classificadas em 3 categorias:
 - Variáveis de entrada:
 - torque mecânico da turbina, T_m ;
 - tensão de campo do gerador, E_{fd} .
 - Variáveis de Estado:
 - ângulo de torque, δ ;
 - desvio de velocidade, $\omega_g = \dot{\delta}$;
 - tensão proporcional ao fluxo ψ_d, E'_q .
 - Variáveis de Saída:
 - ângulo de torque δ ;

Estrutura do Modelo de Heffron-Phillips (I)

- Variáveis do modelo de H-P classificadas em 3 categorias:
 - Variáveis de entrada:
 - torque mecânico da turbina, T_m ;
 - tensão de campo do gerador, E_{fd} .
 - Variáveis de Estado:
 - ângulo de torque, δ ;
 - desvio de velocidade, $\omega_g = \dot{\delta}$;
 - tensão proporcional ao fluxo ψ_d, E'_q .
 - Variáveis de Saída:
 - ângulo de torque δ ;
 - tensão terminal da máquina, e_t .

Estrutura do Modelo de Heffron-Phillips (II)



- As equações do Modelo de Heffron-Phillips são *não-lineares*, sendo:

- As equações do Modelo de Heffron-Phillips são *não-lineares*, sendo:
 - duas equações algébricas;

- As equações do Modelo de Heffron-Phillips são *não-lineares*, sendo:
 - duas equações algébricas;
 - três equações diferenciais.

- Relacionam o *torque elétrico* e a *tensão terminal* às *variáveis de estado*, tendo a forma:

$$T_e = f(\delta, E'_q)$$

$$e_t = g(\delta, E'_q)$$

onde f e g são funções não-lineares.

- As equações diferenciais compreendem:

- As equações diferenciais compreendem:
 - A equação de balanço de torques da máquina, já vista anteriormente:

$$2H \frac{d\omega_G}{dt} + D\omega_G = T_m - T_e$$

- As equações diferenciais compreendem:
 - A equação de balanço de torques da máquina, já vista anteriormente:

$$2H \frac{d\omega_G}{dt} + D\omega_G = T_m - T_e$$

- A relação entre ω_G e δ (ω_G em p.u. e δ em radianos):

$$\delta = 2\pi f^0 \times \int_0^t \omega_G(t) dt$$

- As equações diferenciais compreendem:
 - A equação de balanço de torques da máquina, já vista anteriormente:

$$2H \frac{d\omega_G}{dt} + D\omega_G = T_m - T_e$$

- A relação entre ω_G e δ (ω_G em p.u. e δ em radianos):

$$\delta = 2\pi f^0 \times \int_0^t \omega_G(t) dt$$

- A relação dinâmica entre a tensão E'_q , o efeito de reação da armadura proporcional a δ e a tensão aplicada ao campo do gerador, E_{fd} :

$$T_z \frac{dE'_q}{dt} + E'_q = h(\delta, E_{fd})$$

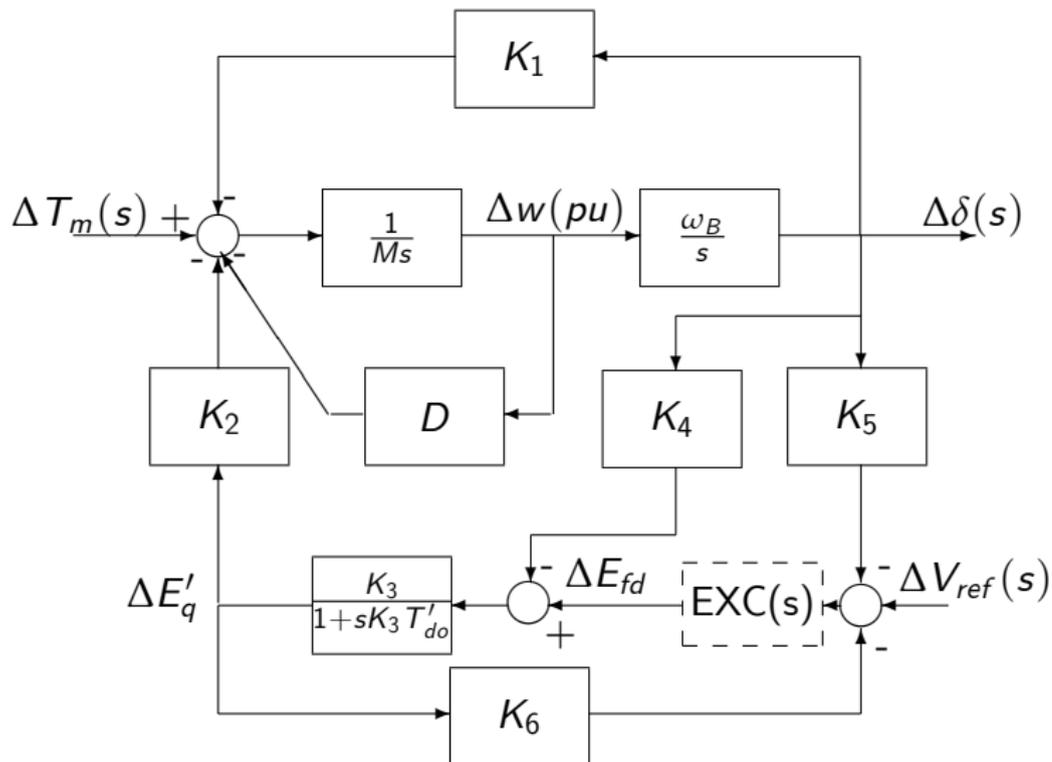
onde h é uma função não-linear.

- O modelo H - P é obtido pela linearização das cinco equações com respeito a um ponto de operação dado:

$$\begin{aligned}\Delta T_e &= K_1 \Delta\delta + K_2 \Delta E'_q \\ K_3 T'_{do} \frac{d\Delta E'_q}{dt} + \Delta E'_q &= K_3 (\Delta E_{fd} - K_4 \Delta\delta) \\ e_t &= K_5 \Delta\delta + K_6 \Delta E'_q \\ 2H \frac{d\Delta\omega_G}{dt} + D \Delta\omega_G &= \Delta T_m - \Delta T_e \\ \Delta\delta &= 2\pi f^0 \times \int_0^t \Delta\omega_G(t) dt\end{aligned}$$

onde $T_z = K_3 T'_{do}$ e K_1, \dots, K_6 são constantes que dependem do ponto de operação considerado.

Diagrama de Blocos do Modelo de Heffron-Phillips



Parâmetros do Modelo de Heffron-Phillips

$$K_1 = K_I V_\infty E_{qa}^0 [R_e \text{sen}(\delta^0 - \alpha) + (X'_d + X_e) \cos(\delta^0 - \alpha)] + K_I V_\infty E_{qa}^0 \times \\ \times \{I_q^0 (X_q - X'_d) [(X_e + X_q) \text{sen}(\delta^0 - \alpha) - R_e \cos(\delta^0 - \alpha)]\}$$

$$K_2 = K_I \{R_e E_{qa}^0 + I_q^0 [R_e^2 + (X_q + X_e)^2]\}$$

$$K_3 = [1 + K_I (X_d - X'_d) (X_q + X_e)]^{-1}$$

$$K_4 = V_\infty K_I (X_d - X'_d) [(X_q + X_e) \text{sen}(\delta^0 - \alpha) - R_e \cos(\delta^0 - \alpha)]$$

$$K_5 = \left(K_I V_\infty X'_d V_q^0 / V_t^0 \right) [R_e \cos(\delta^0 - \alpha) - (X_q + X_e) \text{sen}(\delta^0 - \alpha)] \\ - \left(K_I V_\infty X_q V_d^0 / V_t^0 \right) [(X'_d + X_e) \cos(\delta^0 - \alpha) + R_e \text{sen}(\delta^0 - \alpha)]$$

$$K_6 = (V_q^0 / V_t^0) [1 - K_I X'_d (X_q + X_e)] - (V_d^0 / V_t^0) K_I X_q R_e$$

onde

$$K_I = [R_e^2 + (X_q + X_e)(X'_d + X_e)]^{-1} \quad \alpha : \text{ângulo de fase da tensão} \\ E_{qa}^0 = E_q^0 - (X_q - X'_d) I_d^0 \quad \text{da barra infinita}$$

Parâmetros do Modelo de Heffron-Phillips com $Re = 0$

$$K_1 = \frac{X_q - X'_d}{X'_d + X_e} I_q^0 V_\infty \text{sen } \delta^0 + \frac{E_{qa}^0 V_\infty}{X_q + X_e} \text{cos } \delta^0$$

$$K_2 = \frac{V_\infty}{X'_d + X_e} \text{sen } \delta^0$$

$$K_3 = \frac{X'_d + X_e}{X_d + X_e}$$

$$K_4 = \frac{X_d - X'_d}{X'_d + X_e} V_\infty \text{sen } \delta^0$$

$$K_5 = \frac{X_q}{X_q + X_e} \frac{V_d^0}{V_t^0} V_\infty \text{cos } \delta^0 - \frac{X'_d}{X'_d + X_e} \frac{V_q^0}{V_t^0} V_\infty \text{sen } \delta^0$$

$$K_6 = \frac{X_e}{X'_d + X_e} \frac{V_q^0}{V_t^0}$$

Constante K1

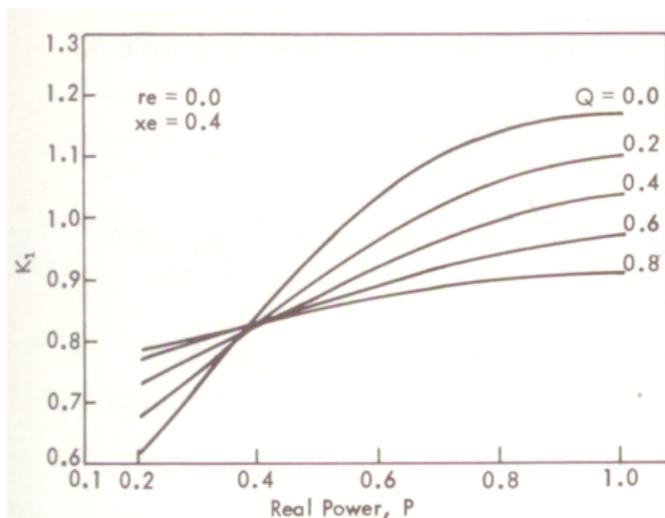
$$K_1 = \left. \frac{\partial T_e}{\partial \delta} \right|_0 = \frac{X_q - X'_d}{X'_d + X_e} I_q^0 V_\infty \sin \delta^0 + \frac{E_{qa}^0 V_\infty}{X_q + X_e} \cos \delta^0$$

- Desprezando-se a saliência transitória ($X_q \approx X'_d$), $K_1 = K_s$. Logo, K_1 é *coeficiente de torque sincronizante* do sistema;

Constante K1

$$K_1 = \left. \frac{\partial T_e}{\partial \delta} \right|_0 = \frac{X_q - X'_d}{X'_d + X_e} I_q^0 V_\infty \sin \delta^0 + \frac{E_{qa}^0 V_\infty}{X_q + X_e} \cos \delta^0$$

- Desprezando-se a saliência transitória ($X_q \approx X'_d$), $K_1 = K_s$. Logo, K_1 é *coeficiente de torque sincronizante* do sistema;
- Variação de K_1 com o carregamento do sistema:



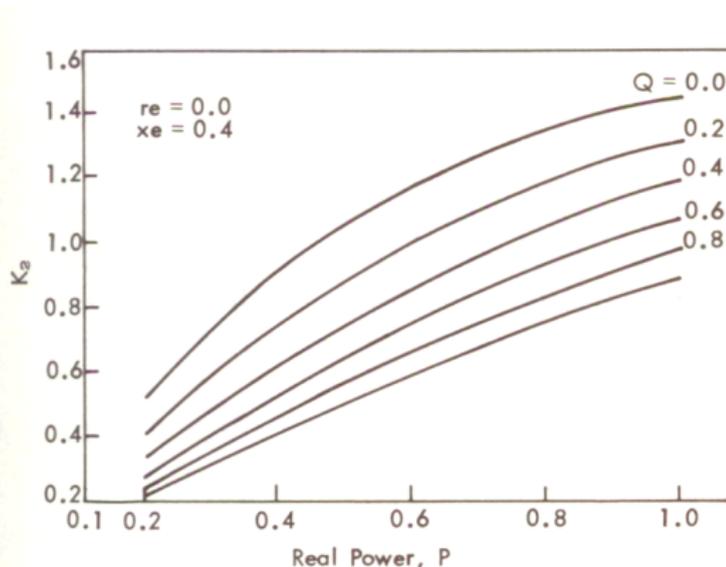
$$K_2 = \left. \frac{\partial T_e}{\partial E'_q} \right|_0 = \frac{V_\infty}{X'_d + X_e} \sin \delta^0$$

- Representa a sensibilidade de T_e a variações de fluxo no eixo- d ;

Constante K2

$$K_2 = \left. \frac{\partial T_e}{\partial E'_q} \right|_0 = \frac{V_\infty}{X'_d + X_e} \sin \delta^0$$

- Representa a sensibilidade de T_e a variações de fluxo no eixo- d ;
- Variação de K_2 com o carregamento do sistema:



$$K_3 = \frac{X'_d + X_e}{X_d + X_e}$$

- K_3 depende apenas de impedâncias da máquina e do sistema de transmissão;
- É a única constante cujo valor não varia com as condições de operação.

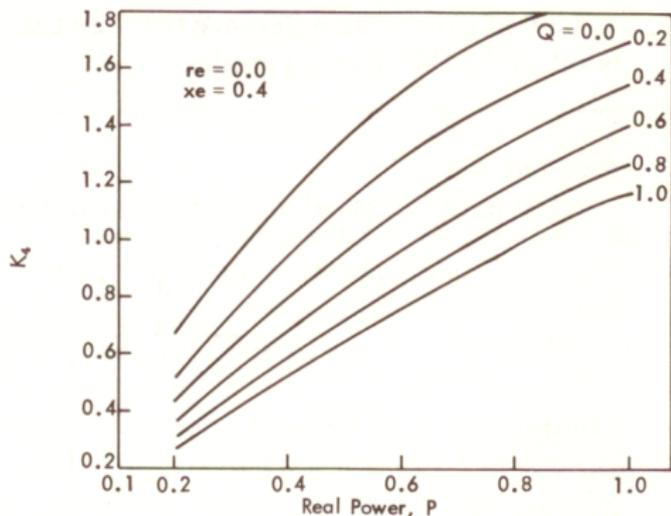
$$K_4 = -\frac{1}{K_3} \times \left. \frac{\partial E'_q}{\partial \delta} \right|_0 = \frac{X_d - X'_d}{X'_d + X_e} V_\infty \sin \delta^0$$

- Representa o efeito *desmagnetizante* da reação da armadura sobre o fluxo no eixo-*d*;

Constante K_4

$$K_4 = -\frac{1}{K_3} \times \left. \frac{\partial E'_q}{\partial \delta} \right|_0 = \frac{X_d - X'_d}{X'_d + X_e} V_\infty \sin \delta^0$$

- Representa o efeito *desmagnetizante* da reação da armadura sobre o fluxo no eixo- d ;
- Variação de K_4 com o carregamento do sistema:



$$K_5 = \left. \frac{\partial e_t}{\partial \delta} \right|_0 = \frac{X_q}{X_q + X_e} \frac{V_d^0}{V_t^0} V_\infty \cos \delta^0 - \frac{X'_d}{X'_d + X_e} \frac{V_q^0}{V_t^0} V_\infty \sin \delta^0$$

- Representa a sensibilidade de e_t a variações de carregamento;

Constante K5

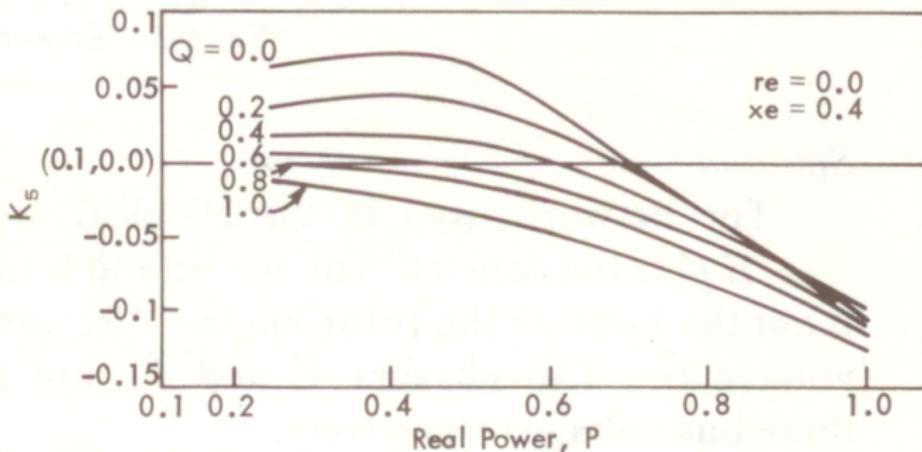
$$K_5 = \left. \frac{\partial e_t}{\partial \delta} \right|_0 = \frac{X_q}{X_q + X_e} \frac{V_d^0}{V_t^0} V_\infty \cos \delta^0 - \frac{X'_d}{X'_d + X_e} \frac{V_q^0}{V_t^0} V_\infty \sin \delta^0$$

- Representa a sensibilidade de e_t a variações de carregamento;
- K_5 troca de sinal para carga pesada (e x_e alta);

Constante K5

$$K_5 = \left. \frac{\partial e_t}{\partial \delta} \right|_0 = \frac{X_q}{X_q + X_e} \frac{V_d^0}{V_t^0} V_\infty \cos \delta^0 - \frac{X'_d}{X'_d + X_e} \frac{V_q^0}{V_t^0} V_\infty \sin \delta^0$$

- Representa a sensibilidade de e_t a variações de carregamento;
- K_5 troca de sinal para carga pesada (e x_e alta);
- Variação de K_5 com o carregamento do sistema:



$$K_6 = \left. \frac{\partial e_t}{\partial E'_q} \right|_0 = \frac{X_e}{X'_d + X_e} \frac{V_q^0}{V_t^0}$$

- Representa o efeito (preponderante) das variações de fluxo sobre a tensão terminal;

Constante K6

$$K_6 = \left. \frac{\partial e_t}{\partial E'_q} \right|_0 = \frac{X_e}{X'_d + X_e} \frac{V_q^0}{V_t^0}$$

- Representa o efeito (preponderante) das variações de fluxo sobre a tensão terminal;
- Variação de K_6 com o carregamento do sistema:

