

# Conversão Eletromecânica de Energia II

**Prof. Victor Aguiar**

Módulo III – Geradores Síncronos

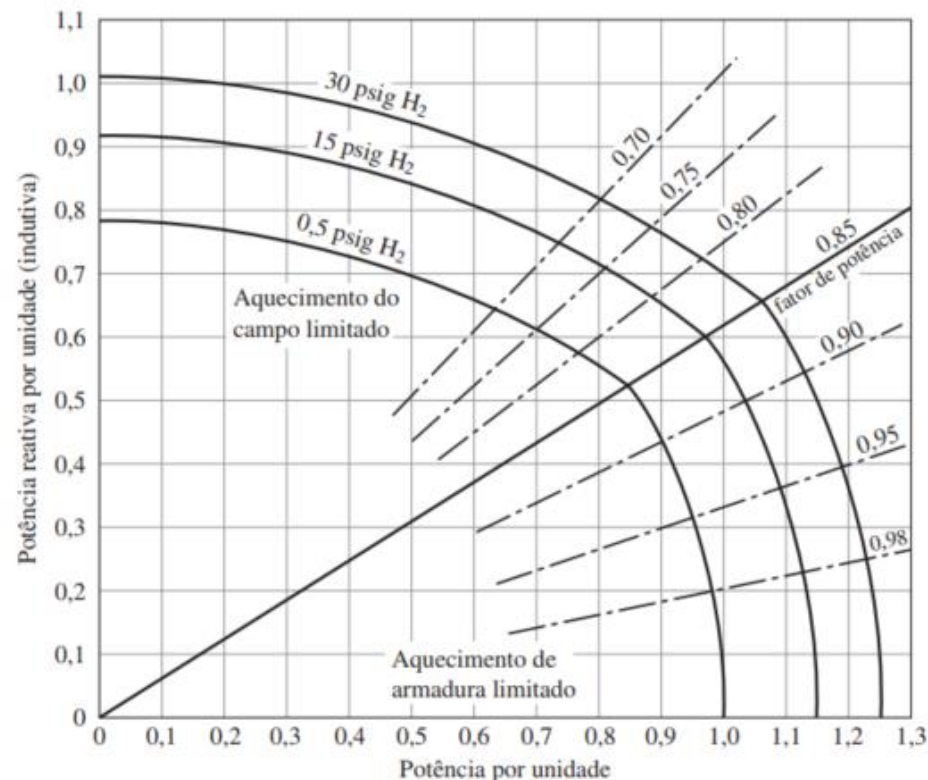
Parte 3



# Especificações Nominais

## ■ Curvas de capacidade reais

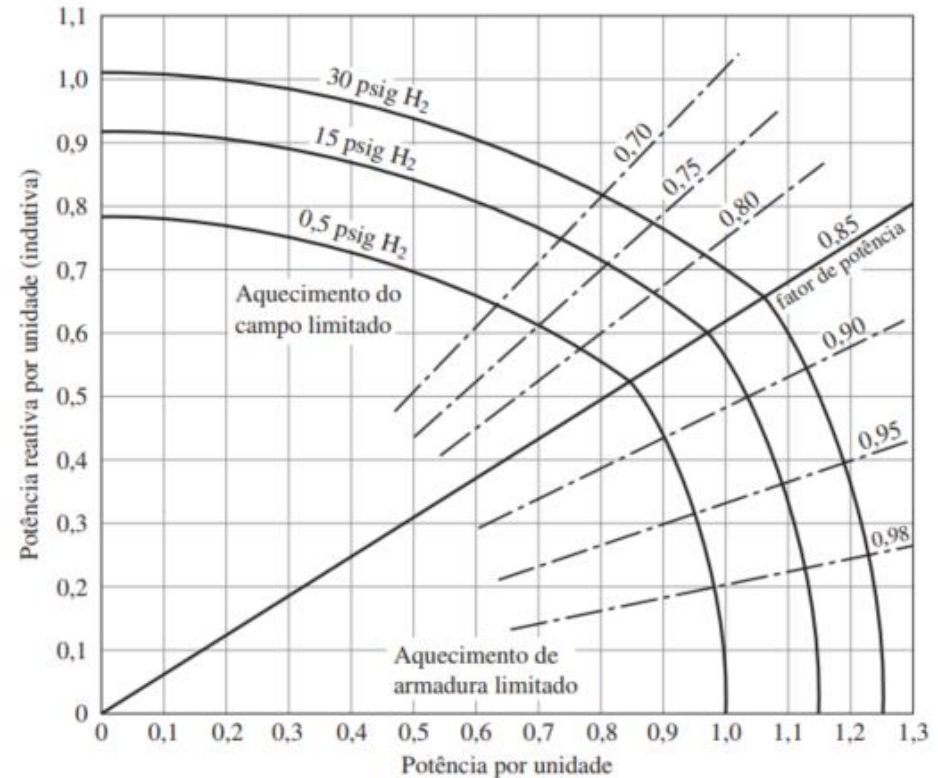
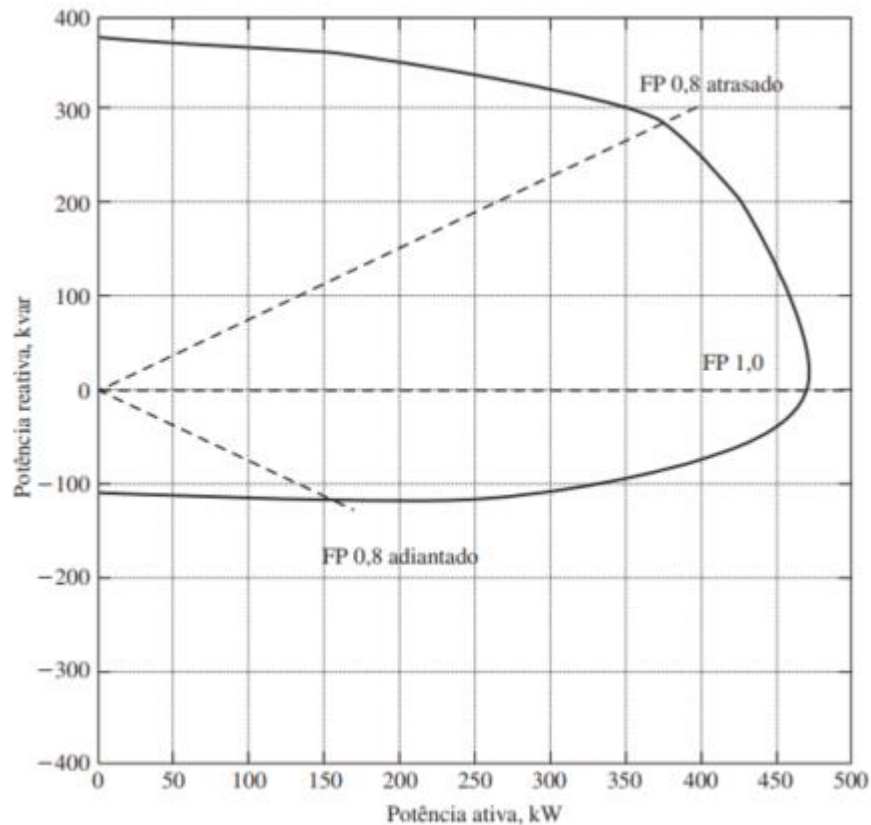
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.



# Especificações Nominais

## ■ Curvas de capacidade reais

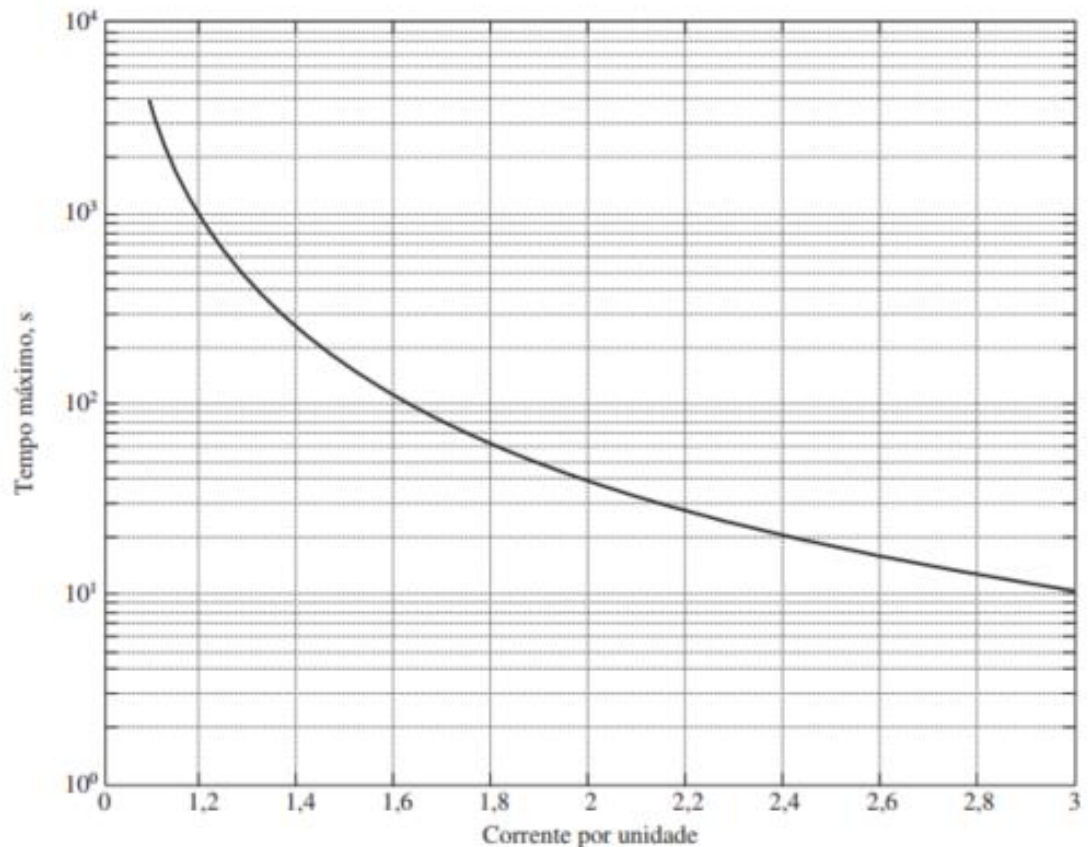
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

# Especificações Nominais

- Operação de curta duração e fator de serviço
  - Curva de dano térmico de uma máquina síncrona:

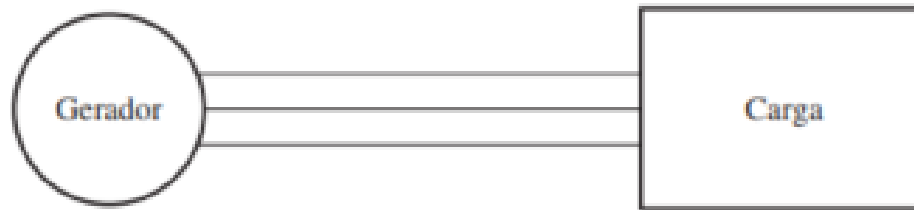


É assumido que os enrolamentos já estão na temperatura de operação quando a sobrecarga é aplicada

Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

# Gerador Síncrono Operando Isolado

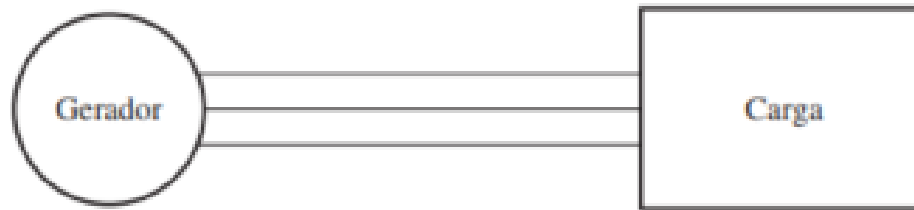
## ■ Operação básica



- ❑ Assume-se que a velocidade síncrona do rotor é invariante
  - Resistência de armadura é desprezível

# Gerador Síncrono Operando Isolado

## ■ Operação básica



- ❑ Assume-se que a velocidade síncrona do rotor é invariante
  - Resistência de armadura é desprezível
- ❑ O que é incremento de carga?
  - É um aumento de potência ativa e/ou reativa solicitada ao gerador
    - ❑ Implica no aumento direto da corrente de armadura

# Gerador Síncrono Operando Isolado

- Operação básica

- Tensão induzida:

- Não varia, pois não há variação de velocidade e frequência
    - Não há variação no fluxo da máquina

# Gerador Síncrono Operando Isolado

## ■ Operação básica

### □ Tensão induzida:

- Não varia, pois não há variação de velocidade e frequência
- Não há variação no fluxo da máquina

### □ Onde estarão os impactos do aumento na carga?

- Analisar os impactos mantendo-se constante o fator de potência



# Gerador Síncrono Operando Isolado

## ■ Operação básica

### □ Tensão induzida:

- Não varia, pois não há variação de velocidade e frequência
- Não há variação no fluxo da máquina

### □ Onde estarão os impactos do aumento na carga?

- Analisar os impactos mantendo-se constante o fator de potência

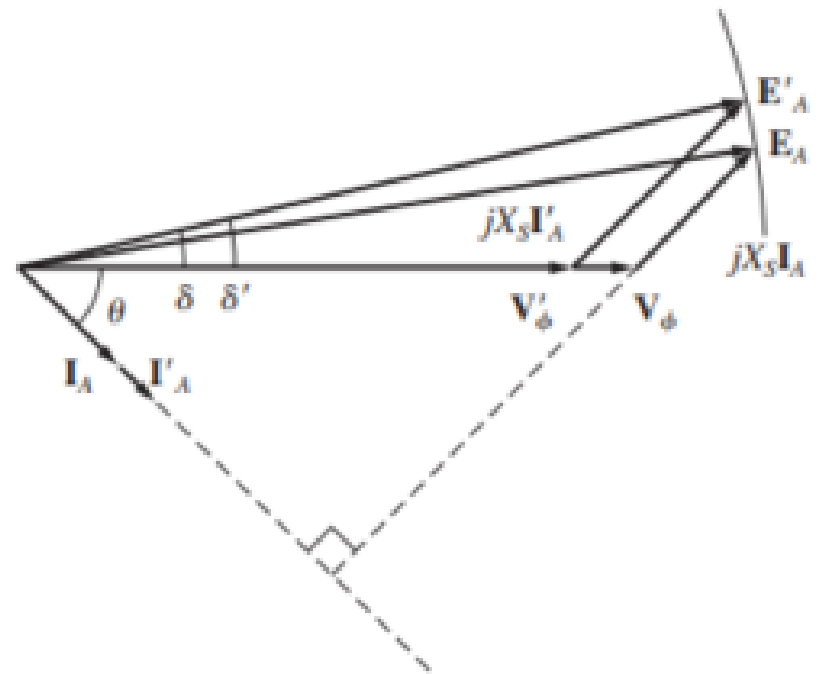
$$\hat{E}_a (cte.) = \hat{V}_t (?) + jX_s \hat{I}_a (\uparrow)$$

# Gerador Síncrono Operando Isolado

## ■ Operação básica

- Onde estarão os impactos do aumento na carga?
  - Analisar os impactos mantendo-se constante o fator de potência

Fator de potência indutivo:



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

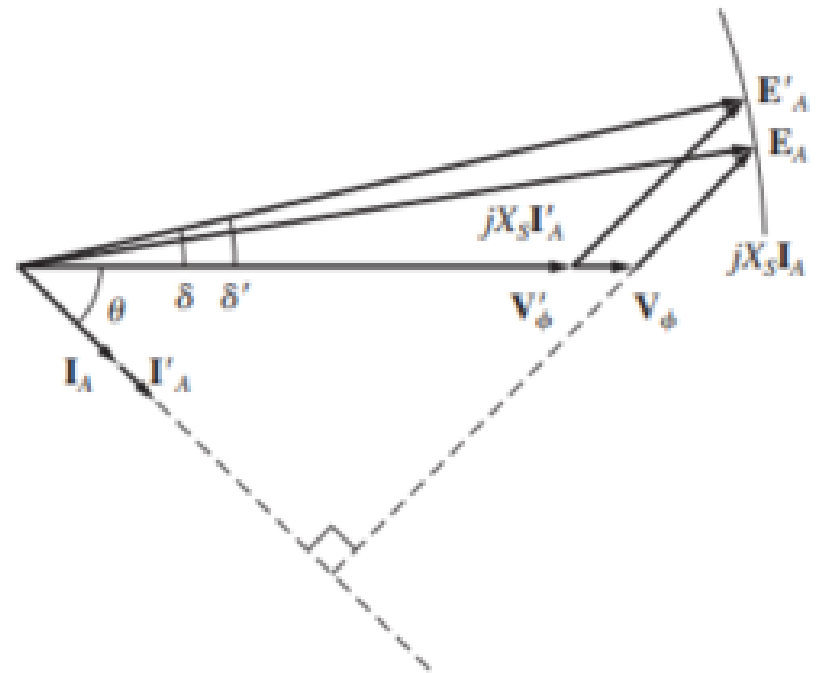
# Gerador Síncrono Operando Isolado

## ■ Operação básica

- Onde estarão os impactos do aumento na carga?
  - Analisar os impactos mantendo-se constante o fator de potência

Fator de potência indutivo:

Redução na tensão terminal.



# Gerador Síncrono Operando Isolado

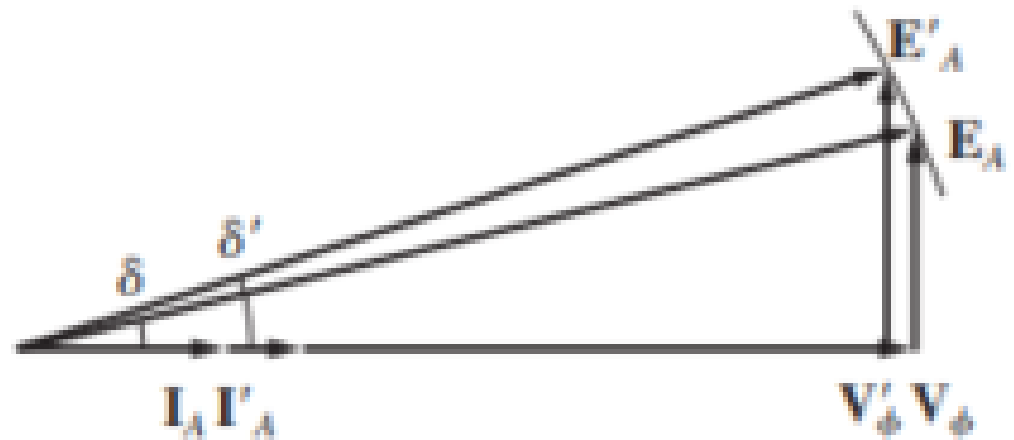
## ■ Operação básica

- Onde estarão os impactos do aumento na carga?
  - Analisar os impactos mantendo-se constante o fator de potência

Fator de potência indutivo:

Redução na tensão terminal.

Fator de potência unitário:



# Gerador Síncrono Operando Isolado

## ■ Operação básica

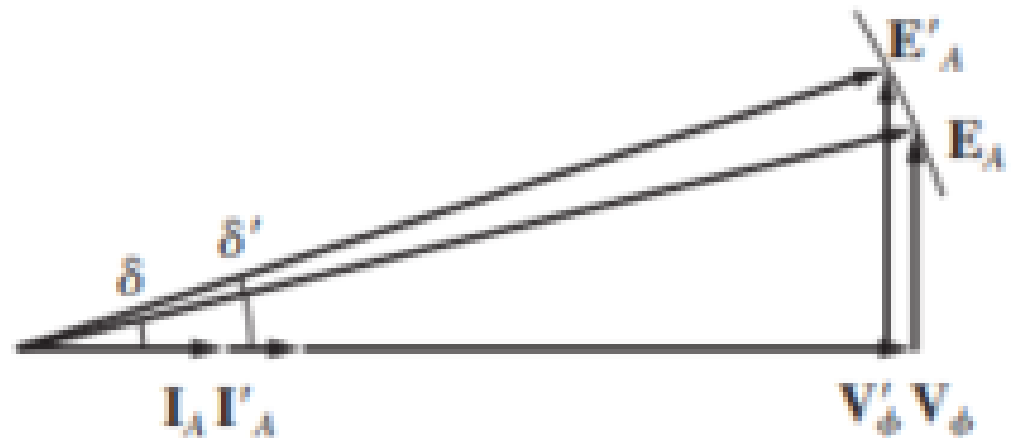
- Onde estarão os impactos do aumento na carga?
  - Analisar os impactos mantendo-se constante o fator de potência

Fator de potência indutivo:

Redução na tensão terminal.

Fator de potência unitário:

Redução na tensão terminal.



# Gerador Síncrono Operando Isolado

## ■ Operação básica

- Onde estarão os impactos do aumento na carga?
  - Analisar os impactos mantendo-se constante o fator de potência

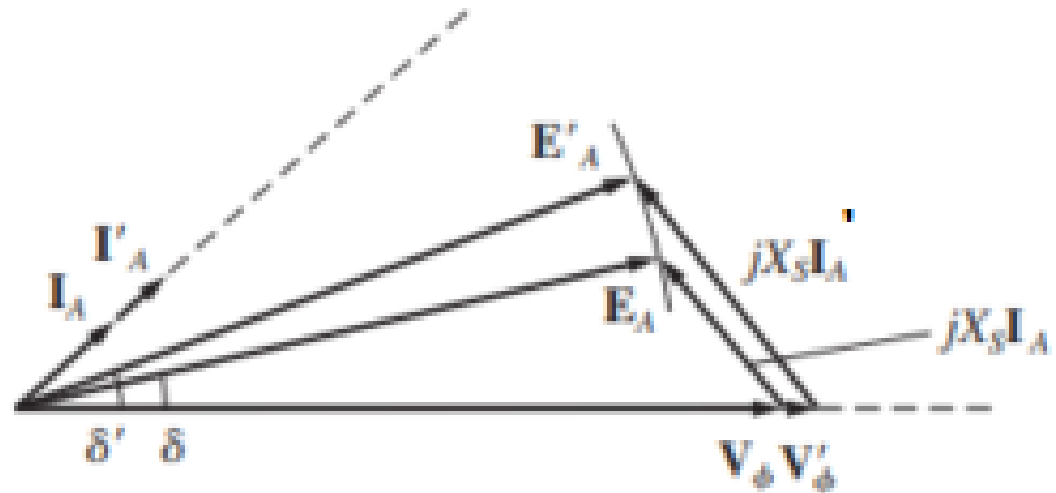
Fator de potência indutivo:

Redução na tensão terminal.

Fator de potência unitário:

Redução na tensão terminal.

Fator de potência capacitivo:



# Gerador Síncrono Operando Isolado

## ■ Operação básica

- Onde estarão os impactos do aumento na carga?
  - Analisar os impactos mantendo-se constante o fator de potência

Fator de potência indutivo:

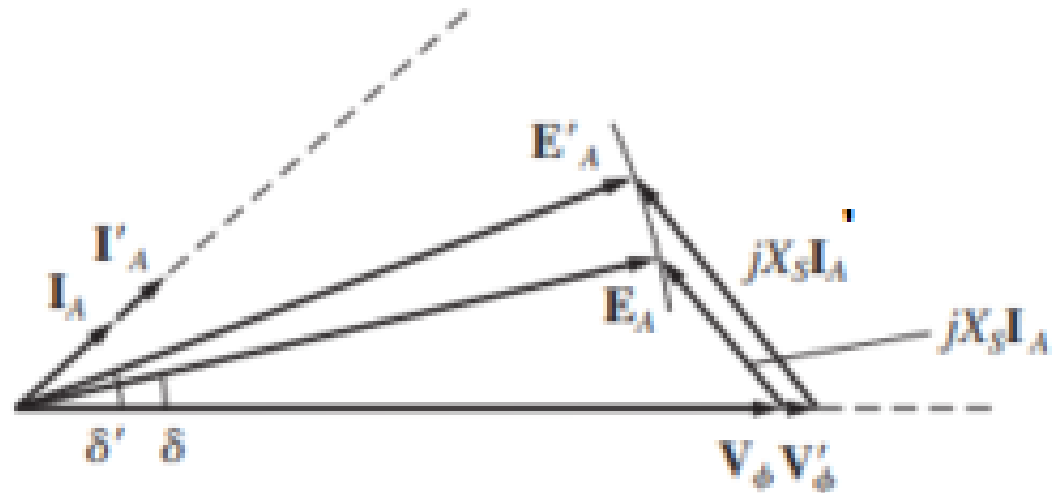
Redução na tensão terminal.

Fator de potência unitário:

Redução na tensão terminal.

Fator de potência capacitivo:

**Aumento na tensão terminal.**



# Gerador Síncrono Operando Isolado

## ■ Primeiro problema

- Como a corrente de campo de um gerador deve ser ajustada para manter a tensão terminal constante quando a carga muda?



# Gerador Síncrono Operando Isolado

## ■ Primeiro problema

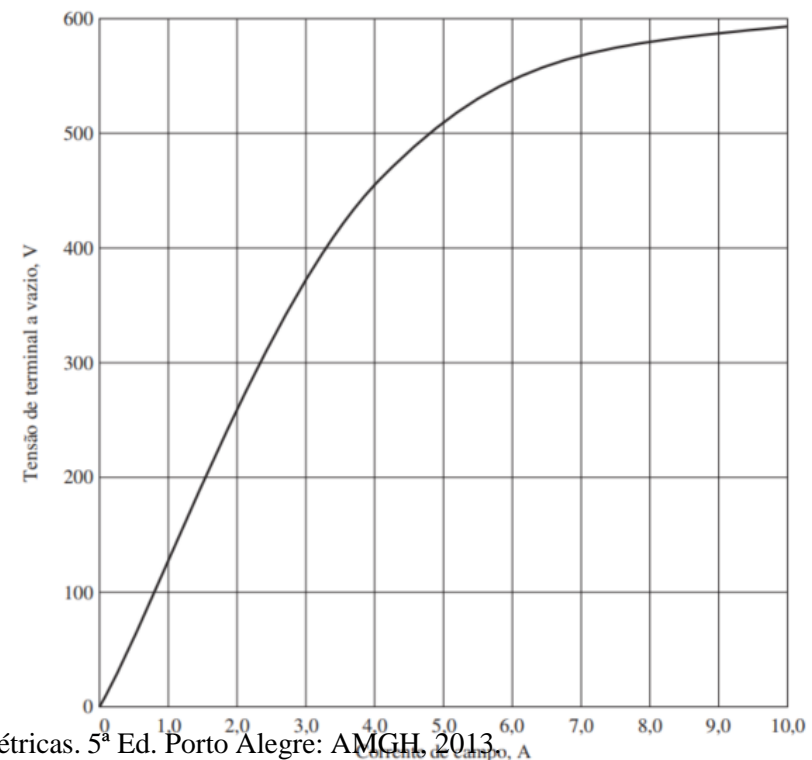
- ❑ Como a corrente de campo de um gerador deve ser ajustada para manter a tensão terminal constante quando a carga muda?

## ■ Segundo problema

- ❑ Se a carga variar e o campo for deixado livre, o que acontece com a tensão de terminal?

# Exemplo 5

Um gerador síncrono de 480 V, 60 Hz, ligado em  $\Delta$  e de quatro polos tem a cav mostrada na Figura. Esse gerador tem uma reatância síncrona de  $0,1 \, \Omega$  e uma resistência de armadura de  $0,015 \, \Omega$ . A plena carga, a máquina fornece 1200 A com FP 0,8 atrasado. Em condições de plena carga, as perdas por atrito e ventilação são 40 kW e as perdas no núcleo são 30 kW. Ignore as perdas no circuito de campo. (a) qual a velocidade de rotação desse gerador?



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

## Exemplo 5

Um gerador síncrono de 480 V, 60 Hz, ligado em  $\Delta$  e de quatro polos tem a cav mostrada na Figura. Esse gerador tem uma reatância síncrona de  $0,1 \, \Omega$  e uma resistência de armadura de  $0,015 \, \Omega$ . A plena carga, a máquina fornece 1200 A com FP 0,8 atrasado. Em condições de plena carga, as perdas por atrito e ventilação são 40 kW e as perdas no núcleo são 30 kW. Ignore as perdas no circuito de campo. (a) qual a velocidade de rotação desse gerador?

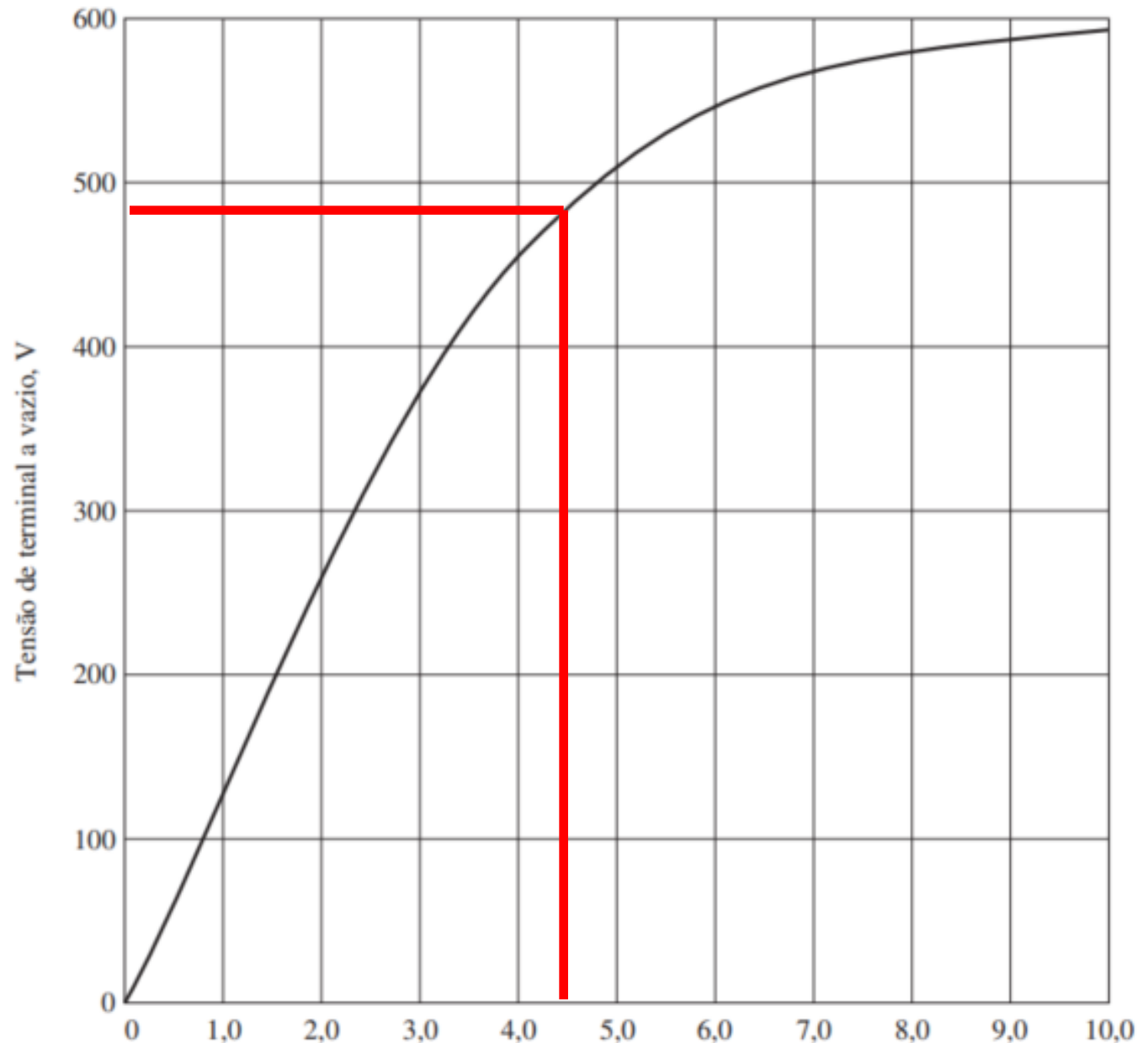
$$f = \frac{n \cdot P}{120} \rightarrow n = \frac{120 \cdot 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

## Exemplo 5

Um gerador síncrono de 480 V, 60 Hz, ligado em  $\Delta$  e de quatro polos tem a cav mostrada na Figura. Esse gerador tem uma reatância síncrona de  $0,1 \, \Omega$  e uma resistência de armadura de  $0,015 \, \Omega$ . A plena carga, a máquina fornece 1200 A com FP 0,8 atrasado. Em condições de plena carga, as perdas por atrito e ventilação são 40 kW e as perdas no núcleo são 30 kW. Ignore as perdas no circuito de campo. (b) Quanta corrente de campo deve ser fornecida ao gerador para que a tensão terminal seja de 480 V a vazio?

# Exemp

Um gerador sínc  
mostrada na Fig  
resistência de ar  
FP 0,8 atrasado  
são 40 kW e as  
campo. (b) Quar  
tensão terminal s



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

## Exemplo 5

Um gerador síncrono de 480 V, 60 Hz, ligado em  $\Delta$  e de quatro polos tem a cav mostrada na Figura. Esse gerador tem uma reatância síncrona de  $0,1 \, \Omega$  e uma resistência de armadura de  $0,015 \, \Omega$ . A plena carga, a máquina fornece 1200 A com FP 0,8 atrasado. Em condições de plena carga, as perdas por atrito e ventilação são 40 kW e as perdas no núcleo são 30 kW. Ignore as perdas no circuito de campo. (b) Quanta corrente de campo deve ser fornecida ao gerador para que a tensão terminal seja de 480 V a vazio?

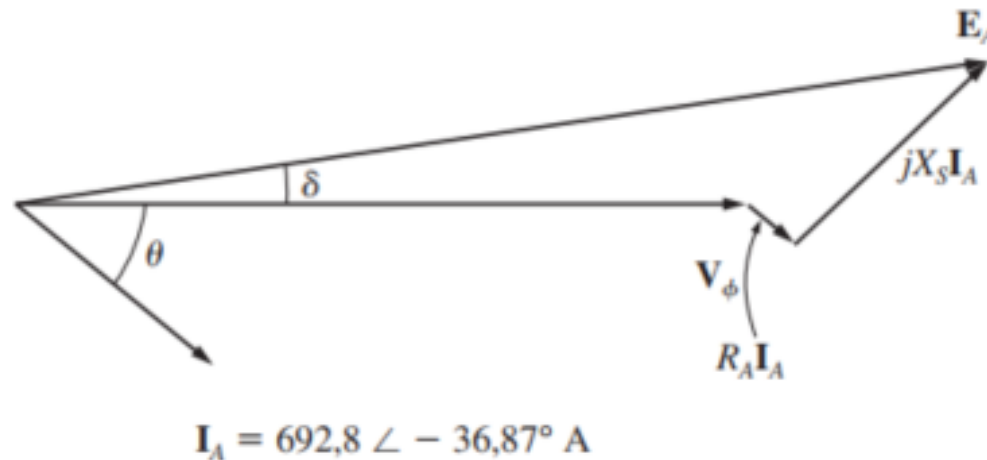
$$E_{af} = V_t = 480 \, \text{V} \rightarrow I_f = 4,5 \, \text{A}$$

## Exemplo 5

Um gerador síncrono de 480 V, 60 Hz, ligado em  $\Delta$  e de quatro polos tem a cav mostrada na Figura. Esse gerador tem uma reatância síncrona de  $0,1 \, \Omega$  e uma resistência de armadura de  $0,015 \, \Omega$ . A plena carga, a máquina fornece 1200 A com FP 0,8 atrasado. Em condições de plena carga, as perdas por atrito e ventilação são 40 kW e as perdas no núcleo são 30 kW. Ignore as perdas no circuito de campo. (c) Se o gerador for ligado a uma carga que solicita 1200 A com FP 0,8 atrasado, quanta corrente de campo será necessária para manter a tensão terminal em 480 V?

# Exemplo 5

Um gerador síncrono de 480 V, 60 Hz, ligado em  $\Delta$  e de quatro polos tem a cav mostrada na Figura. Esse gerador tem uma reatância síncrona de  $0,1 \, \Omega$  e uma resistência de armadura de  $0,015 \, \Omega$ . A plena carga, a máquina fornece 1200 A com FP 0,8 atrasado. Em condições de plena carga, as perdas por atrito e ventilação são 40 kW e as perdas no núcleo são 30 kW. Ignore as perdas no circuito de campo. (c) Se o gerador for ligado a uma carga que solicita 1200 A com FP 0,8 atrasado, quanta corrente de campo será necessária para manter a tensão terminal em 480 V?





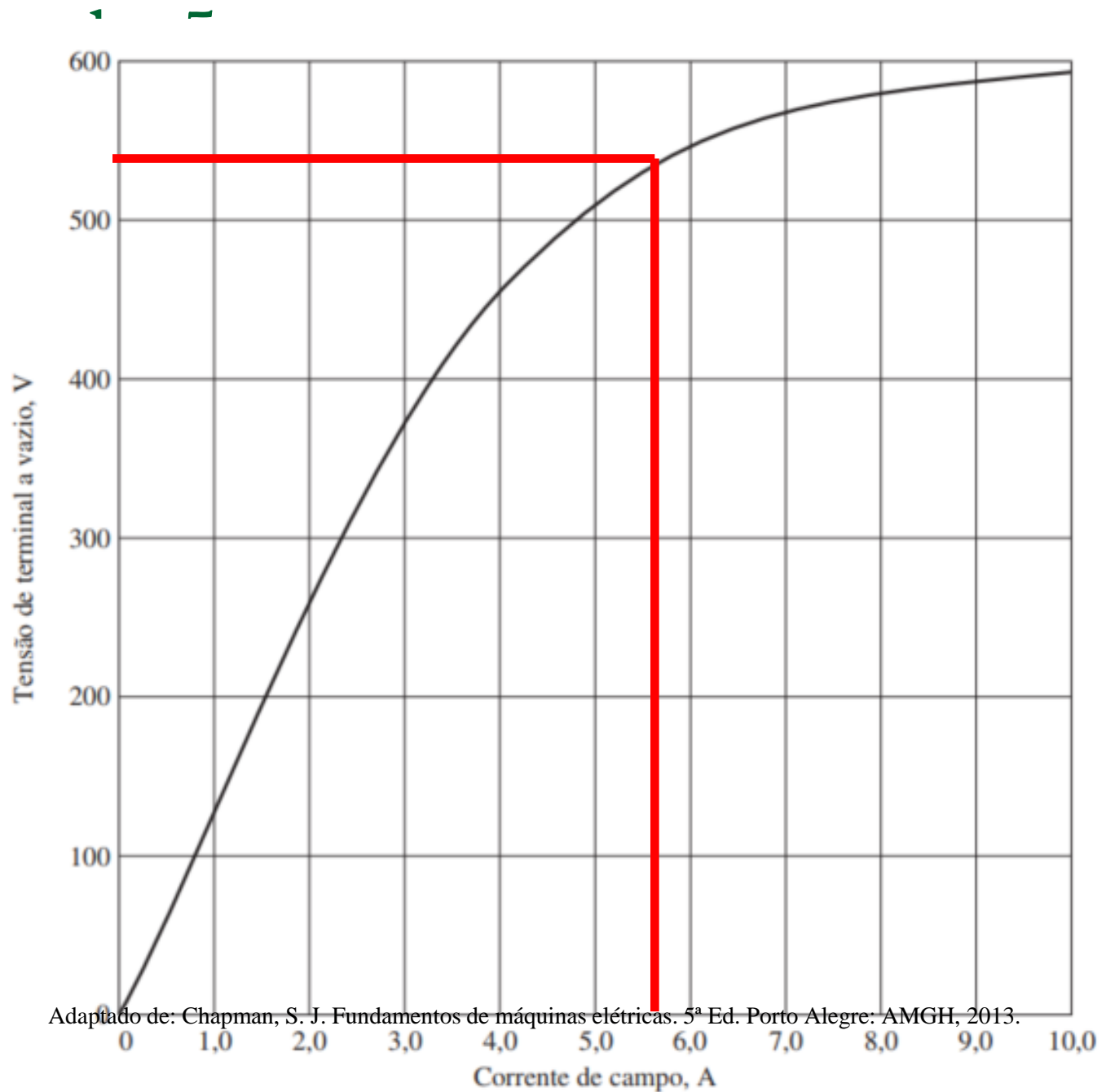
## Exemplo 5

Um gerador síncrono de 480 V, 60 Hz, ligado em  $\Delta$  e de quatro polos tem a cav mostrada na Figura. Esse gerador tem uma reatância síncrona de  $0,1 \, \Omega$  e uma resistência de armadura de  $0,015 \, \Omega$ . A plena carga, a máquina fornece 1200 A com FP 0,8 atrasado. Em condições de plena carga, as perdas por atrito e ventilação são 40 kW e as perdas no núcleo são 30 kW. Ignore as perdas no circuito de campo. (c) Se o gerador for ligado a uma carga que solicita 1200 A com FP 0,8 atrasado, quanta corrente de campo será necessária para manter a tensão terminal em 480 V?

$$\begin{aligned}\hat{E}_{af} &= \hat{V}_t + R_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a \\ &= 480 + (0,015 + j0,1) \frac{1200}{\sqrt{3}} \angle -\arccos(0,8) \\ &= 480 + 0,101119 \angle 81,47 \left( 692,82 \angle -36,87 \right) \\ &= 480 + 70,06 \angle 44,6 = 529,88 + j49,19 \\ &= 532,16 \angle 5,3\end{aligned}$$

# Exo

Um gerador  
mostrada  
resistênc  
FP 0,8 e  
são 40  
campo.  
atrasado  
em 480°



a cav  
e uma  
A com  
tilação  
ito de  
FP 0,8  
terminal

Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

## Exemplo 5

Um gerador síncrono de 480 V, 60 Hz, ligado em  $\Delta$  e de quatro polos tem a cav mostrada na Figura. Esse gerador tem uma reatância síncrona de  $0,1 \, \Omega$  e uma resistência de armadura de  $0,015 \, \Omega$ . A plena carga, a máquina fornece 1200 A com FP 0,8 atrasado. Em condições de plena carga, as perdas por atrito e ventilação são 40 kW e as perdas no núcleo são 30 kW. Ignore as perdas no circuito de campo. (c) Se o gerador for ligado a uma carga que solicita 1200 A com FP 0,8 atrasado, quanta corrente de campo será necessária para manter a tensão terminal em 480 V?

$$E_{af} = 532,16 \rightarrow I_f = 5,7 \text{ A}$$

## Exemplo 5

Um gerador síncrono de 480 V, 60 Hz, ligado em  $\Delta$  e de quatro polos tem a cav mostrada na Figura. Esse gerador tem uma reatância síncrona de  $0,1 \, \Omega$  e uma resistência de armadura de  $0,015 \, \Omega$ . A plena carga, a máquina fornece 1200 A com FP 0,8 atrasado. Em condições de plena carga, as perdas por atrito e ventilação são 40 kW e as perdas no núcleo são 30 kW. Ignore as perdas no circuito de campo. (d) Quanta potência o gerador está fornecendo agora? Quanta potência é fornecida ao gerador pela máquina primária? Qual é a eficiência total dessa máquina?

## Exemplo 5

Um gerador síncrono de 480 V, 60 Hz, ligado em  $\Delta$  e de quatro polos tem a cav mostrada na Figura. Esse gerador tem uma reatância síncrona de  $0,1 \, \Omega$  e uma resistência de armadura de  $0,015 \, \Omega$ . A plena carga, a máquina fornece 1200 A com FP 0,8 atrasado. Em condições de plena carga, as perdas por atrito e ventilação são 40 kW e as perdas no núcleo são 30 kW. Ignore as perdas no circuito de campo. (d) Quanta potência o gerador está fornecendo agora? Quanta potência é fornecida ao gerador pela máquina primária? Qual é a eficiência total dessa máquina?

$$P_{saida} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta = \sqrt{3} \cdot 480 \cdot 1200 \cdot 0,8$$

$$P_{saida} = 798,13 \text{ kW}$$

$$P_{entrada} = P_{saida} + P_{elé} + P_{fe} + P_{AV} + P_{sup}$$

$$P_{entrada} = 798,13 + 3 \cdot 692,8^2 0,015 + 30 + 40 + 0 = 889,6 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{798,13}{889,6} = 89,75\%$$

# Exemplo 5

Um gerador síncrono de 480 V, 60 Hz, ligado em  $\Delta$  e de quatro polos tem a cav mostrada na Figura. Esse gerador tem uma reatância síncrona de  $0,1 \, \Omega$  e uma resistência de armadura de  $0,015 \, \Omega$ . A plena carga, a máquina fornece 1200 A com FP 0,8 atrasado. Em condições de plena carga, as perdas por atrito e ventilação são 40 kW e as perdas no núcleo são 30 kW. Ignore as perdas no circuito de campo. (e) Se a carga do gerador for repentinamente desligada da linha, que acontecerá a sua tensão terminal?

## Exemplo 5

Um gerador síncrono de 480 V, 60 Hz, ligado em  $\Delta$  e de quatro polos tem a cav mostrada na Figura. Esse gerador tem uma reatância síncrona de  $0,1 \, \Omega$  e uma resistência de armadura de  $0,015 \, \Omega$ . A plena carga, a máquina fornece 1200 A com FP 0,8 atrasado. Em condições de plena carga, as perdas por atrito e ventilação são 40 kW e as perdas no núcleo são 30 kW. Ignore as perdas no circuito de campo. (e) Se a carga do gerador for repentinamente desligada da linha, que acontecerá a sua tensão terminal?

Se a carga for repentinamente desligada a corrente de armadura vai a zero, tornando a tensão terminal igual a tensão induzida, que neste caso, é de 532 V. Ou seja, se a carga for desligada repentinamente, a tensão terminal subirá para 532 V.

## Exemplo 5

Um gerador síncrono de 480 V, 60 Hz, ligado em  $\Delta$  e de quatro polos tem a cav mostrada na Figura. Esse gerador tem uma reatância síncrona de  $0,1 \, \Omega$  e uma resistência de armadura de  $0,015 \, \Omega$ . A plena carga, a máquina fornece 1200 A com FP 0,8 atrasado. Em condições de plena carga, as perdas por atrito e ventilação são 40 kW e as perdas no núcleo são 30 kW. Ignore as perdas no circuito de campo. (f) Finalmente, suponha que o gerador seja ligado a uma carga que solicita 1200 A om FP 0,8 capacitivo. Quanta corrente de campo será necessária para manter a tensão terminal igual a 480 V?



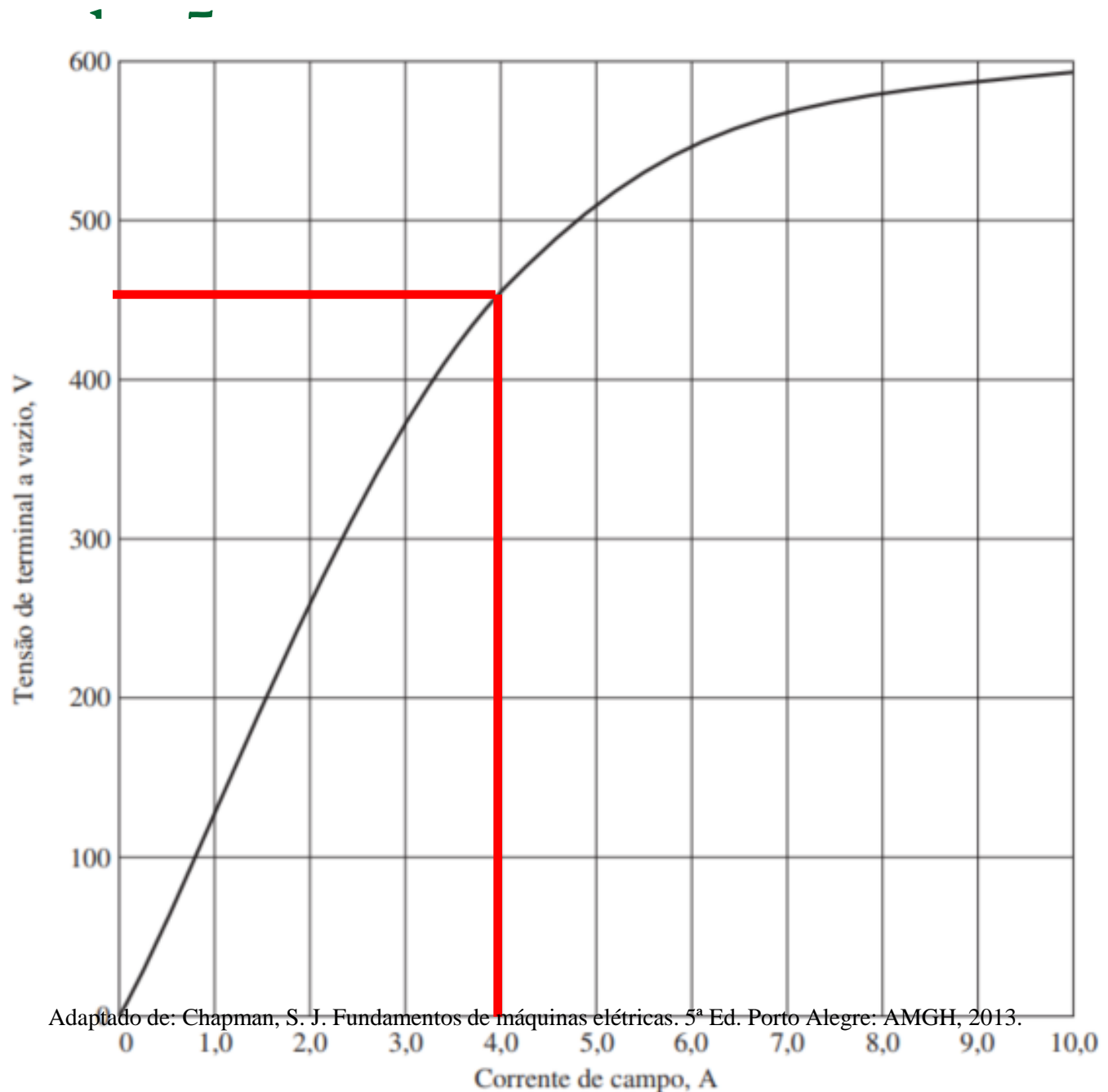
## Exemplo 5

Um gerador síncrono de 480 V, 60 Hz, ligado em  $\Delta$  e de quatro polos tem a cav mostrada na Figura. Esse gerador tem uma reatância síncrona de  $0,1 \, \Omega$  e uma resistência de armadura de  $0,015 \, \Omega$ . A plena carga, a máquina fornece 1200 A com FP 0,8 atrasado. Em condições de plena carga, as perdas por atrito e ventilação são 40 kW e as perdas no núcleo são 30 kW. Ignore as perdas no circuito de campo. (f) Finalmente, suponha que o gerador seja ligado a uma carga que solicita 1200 A om FP 0,8 capacitivo. Quanta corrente de campo será necessária para manter a tensão terminal igual a 480 V?

$$\begin{aligned}\hat{E}_{af} &= \hat{V}_t + R_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a \\ &= 480 + (0,015 + j0,1) \frac{1200}{\sqrt{3}} \angle \arccos(0,8) \\ &= 480 + 0,101119 \angle 81,47 \left( 692,82 \angle 36,87 \right) \\ &= 480 + 70,06 \angle 118,34 = 446,74 + j61,66 \\ &= 450,98 \angle 7,86\end{aligned}$$

# Exo

Um gerador  
mostrada  
resistênc  
FP 0,8 e  
são 40  
campo. I  
1200 A  
manter a



a cav  
e uma  
A com  
tilação  
ito de  
solicita  
a para

Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

## Exemplo 5

Um gerador síncrono de 480 V, 60 Hz, ligado em  $\Delta$  e de quatro polos tem a cav mostrada na Figura. Esse gerador tem uma reatância síncrona de  $0,1 \, \Omega$  e uma resistência de armadura de  $0,015 \, \Omega$ . A plena carga, a máquina fornece 1200 A com FP 0,8 atrasado. Em condições de plena carga, as perdas por atrito e ventilação são 40 kW e as perdas no núcleo são 30 kW. Ignore as perdas no circuito de campo. (f) Finalmente, suponha que o gerador seja ligado a uma carga que solicita 1200 A om FP 0,8 capacitivo. Quanta corrente de campo será necessária para manter a tensão terminal igual a 480 V?

$$E_{af} = 450,98 \rightarrow I_f = 4,0 \text{ A}$$

## Exemplo 5

Um gerador síncrono de 480 V, 60 Hz, ligado em  $\Delta$  e de quatro polos tem a cav mostrada na Figura. Esse gerador tem uma reatância síncrona de  $0,1 \, \Omega$  e uma resistência de armadura de  $0,015 \, \Omega$ . A plena carga, a máquina fornece 1200 A com FP 0,8 atrasado. Em condições de plena carga, as perdas por atrito e ventilação são 40 kW e as perdas no núcleo são 30 kW. Ignore as perdas no circuito de campo. (f) Finalmente, suponha que o gerador seja ligado a uma carga que solicita 1200 A om FP 0,8 capacitivo. Quanta corrente de campo será necessária para manter a tensão terminal igual a 480 V?

$$E_{af} = 450,98 \rightarrow I_f = 4,0 \text{ A}$$

Claramente, o fator de potência indutivo necessita de mais corrente de campo que o fator de potência capacitivo, isto é, o fator de potência indutivo impõe maior stress térmico ao campo do gerador síncrono. A medida que o fator de potência é corrigido, a carga térmica de refrigeração do campo é menor.

## Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (a) Qual é a velocidade de rotação desse gerador?

## Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (a) Qual é a velocidade de rotação desse gerador?

$$f = \frac{n \cdot P}{120} \rightarrow n = \frac{120 \cdot 50}{6} = 1000 \text{ rpm}$$

$$\omega_m = 2\pi \frac{1000}{60} = 104,72 \text{ rad/s}$$

## Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (b) Qual será a tensão de terminal desse gerador se:

## Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (b) Qual será a tensão de terminal desse gerador se:

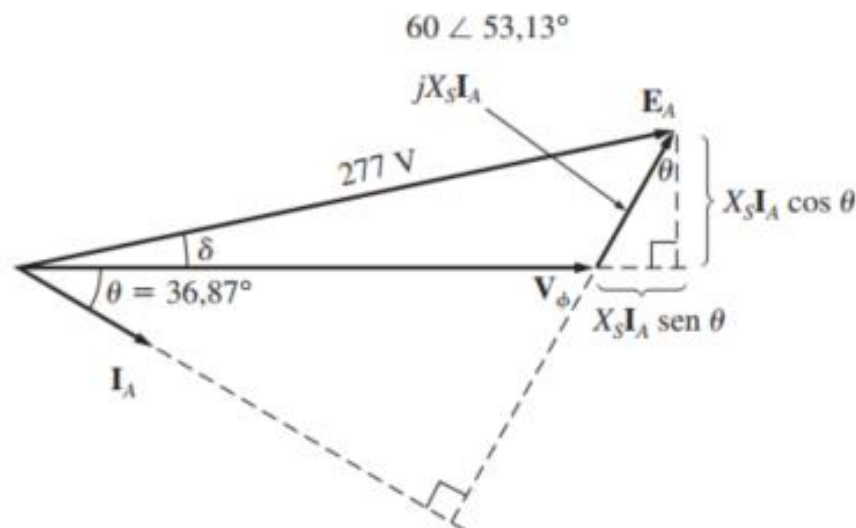
1. Ele é carregado com a corrente nominal, sendo FP 0,8 indutivo



# Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (b) Qual será a tensão de terminal desse gerador se:

1. Ele é carregado com a corrente nominal, sendo FP 0,8 indutivo



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

# Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (b) Qual será a tensão de terminal desse gerador se:

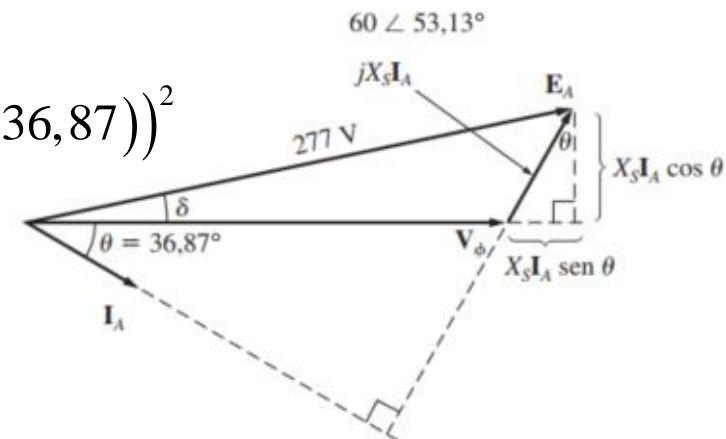
1. Ele é carregado com a corrente nominal, sendo FP 0,8 indutivo

$$E_{af}^2 = (V_t + X_s I_a \sin \theta)^2 + (X_s I_a \cos \theta)^2$$

$$\left( \frac{480}{\sqrt{3}} \right)^2 = (V_t + 1,0 \cdot 60 \cdot \sin(36,87)) ^2 + (1,0 \cdot 60 \cdot \cos(36,87))^2$$

$$76800 = (V_t + 36)^2 + 2304$$

$$74496 = (V_t + 36)^2 \rightarrow V_t = 272,94 - 36 = 236,94 \, \text{V}$$



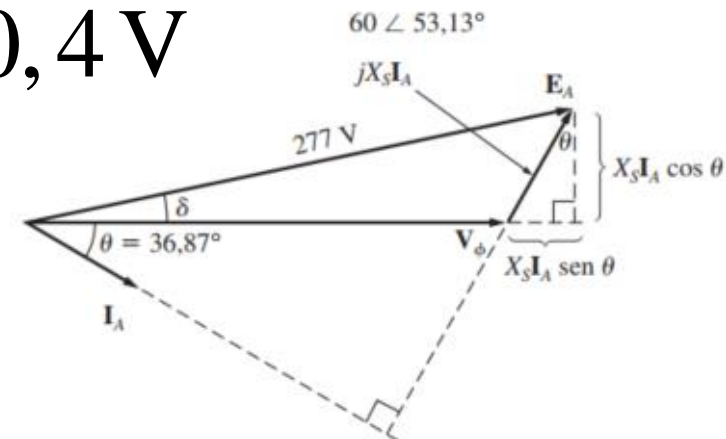
Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

# Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (b) Qual será a tensão de terminal desse gerador se:

1. Ele é carregado com a corrente nominal, sendo FP 0,8 indutivo

$$V_t = 236,94 \, \text{V} \rightarrow V_{\text{linha}} = 410,4 \, \text{V}$$



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

# Exemplo 6

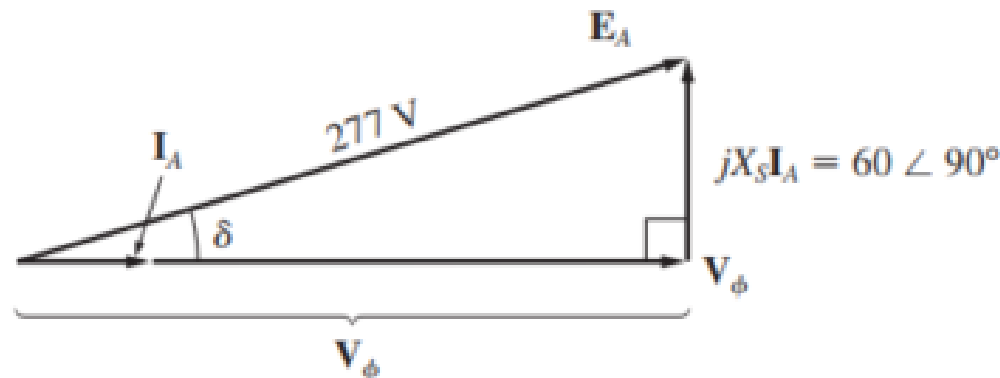
Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (b) Qual será a tensão de terminal desse gerador se:

2. Ele é carregado com a corrente nominal, sendo FP unitário

# Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (b) Qual será a tensão de terminal desse gerador se:

2. Ele é carregado com a corrente nominal, sendo FP unitário



# Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (b) Qual será a tensão de terminal desse gerador se:

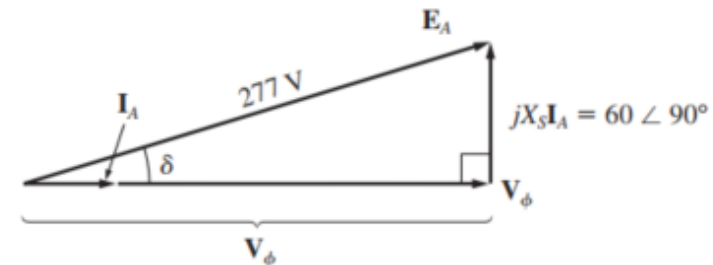
2. Ele é carregado com a corrente nominal, sendo FP unitário

$$E_{af}^2 = (V_t)^2 + (X_s I_a)^2$$

$$\left( \frac{480}{\sqrt{3}} \right)^2 = (V_t)^2 + (1,0 \cdot 60)^2$$

$$76800 = V_t^2 + 3600$$

$$73200 = V_t^2 \rightarrow V_t = 270,55 \, \text{V}$$



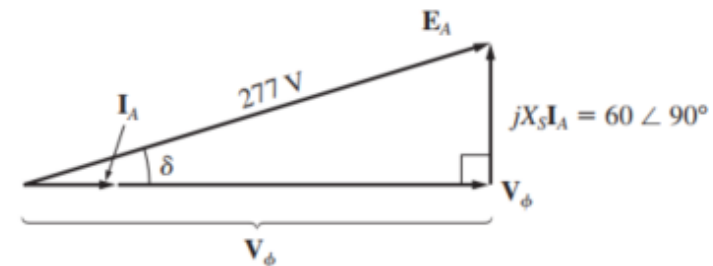
Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

# Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (b) Qual será a tensão de terminal desse gerador se:

2. Ele é carregado com a corrente nominal, sendo FP unitário

$$V_t = 270,55 \text{ V} \rightarrow V_{linha} = 468,6 \text{ V}$$



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

## Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (b) Qual será a tensão de terminal desse gerador se:

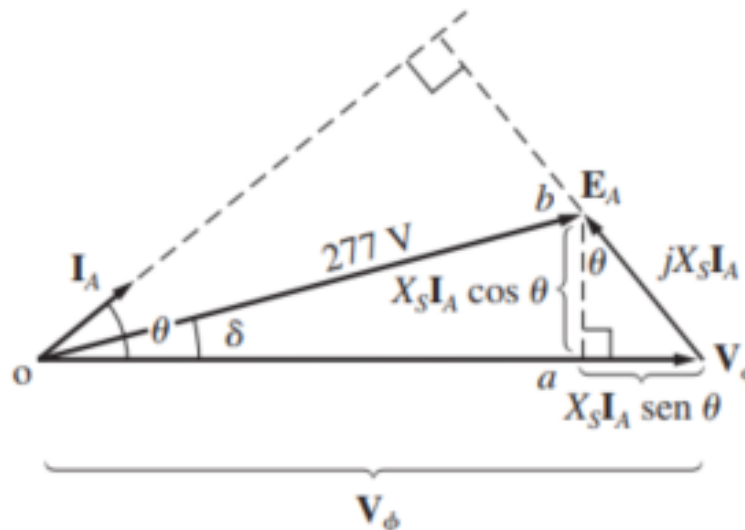
3. Ele é carregado com a corrente nominal, sendo FP 0,8 capacitivo



# Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (b) Qual será a tensão de terminal desse gerador se:

3. Ele é carregado com a corrente nominal, sendo FP 0,8 capacitivo



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

# Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (b) Qual será a tensão de terminal desse gerador se:

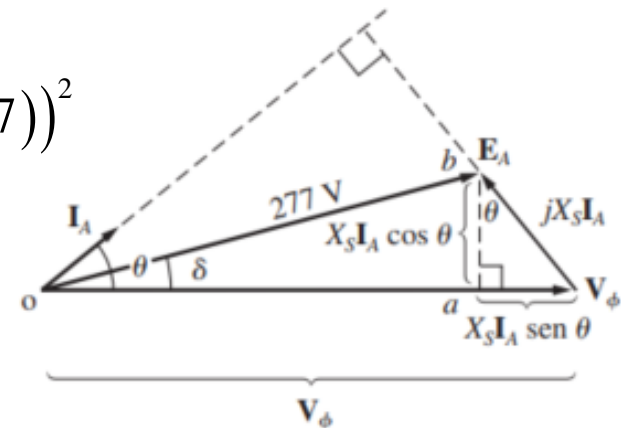
3. Ele é carregado com a corrente nominal, sendo FP 0,8 capacitivo

$$E_{af}^2 = (V_t - X_s I_a \sin \theta)^2 + (X_s I_a \cos \theta)^2$$

$$\left( \frac{480}{\sqrt{3}} \right)^2 = (V_t - 1,0 \cdot 60 \cdot \sin(36,87)) ^2 + (1,0 \cdot 60 \cdot \cos(36,87))^2$$

$$76800 = (V_t - 36)^2 + 2304$$

$$74496 = (V_t - 36)^2 \rightarrow V_t = 272,94 + 36 = 308,94 \, \text{V}$$



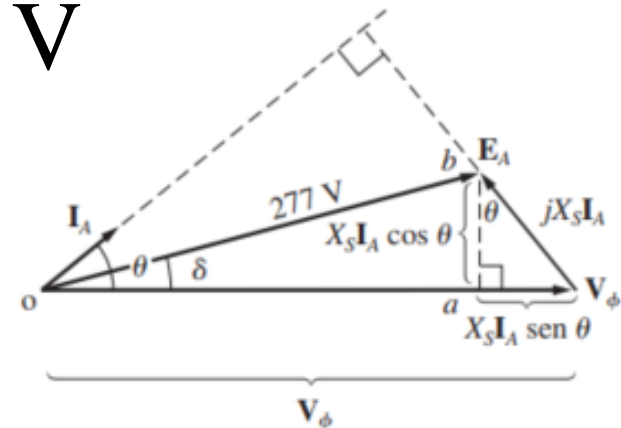
Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

# Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (b) Qual será a tensão de terminal desse gerador se:

3. Ele é carregado com a corrente nominal, sendo FP 0,8 capacitivo

$$V_t = 308,94 \text{ V} \rightarrow V_{linha} = 535,1 \text{ V}$$



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

## Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (c) Qual o rendimento desse gerador quando ele está operando com corrente nominal e FP 0,8 atrasado.

## Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (c) Qual o rendimento desse gerador quando ele está operando com corrente nominal e FP 0,8 atrasado.

$$P_{saída} = 3 \cdot 236,94 \cdot 60 \cdot 0,8 = 34,1 \text{ kW}$$

$$P_{entrada} = P_{saída} + P_{AV} + P_{fe} = 34,1 + 1,5 + 1,0 = 36,6 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{34,1}{36,6} = 93,2\%$$

## Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (d) Quanto conjugado deve ser aplicado no eixo pela máquina primária a plena carga? Qual o valor do torque eletromagnético?

## Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (d) Quanto conjugado deve ser aplicado no eixo pela máquina primária a plena carga? Qual o valor do torque eletromagnético?

$$\tau_{eixo} = \frac{P_{entrada}}{\omega_m} = \frac{36,6}{104,7} = 349,57 \text{ N.m}$$

$$\tau_{elé} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} = \frac{34,1}{104,7} = 325,69 \text{ N.m}$$

## Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (e) Qual a regulação de tensão desse gerador, com FP 0,8 indutivo? Com FP 1,0? Com FP 0,8 capacitivo?



## Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio. (e) Qual a regulação de tensão desse gerador, com FP 0,8 indutivo? Com FP 1,0? Com FP 0,8 capacitivo?

$$RT_{0,8\_ind} = \frac{480 - 410}{410} = 17,1\%$$

$$RT_1 = \frac{480 - 468}{468} = 2,6\%$$

$$RT_{0,8\_cap} = \frac{480 - 535}{535} = -10,3\%$$

## Exemplo 6

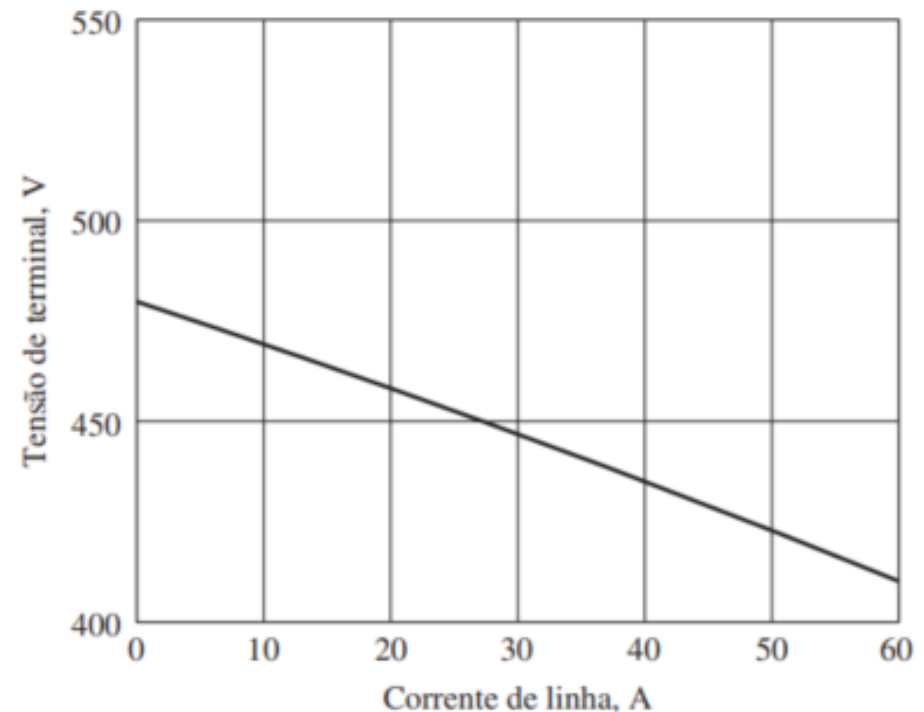
Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio.

Quais as curvas características da tensão de terminal em função da corrente de armadura da condição a vazio até a plena carga para 0,8 indutivo e capacitivo

# Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio.

FP 0,8 indutivo

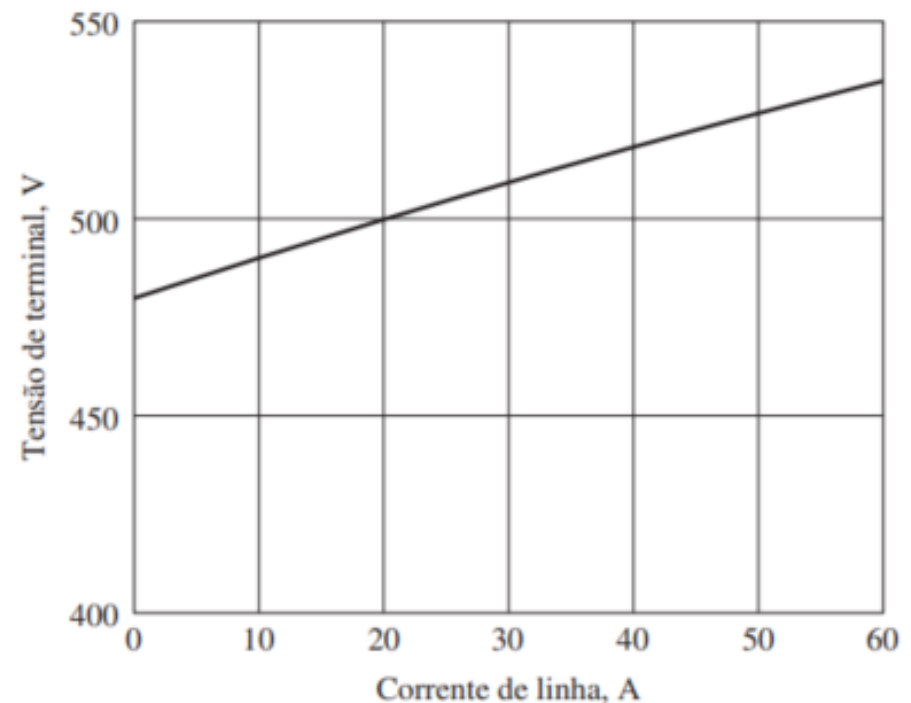


Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

# Exemplo 6

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma reatância síncrona de  $1,0 \, \Omega$ . Sua corrente de plena carga é 60 A com FP 0,8 atrasado. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW, para 50 Hz a plena carga. Como a resistência de armadura é desprezada, ignore as perdas nos enrolamentos do campo e da armadura. A corrente de campo foi ajustada de modo que a tensão terminal seja 480 V a vazio.

FP 0,8 capacitivo



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

# Gerador Síncrono Operando Isolado

- Controle do FP

- Para potência ativa constante

# Gerador Síncrono Operando Isolado

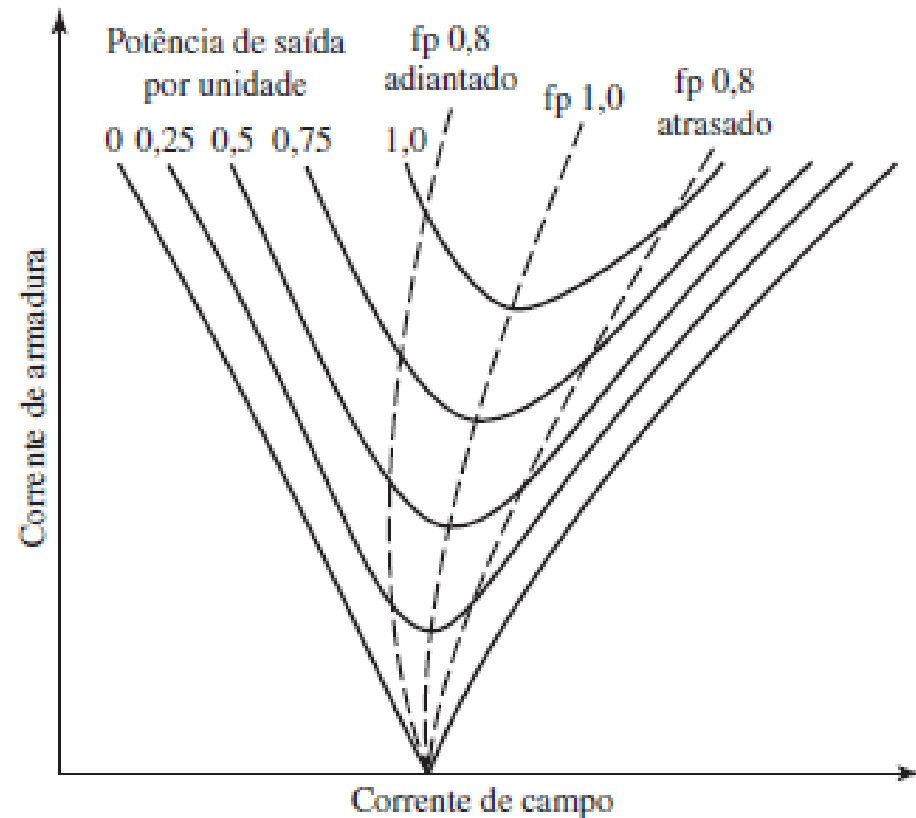
## ■ Controle do FP

- Para potência ativa constante
- FP é controlado pela corrente de campo

# Gerador Síncrono Operando Isolado

## ■ Controle do FP

- Para potência ativa constante
- FP é controlado pela corrente de campo
  - Curva mostra relação entre corrente de armadura e corrente de campo

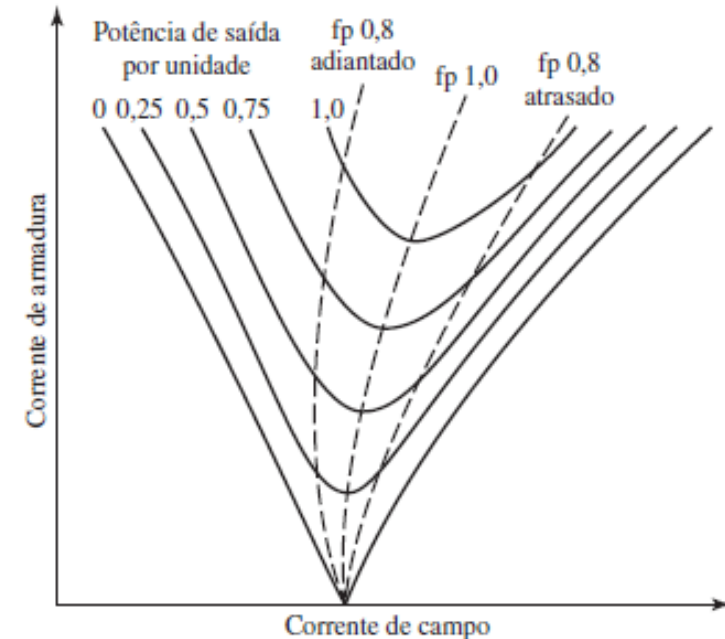


Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

# Gerador Síncrono Operando Isolado

## ■ Curva em V

- Considerando potência e tensão terminal constantes



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

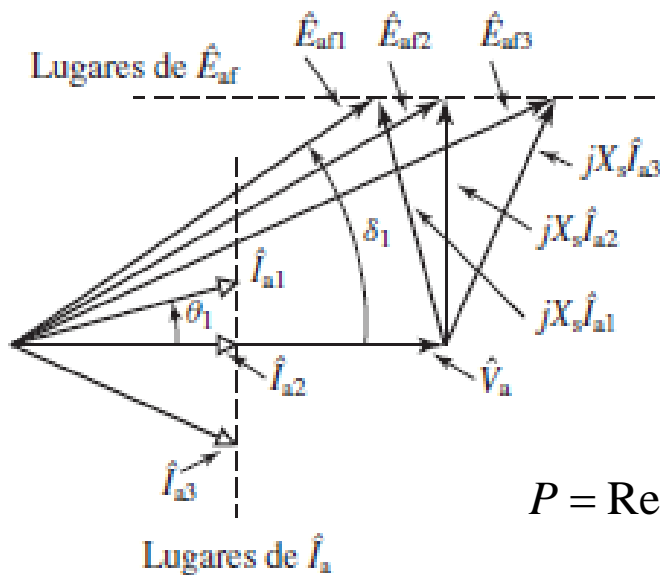
$$P = \text{Re}[\hat{V}_a \hat{I}_a^*] = V_a I_a \cos(\theta)$$



# Gerador Síncrono Operando Isolado

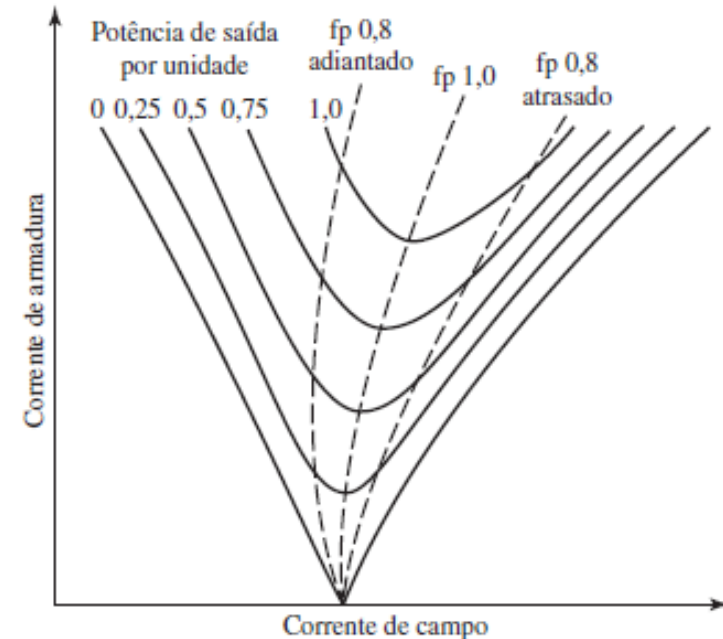
## ■ Curva em V

- Considerando potência e tensão terminal constantes



$$P = \text{Re} \left[ \hat{V}_a \hat{I}_a^* \right] = V_a I_a \cos(\theta)$$

Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

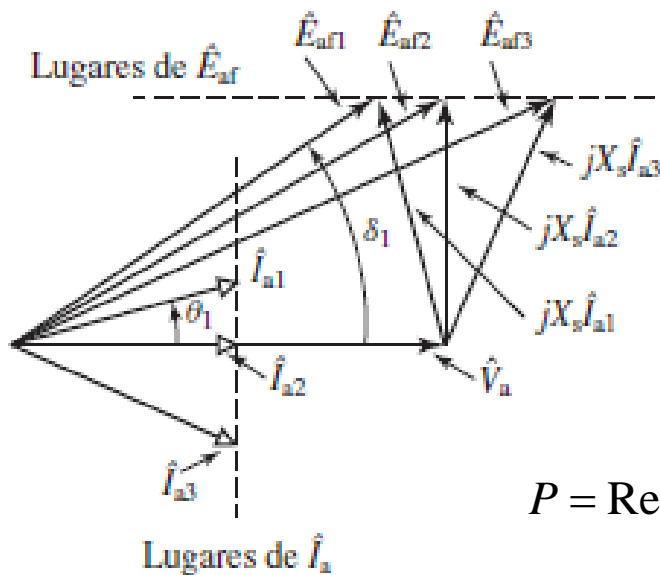


Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

# Gerador Síncrono Operando Isolado

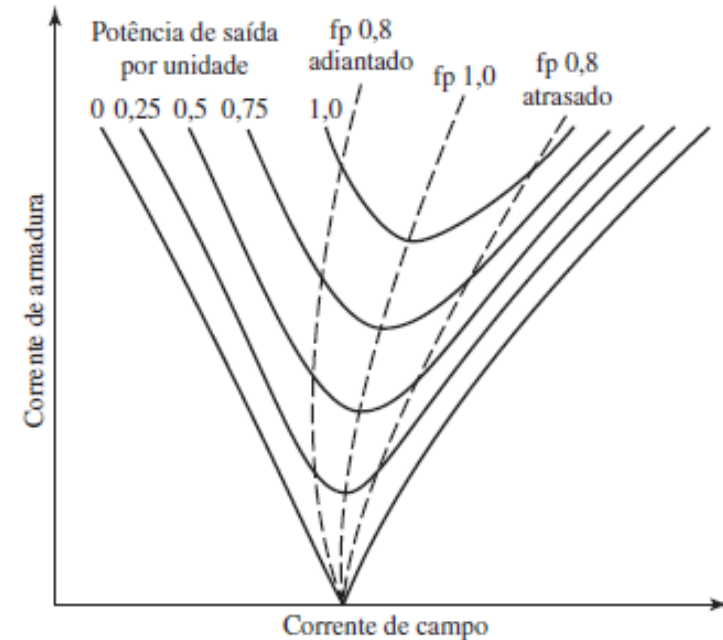
## ■ Curva em V

- Considerando potência e tensão terminal constantes



$$P = \text{Re} \left[ \hat{V}_a \hat{I}_a^* \right] = V_a I_a \cos(\theta)$$

Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.



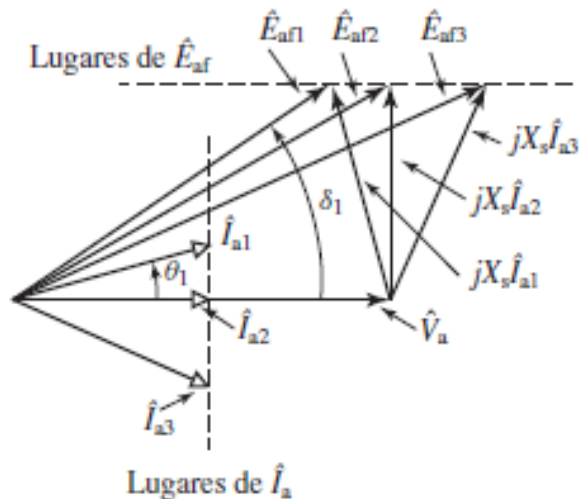
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

$$I_{a1} \cos(\theta_1) = I_{a2} \cos(\theta_2) = I_{a3} \cos(\theta_3)$$

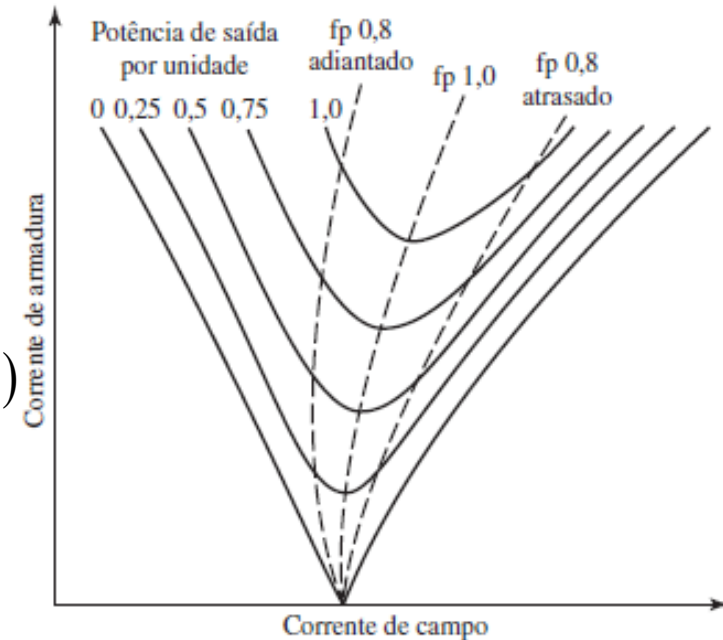
# Gerador Síncrono Operando Isolado

## ■ Curva em V

- Considerando potência e tensão terminal constantes



$$P = \text{Re} \left[ \hat{V}_a \hat{I}_a^* \right] = V_a I_a \cos(\theta)$$



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

$$\theta_1 > 0$$

$$Q = \text{Im} \left[ \hat{V}_a \hat{I}_a^* \right] = -V_a I_{a1} \cos(\theta_1)$$

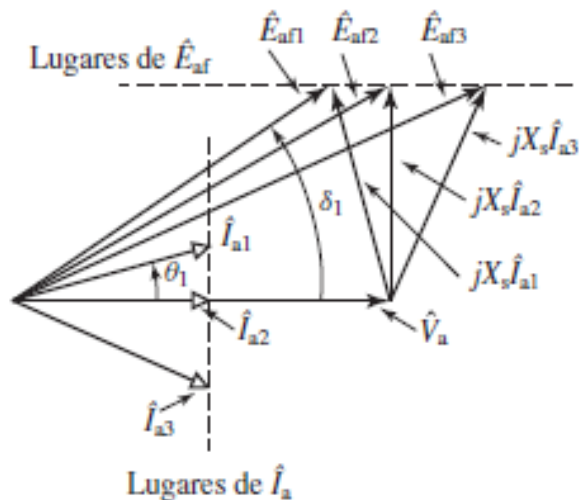
Máquina absorvendo potência reativa (capacitiva): Máquina Subexcitada

Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

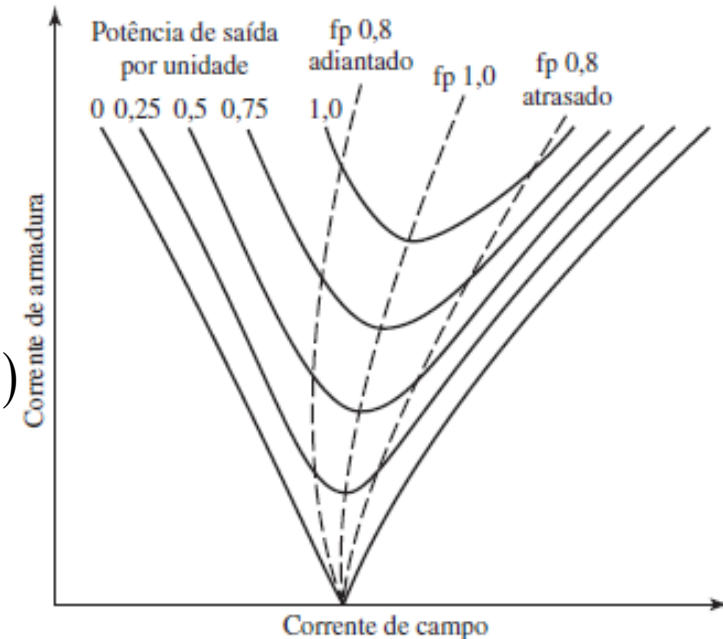
# Gerador Síncrono Operando Isolado

## ■ Curva em V

- Considerando potência e tensão terminal constantes



$$P = \text{Re} \left[ \hat{V}_a \hat{I}_a^* \right] = V_a I_a \cos(\theta)$$



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

$$\theta_3 < 0$$

$$Q = \text{Im} \left[ \hat{V}_a \hat{I}_a^* \right] = V_a I_{a3} \cos(\theta_3)$$

Máquina fornecendo potência reativa (indutiva): Máquina Sobrecitada

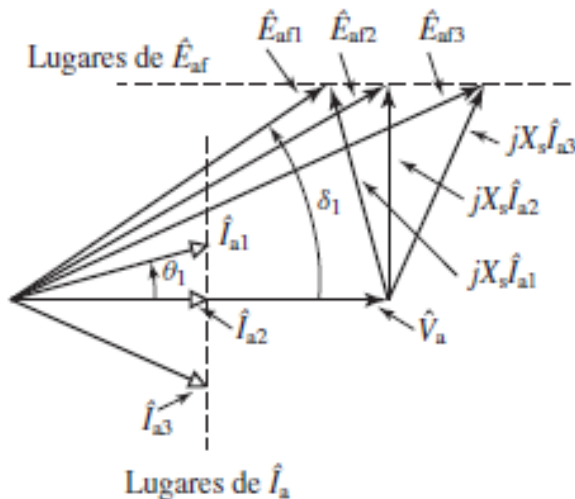
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

# Exercício 7

Calcule a corrente de campo do gerador síncrono com especificações nominais de 13,8 kV, 150 MVA, 0,9 de fator de potência (FP) com uma reatância síncrona de 1,18 p.u., se ele estiver operando sua tensão de terminal nominal e fator de potência unitário com cargas de potência ativa de 0,5, 0,75 e 1 p.u.

# Exercício 7

Calcule a corrente de campo do gerador síncrono com especificações nominais de 13,8 kV, 150 MVA, 0,9 de fator de potência (FP) com uma reatância síncrona de 1,18 p.u., se ele estiver operando sua tensão de terminal nominal e fator de potência unitário com cargas de potência ativa de 0,5, 0,75 e 1 p.u.



Para FP=1:

$$I_a = \frac{P}{V_a} = \frac{0,5}{1,0} = 0,5 \text{ p.u.}$$

Tensão induzida perpendicular a tensão terminal (Caso 2)

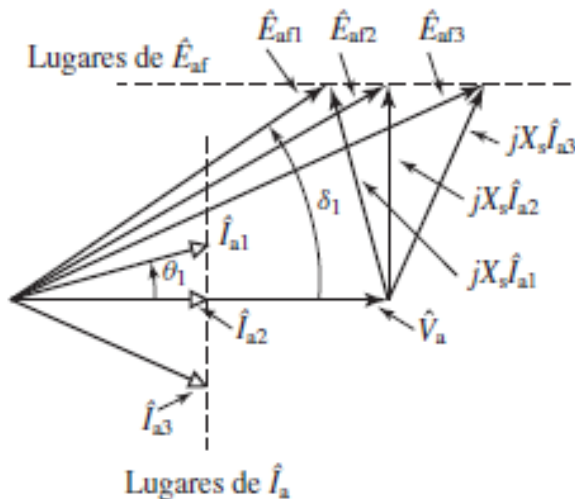
$$E_{af} = \sqrt{V_a^2 + (X_s I_a)^2} = \sqrt{1^2 + (1,18 \cdot 0,5)^2} = 1,16 \text{ p.u.}$$

$$I_f = 1,16 \cdot 680 = 789 \text{ A}$$

Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

# Exercício 7

Calcule a corrente de campo do gerador síncrono com especificações nominais de 13,8 kV, 150 MVA, 0,9 de fator de potência (FP) com uma reatância síncrona de 1,18 p.u., se ele estiver operando sua tensão de terminal nominal e fator de potência unitário com cargas de potência ativa de 0,5, 0,75 e 1 p.u.



Para FP=1:

$$I_a = \frac{P}{V_a} = \frac{0,75}{1,0} = 0,75 \text{ p.u.}$$

Tensão induzida perpendicular a tensão terminal (Caso 2)

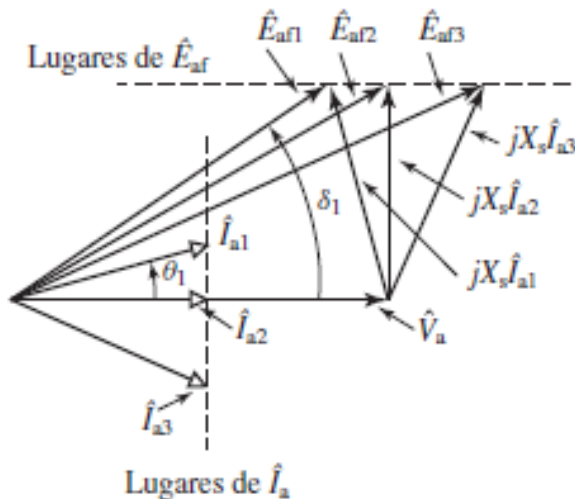
$$E_{af} = \sqrt{V_a^2 + (X_s I_a)^2} = \sqrt{1^2 + (1,18 \cdot 0,75)^2} = 1,34 \text{ p.u.}$$

$$I_f = 1,34 \cdot 680 = 911 \text{ A}$$

Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

# Exercício 7

Calcule a corrente de campo do gerador síncrono com especificações nominais de 13,8 kV, 150 MVA, 0,9 de fator de potência (FP) com uma reatância síncrona de 1,18 p.u., se ele estiver operando sua tensão de terminal nominal e fator de potência unitário com cargas de potência ativa de 0,5, 0,75 e 1 p.u.



Para FP=1:

$$I_a = \frac{P}{V_a} = \frac{1,0}{1,0} = 1,0 \text{ p.u.}$$

Tensão induzida perpendicular a tensão terminal (Caso 2)

$$E_{af} = \sqrt{V_a^2 + (X_s I_a)^2} = \sqrt{1^2 + (1,18 \cdot 1)^2} = 1,55 \text{ p.u.}$$

$$I_f = 1,55 \cdot 680 = 1054 \text{ A}$$

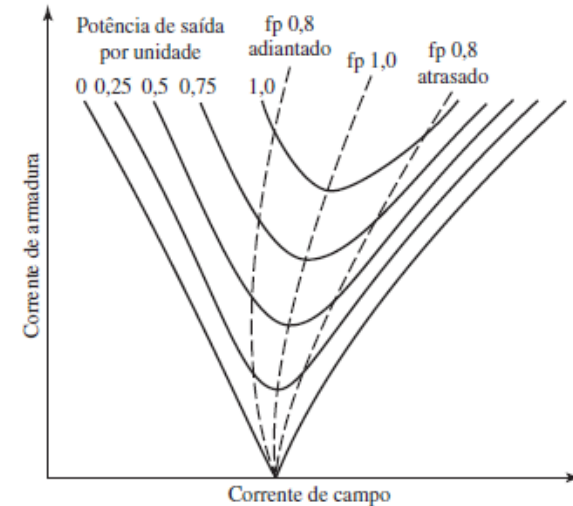
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.



# Gerador Síncrono Operando Isolado

## ■ Curva V

- É possível identificar  $FP=1$



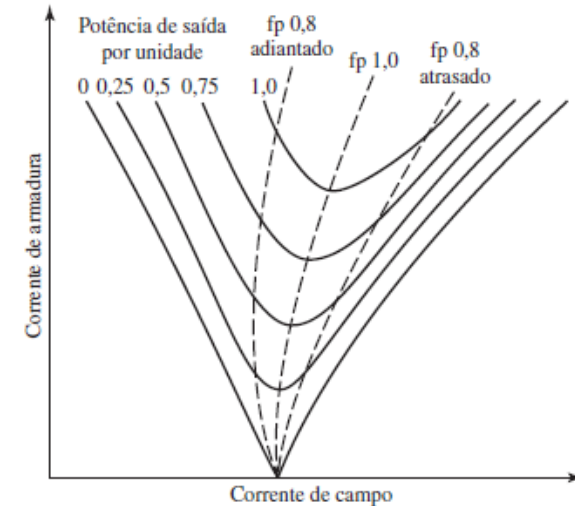
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

# Gerador Síncrono Operando Isolado

## ■ Curva V

- É possível identificar FP=1

$$Q = 0 \rightarrow \frac{V_a}{X_s} \cdot [E_{af} \cos(\delta) - V_a] = 0$$



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

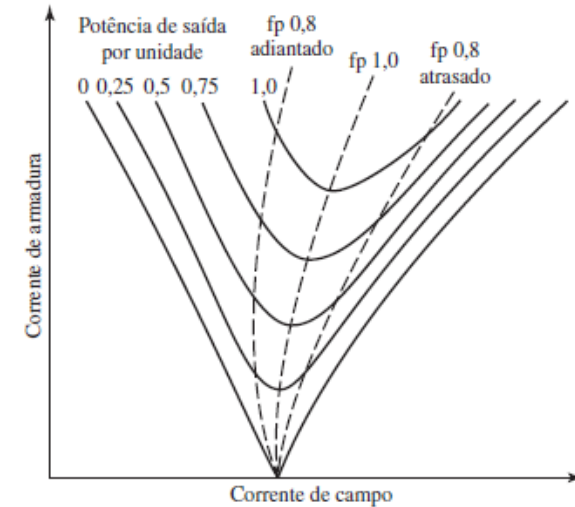
# Gerador Síncrono Operando Isolado

## ■ Curva V

- É possível identificar FP=1

$$Q = 0 \rightarrow \frac{V_a}{X_s} \cdot [E_{af} \cos(\delta) - V_a] = 0$$

$$\cos(\delta) = \frac{V_a}{E_{af}} = \frac{1,0}{E_{af}}$$



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

# Gerador Síncrono Operando Isolado

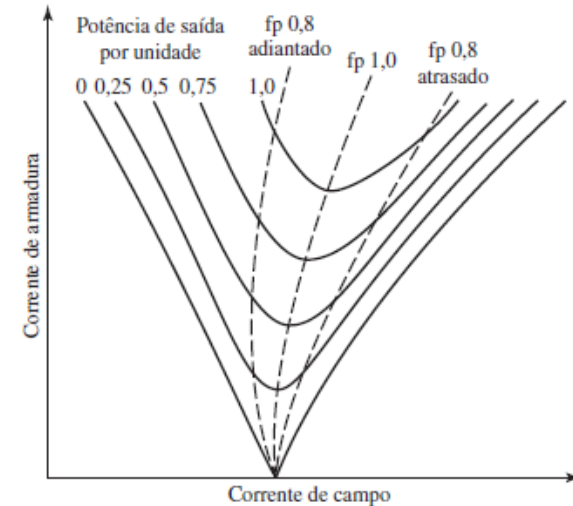
## ■ Curva V

- É possível identificar FP=1

$$Q = 0 \rightarrow \frac{V_a}{X_s} \cdot [E_{af} \cos(\delta) - V_a] = 0$$

$$\cos(\delta) = \frac{V_a}{E_{af}} = \frac{1,0}{E_{af}} \quad \delta = \arccos\left(\frac{V_a}{E_{af}}\right) = \arccos\left(\frac{1,0}{E_{af}}\right)$$

Se  $E_{af}=1,0$  o ângulo de potência é mínimo. Com o aumento da tensão induzida (gerado pelo aumento de corrente de campo) há aumento no ângulo de potência e consequentemente, da potência.



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

---

# Exercício 8

Com o uso do MATLAB, plote a corrente de terminal (p.u) pela corrente de campo em [A] para o gerador síncrono com especificações nominais de 13,8 kV, 150 MVA, com uma reatância síncrona de 1,18 p.u., se ele estiver operando sua tensão de terminal nominal, potência ativa de 0,7 p.u., quando o fator de potência varia de 0,8 capacitivo até 0,8 indutivo.

# Exercício 8

Com o uso do MATLAB, plote a corrente de terminal (p.u) pela corrente de campo em [A] para o gerador síncrono com especificações nominais de 13,8 kV, 150 MVA, com uma reatância síncrona de 1,18 p.u., se ele estiver operando sua tensão de terminal nominal, potência ativa de 0,7 p.u., quando o fator de potência varia de 0,8 capacitivo até 0,8 indutivo.

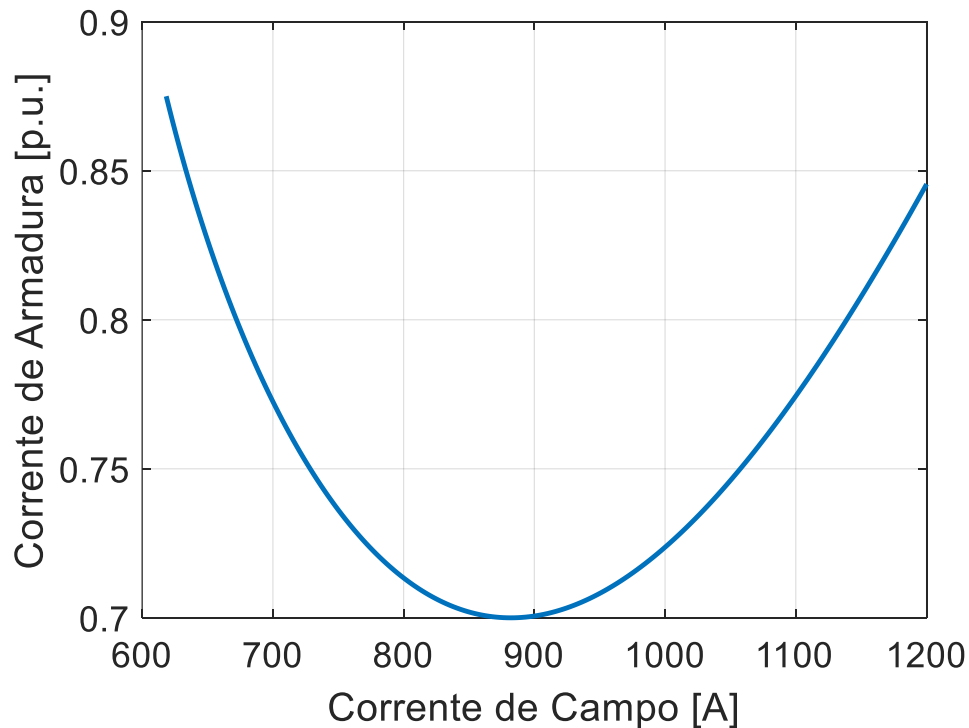
```
close all
clear all
clc
% Parâmetros do gerador
Va = 1.0;
Xs = 1.18;
AFNL = 680;
P = 0.7;
theta = acos(0.8)*(1:-.01:-1);
Ia = P./(Va*cos(theta));
Iahat = Ia.*exp(1i*theta);
Eafhat = Va+1i*Xs*Iahat;
Eaf = abs(Eafhat);
```

$$\hat{I}_a = \left[ \frac{P}{V_a \cos(\theta)} \right] \angle \theta$$

```
If = Eaf*AFNL;
plot(Ia,Ia,'LineWidth',2)
xlabel('Corrente de Campo [A]','FontSize',15)
ylabel('Corrente de Armadura [p.u.]','FontSize',15)
set(gca,'FontSize',15)
set(gca,'xlim',[600 1200])
grid on
```

# Exercício 8

Com o uso do MATLAB, plote a corrente de terminal (p.u) pela corrente de campo em [A] para o gerador síncrono com especificações nominais de 13,8 kV, 150 MVA, com uma reatância síncrona de 1,18 p.u., se ele estiver operando sua tensão de terminal nominal, potência ativa de 0,7 p.u., quando o fator de potência varia de 0,8 capacitivo até 0,8 indutivo.



$$\hat{I}_a = \left[ \frac{P}{V_a \cos(\theta)} \right] \angle \theta$$

# Avaliação H

Um gerador síncrono tem especificações nominais de 380 V, 500 kVA, 0,8 de fator de potência (FP) indutivo, com resistência de armadura de 0,01 p.u., reatância síncrona de 1,5 p.u. e  $CCAV = 40$  A. Sabendo que o fator de potência nominal do gerador é determinado pela intersecção das curvas-limites de aquecimento da armadura e do campo, calcule a corrente de campo máxima que pode ser fornecida ao gerador sem ultrapassar o limite de aquecimento do campo.



# Avaliação I

Plote a corrente de campo pela corrente de armadura do gerador síncrono com especificações nominais de 380 V, 500 kVA, com resistência de armadura de 0,01 p.u. e reatância síncrona de 1,5 p.u. e  $CCAV = 40$  A, se ele estiver operando sua tensão de terminal nominal, potência ativa de 0,5 p.u. variando o fator de potência de 0,92 capacitivo a 0,92 indutivo.

---

# Avaliação J

Repita a avaliação I para as potências de 0,6 p.u, 0,7 p.u, 0,8 p.u e 0.9 p.u. Plote as curvas V em um único gráfico.

# Operação em Paralelo

- Na prática: geradores são postos em operação em paralelo
  - Vantagens:
    - Alimentam uma carga maior que apenas uma máquina isolada;

# Operação em Paralelo

- Na prática: geradores são postos em operação em paralelo
  - Vantagens:
    - Alimentam uma carga maior que apenas uma máquina isolada;
    - Aumentam a confiabilidade do sistema de potência: se um falhar, não ocorre perda total da potência da carga;

# Operação em Paralelo

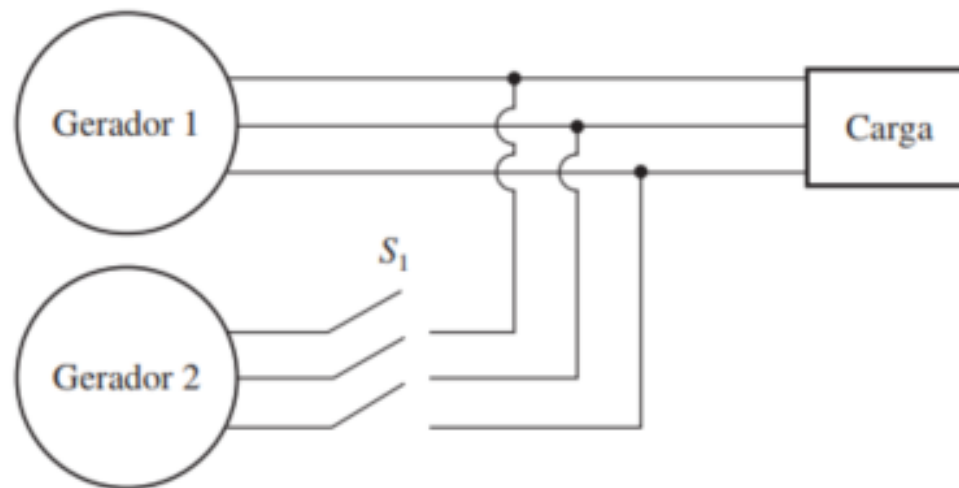
- Na prática: geradores são postos em operação em paralelo
  - Vantagens:
    - Alimentam uma carga maior que apenas uma máquina isolada;
    - Aumentam a confiabilidade do sistema de potência: se um falhar, não ocorre perda total da potência da carga;
    - Permite melhor gestão da remoção para desligamento e manutenção preventiva;

# Operação em Paralelo

- Na prática: geradores são postos em operação em paralelo
  - Vantagens:
    - Alimentam uma carga maior que apenas uma máquina isolada;
    - Aumentam a confiabilidade do sistema de potência: se um falhar, não ocorre perda total da potência da carga;
    - Permite melhor gestão da remoção para desligamento e manutenção preventiva;
    - Torna as máquinas em funcionamento, com alto carregamento;

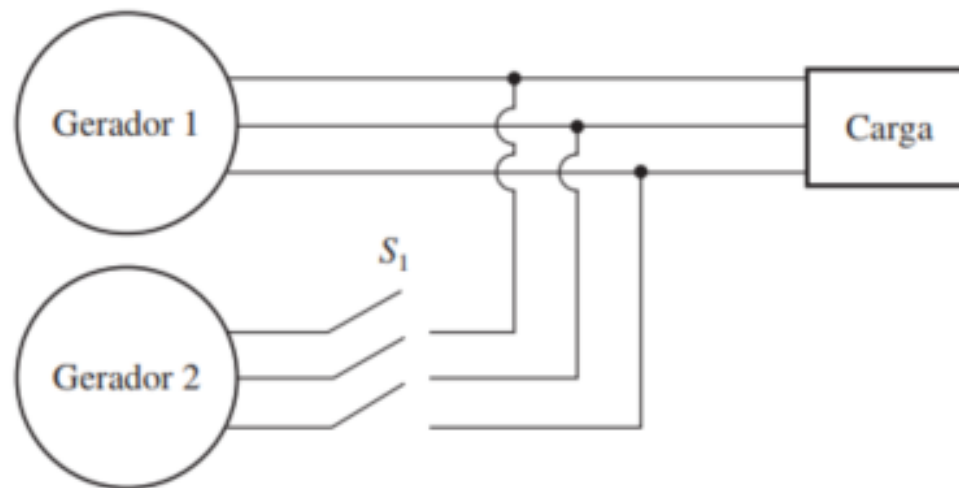
# Operação em Paralelo

- Na prática: geradores são postos em operação em paralelo



# Operação em Paralelo

- Na prática: geradores são postos em operação em paralelo

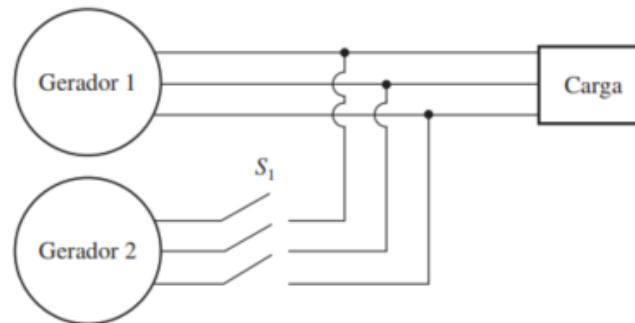


- O que é necessário para que haja a ligação em paralelo?



# Operação em Paralelo

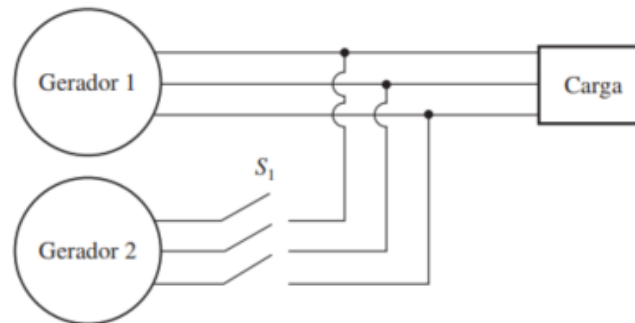
- O que é necessário para que haja a ligação em paralelo?



- Tensões eficazes de linha devem ser iguais;

# Operação em Paralelo

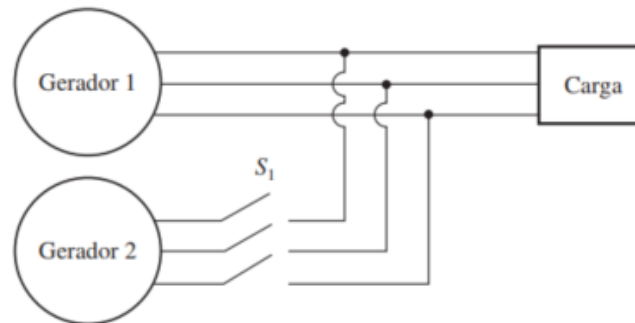
- O que é necessário para que haja a ligação em paralelo?



- Tensões eficazes de linha devem ser iguais;
- Os geradores devem ter a mesma sequência de fases;

# Operação em Paralelo

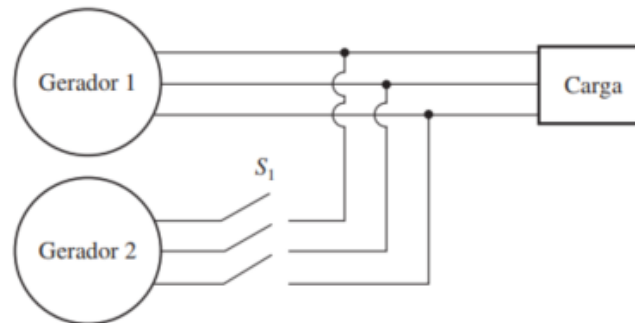
- O que é necessário para que haja a ligação em paralelo?



- Tensões eficazes de linha devem ser iguais;
- Os geradores devem ter a mesma sequência de fases;
- Os ângulos das fases a, devem ser iguais;

# Operação em Paralelo

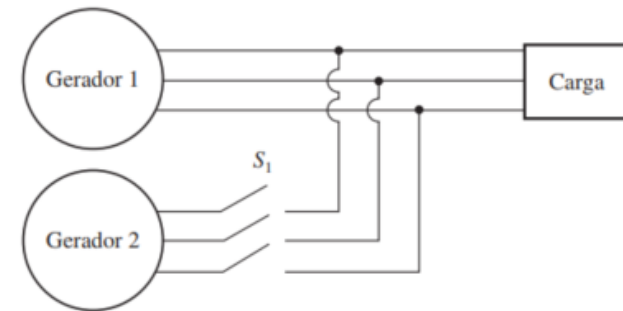
- O que é necessário para que haja a ligação em paralelo?



- Tensões eficazes de linha devem ser iguais;
- Os geradores devem ter a mesma sequência de fases;
- Os ângulos das fases  $a$ , devem ser iguais;
- A frequência do gerador que está entrando em paralelo, deve ser ligeiramente superior a frequência do sistema já em operação.

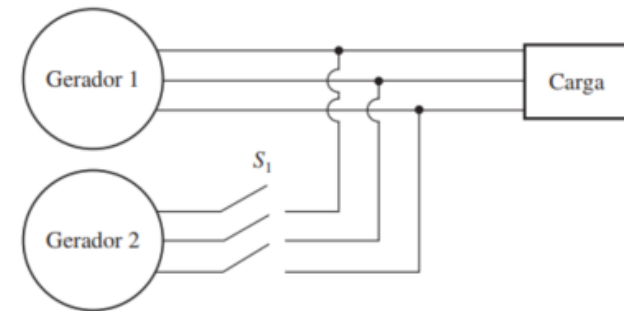
# Operação em Paralelo

- Condições 1 e 3, são naturais:



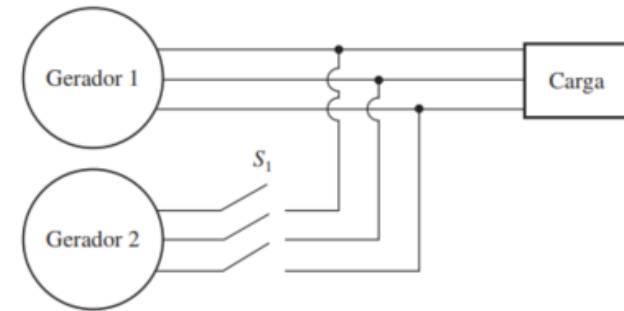
# Operação em Paralelo

- Condições 1 e 3, são naturais:
  - As tensões devem ser iguais e as fases *a* de ambos os geradores, deve ser idêntica;



# Operação em Paralelo

- Condições 1 e 3, são naturais:
  - As tensões devem ser iguais e as fases *a* de ambos os geradores, deve ser idêntica;

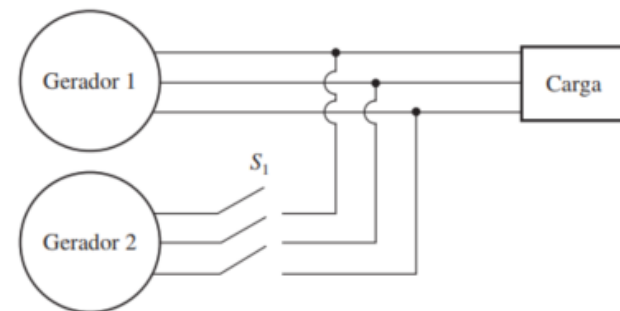


- Sobre a mesma sequência de fases (2):

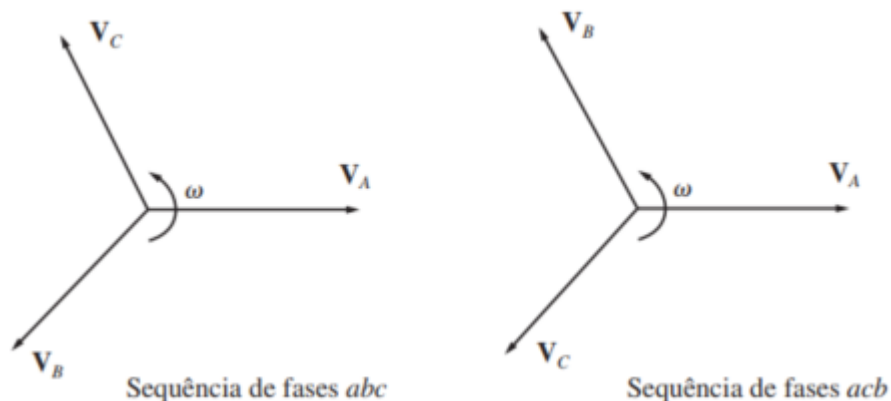
# Operação em Paralelo

## ■ Condições 1 e 3, são naturais:

- As tensões devem ser iguais e as fases *a* de ambos os geradores, deve ser idêntica;



## ■ Sobre a mesma sequência de fases (2):





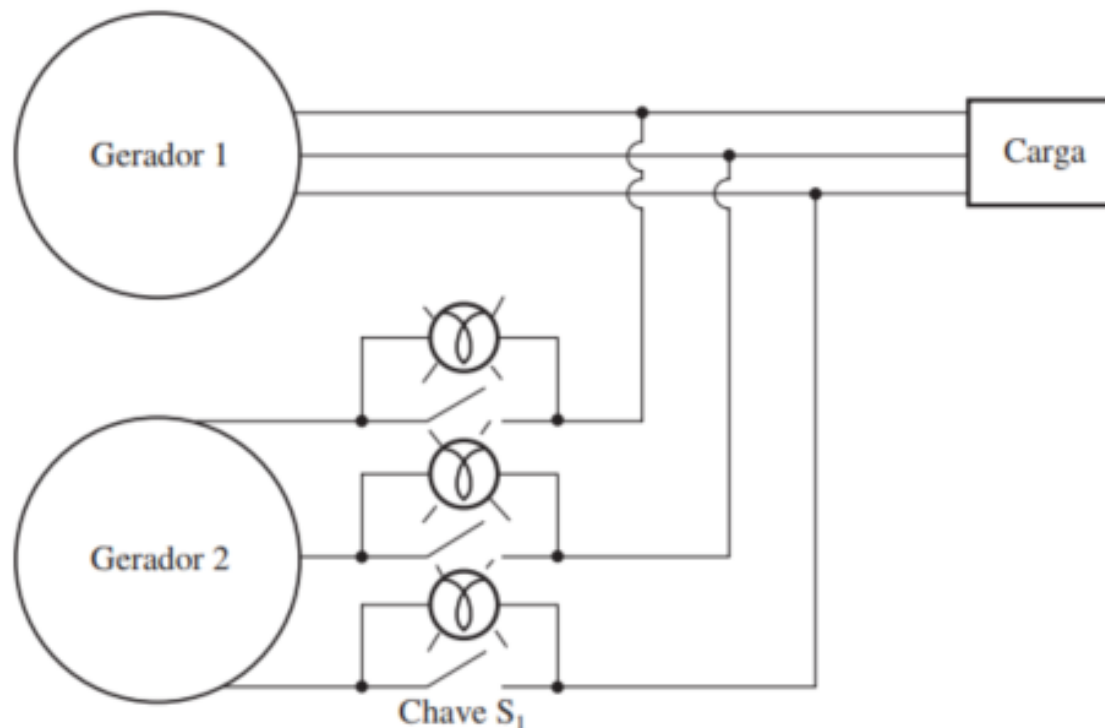
---

# Operação em Paralelo

- Como verificar a sequência de fases?

# Operação em Paralelo

- Como verificar a sequência de fases?
  - Método das 3 lâmpadas (incandescentes)
    - Lâmpadas brilham e apagam em conjunto – sistemas na mesma sequência de fases;



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

# Operação em Paralelo

## ■ Procedimento:

- 1 – ajustar a tensão terminal da máquina igual a tensão de linha do sistema em operação;

# Operação em Paralelo

## ■ Procedimento:

- ❑ 1 – ajustar a tensão terminal da máquina igual a tensão de linha do sistema em operação;
- ❑ 2 – verificar a sequência de fases – método das 3 lâmpadas: caso não estejam em fase, trocar duas fases da máquina;

# Operação em Paralelo

## ■ Procedimento:

- ❑ 1 – ajustar a tensão terminal da máquina igual a tensão de linha do sistema em operação;
- ❑ 2 – verificar a sequência de fases – método das 3 lâmpadas: caso não estejam em fase, trocar duas fases da máquina;
- ❑ 3 – ajustar a frequência do gerador entrando em paralelo, para uma frequência ligeiramente superior a do sistema;

# Operação em Paralelo

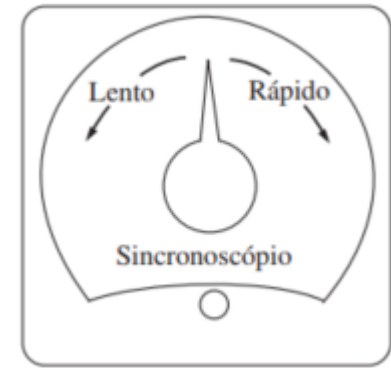
## ■ Procedimento:

- ❑ 1 – ajustar a tensão terminal da máquina igual a tensão de linha do sistema em operação;
- ❑ 2 – verificar a sequência de fases – método das 3 lâmpadas: caso não estejam em fase, trocar duas fases da máquina;
- ❑ 3 – ajustar a frequência do gerador entrando em paralelo, para uma frequência ligeiramente superior a do sistema;
- ❑ 4 – verificar se as tensões estão em fase – método das 3 lâmpadas: se as lâmpadas se apagarem em conjunto, tensões em fase, pode conectar o gerador.

# Operação em Paralelo

## ■ No quarto passo:

- Utiliza-se o sincronoscópio

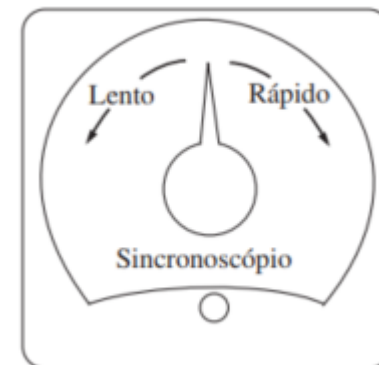


- Sincronoscópio verifica relações de apenas uma fase e não dá informação sobre sequência de fases;

# Operação em Paralelo

## ■ No quarto passo:

- Utiliza-se o sincronoscópio



- Sincronoscópio verifica relações de apenas uma fase e não dá informação sobre sequência de fases;

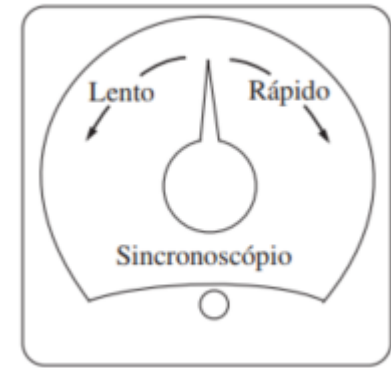
## ■ Em geradores de grande porte:

- Procedimento é automatizado
- Em grandes usinas todo procedimento de entrada e saída de geradores é automatizado



# Operação em Paralelo

- No quarto passo:
  - ❑ Utiliza-se o sincronoscópio
  - ❑ Sincronoscópio verifica relações de apenas uma fase e não dá informação sobre sequência de fases;
- Em geradores de grande porte:
  - ❑ Procedimento é automatizado
  - ❑ Em grandes usinas todo procedimento de entrada e saída de geradores é automatizado
- Geradores em laboratório: procedimento manual



# Operação em Paralelo

- Máquina primária
  - Controle interno para reduzir a queda de velocidade

# Operação em Paralelo

- Máquina primária

- Controle interno para reduzir a queda de velocidade

$$QV = \frac{n_0 - n_{pc}}{n_{pc}} \times 100\%$$

- Entre 2% e 4%

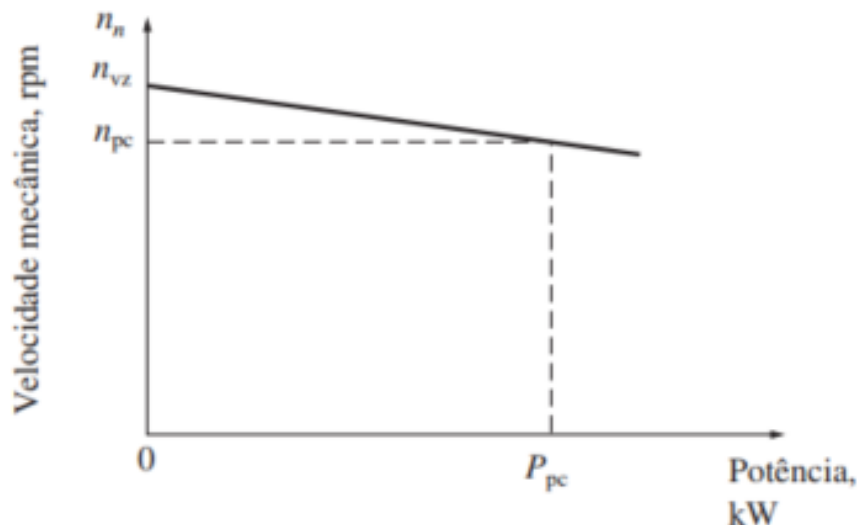
# Operação em Paralelo

## ■ Máquina primária

- Controle interno para reduzir a queda de velocidade

$$QV = \frac{n_0 - n_{pc}}{n_{pc}} \times 100\%$$

- Entre 2% e 4%



$$f = \frac{n_s P}{120} \text{ (Hz)}$$

Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

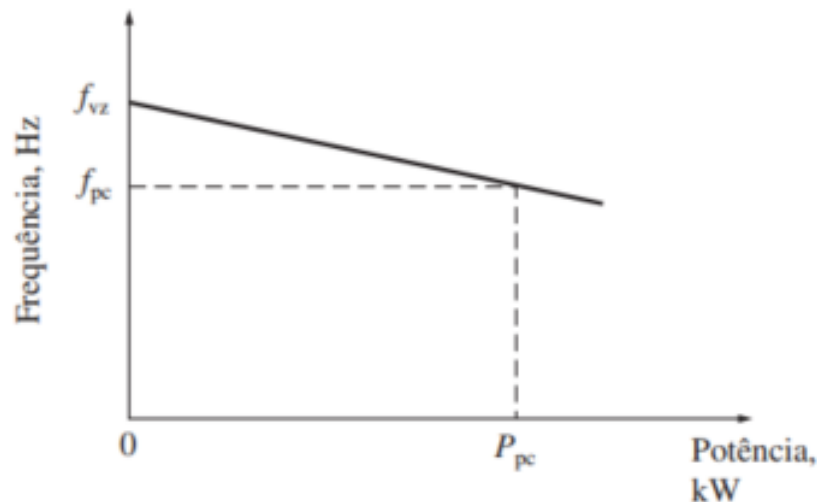
# Operação em Paralelo

## ■ Máquina primária

- Controle interno para reduzir a queda de velocidade

$$QV = \frac{n_0 - n_{pc}}{n_{pc}} \times 100\%$$

- Entre 2% e 4%



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

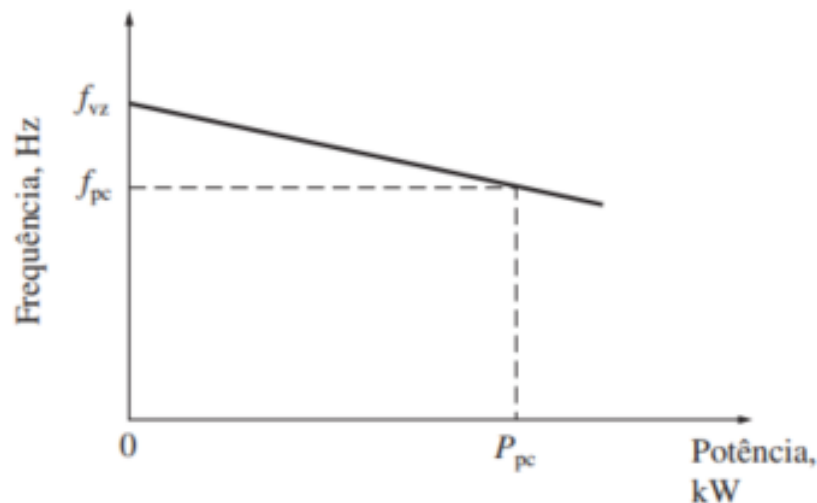
# Operação em Paralelo

## ■ Máquina primária

- Controle interno para reduzir a queda de velocidade

$$QV = \frac{n_0 - n_{pc}}{n_{pc}} \times 100\%$$

- Entre 2% e 4%



$$P_{eixo} = m_p \cdot (f_{vz} - f_{sis})$$

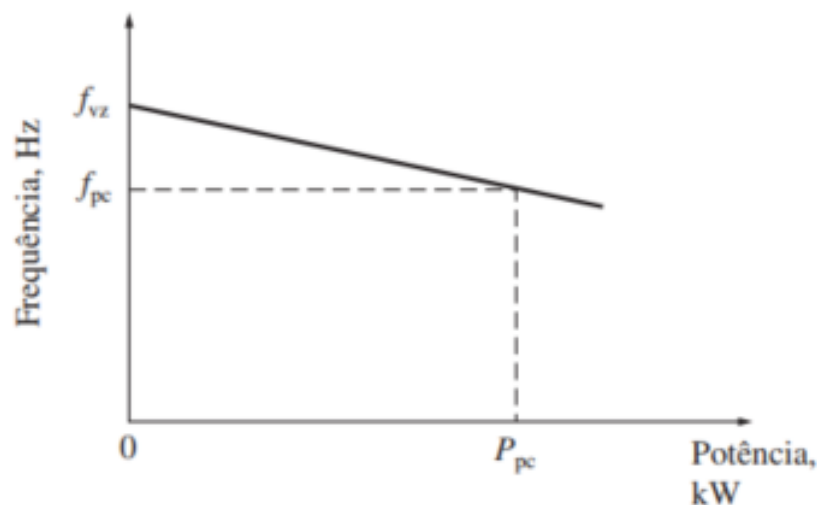
# Operação em Paralelo

## ■ Máquina primária

- Controle interno para reduzir a queda de velocidade

$$QV = \frac{n_0 - n_{pc}}{n_{pc}} \times 100\%$$

- Entre 2% e 4%



$$P_{eixo} = m_p \cdot (f_{vz} - f_{sis})$$

$$m_p = \frac{f_{vz} - f_{pc}}{0 - P_{pc}} = - \frac{f_{vz} - f_{pc}}{P_{pc}}$$

# Operação em Paralelo

- Relação entre potência reativa e tensão terminal
  - Característica dessa relação não é intrinsecamente linear

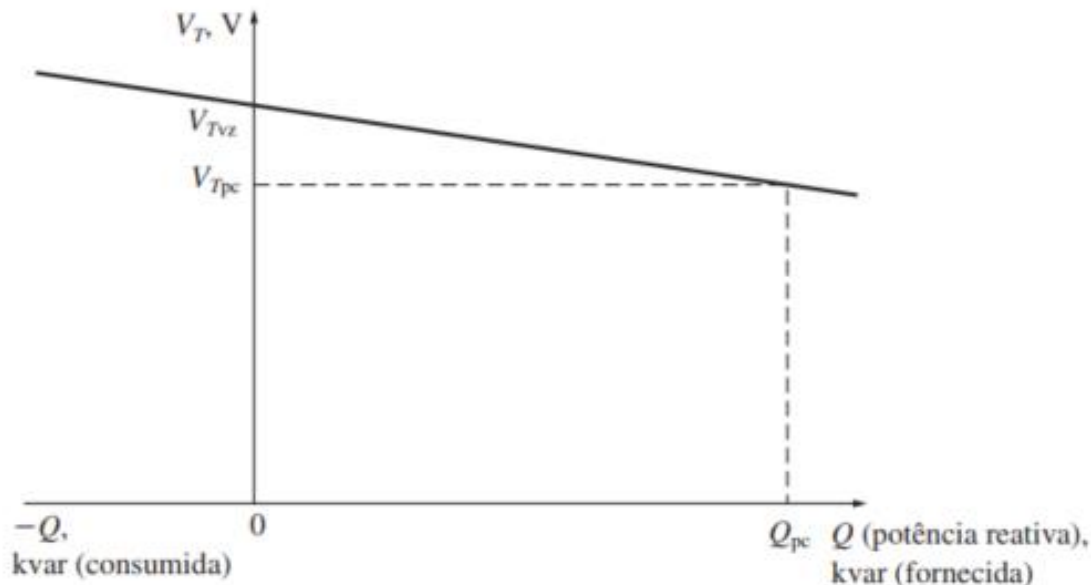


# Operação em Paralelo

- Relação entre potência reativa e tensão terminal
  - Característica dessa relação não é intrinsecamente linear
  - Mas reguladores de tensão do gerador tem recursos que tornam a relação linear

# Operação em Paralelo

- Relação entre potência reativa e tensão terminal
  - Característica dessa relação não é intrinsecamente linear
  - Mas reguladores de tensão do gerador tem recursos que tornam a relação linear



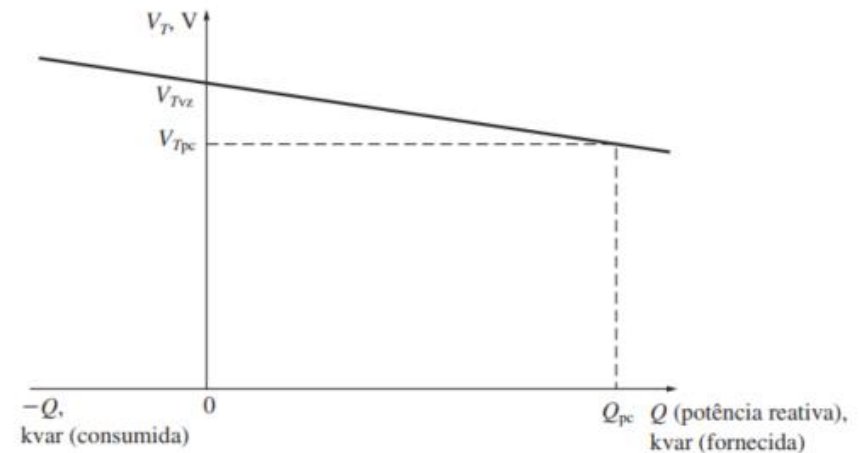
Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

# Operação em Paralelo

- Relação entre potência reativa e tensão terminal
  - Relação linear:

# Operação em Paralelo

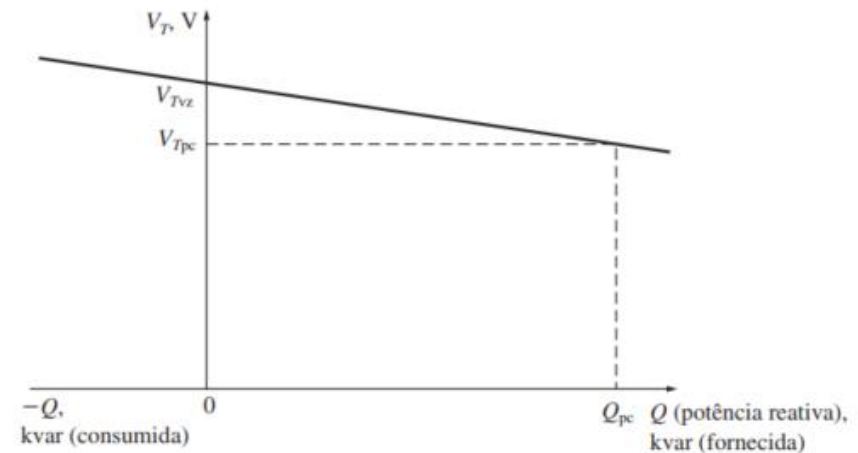
- Relação entre potência reativa e tensão terminal
  - Relação linear:



# Operação em Paralelo

- Relação entre potência reativa e tensão terminal
  - Relação linear:

$$Q = m_Q \cdot (V_{t-vz} - V_{t-sis})$$

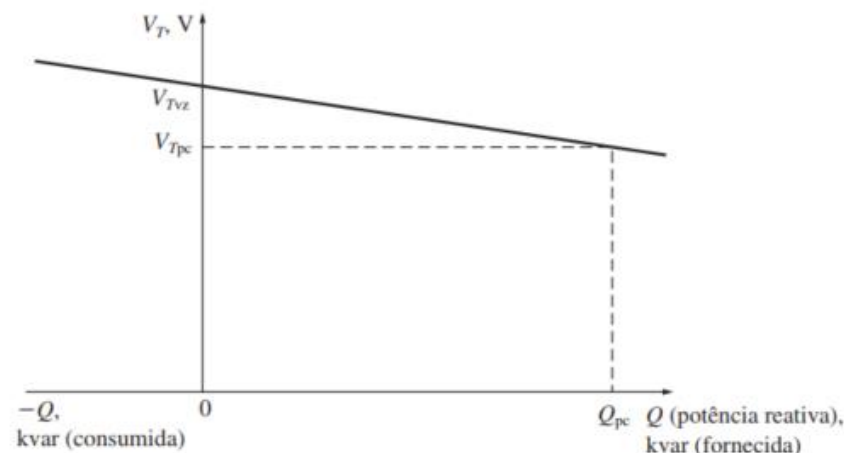


# Operação em Paralelo

- Relação entre potência reativa e tensão terminal
  - Relação linear:

$$Q = m_Q \cdot (V_{t-vz} - V_{t-sis})$$

$$m_Q = \frac{V_{t-vz} - V_{t-pc}}{0 - Q_{pc}} = - \frac{V_{t-vz} - V_{t-pc}}{Q_{pc}}$$



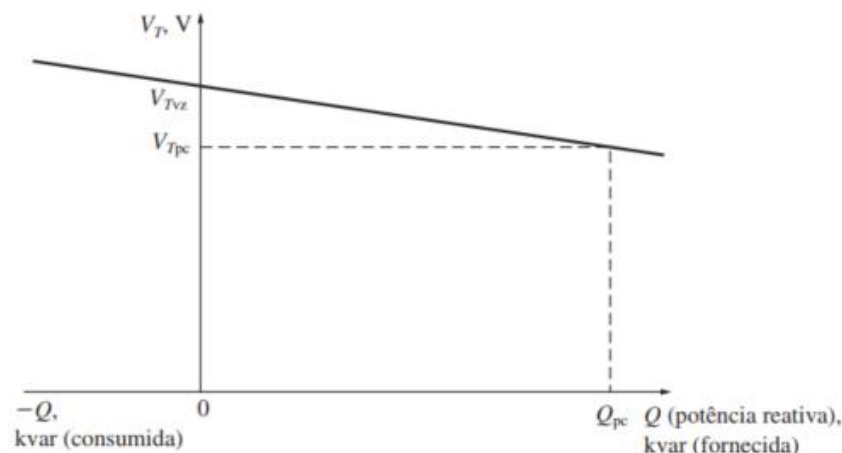
# Operação em Paralelo

## ■ Relação entre potência reativa e tensão terminal

### □ Relação linear:

$$Q = m_Q \cdot (V_{t-vz} - V_{t-sis})$$

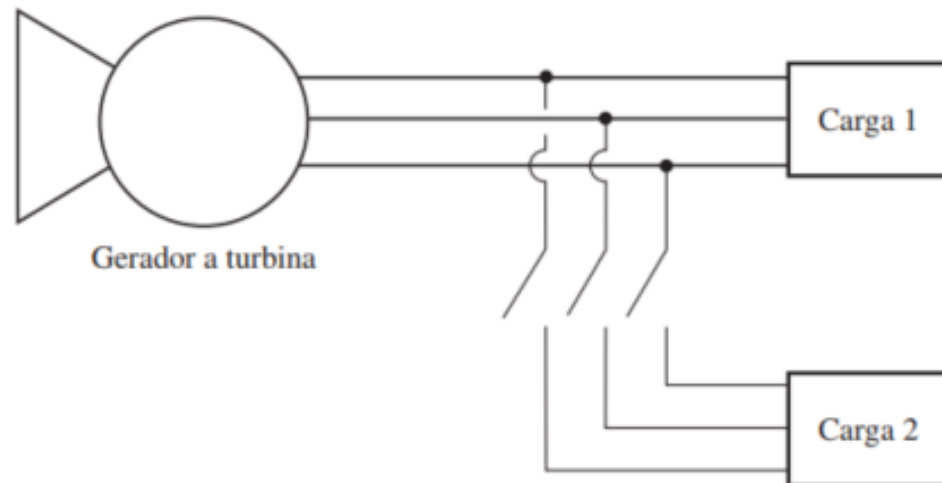
$$m_Q = \frac{V_{t-vz} - V_{t-pc}}{0 - Q_{pc}} = - \frac{V_{t-vz} - V_{t-pc}}{Q_{pc}}$$



- Para uma **potência ativa** qualquer, o regulador controla a frequência de operação do gerador e para uma **potência reativa** qualquer, a corrente de campo controla a tensão terminal do gerador

# Exemplo 7

A figura abaixo mostra um gerador alimentando uma carga. Uma segunda carga deve ser ligada em paralelo com a primeira. O gerador tem uma frequência sem carga de 61 Hz e uma inclinação  $s_p$  de 1 MW/Hz. A carga 1 consome uma potência ativa de 1000 kW, com FP 0,8 indutivo, ao passo que a carga 2 consome uma potência ativa de 800 kW, com FP 0,707 atrasado. (a) Antes que a chave seja fechada, qual é a frequência de operação do sistema?



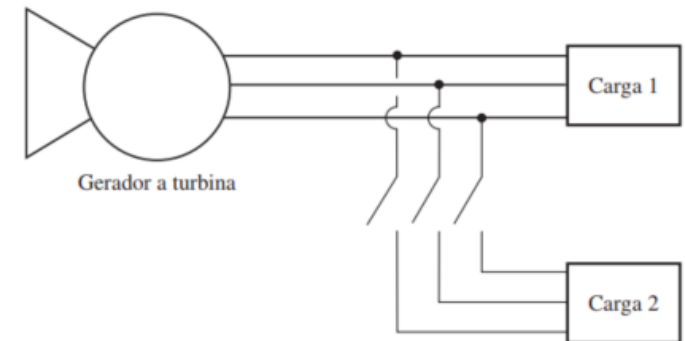


# Exemplo 7

A figura abaixo mostra um gerador alimentando uma carga. Uma segunda carga deve ser ligada em paralelo com a primeira. O gerador tem uma frequência sem carga de 61 Hz e uma inclinação  $s_p$  de 1 MW/Hz. A carga 1 consome uma potência ativa de 1000 kW, com FP 0,8 indutivo, ao passo que a carga 2 consome uma potência ativa de 800 kW, com FP 0,707 atrasado. (a) Antes que a chave seja fechada, qual é a frequência de operação do sistema?

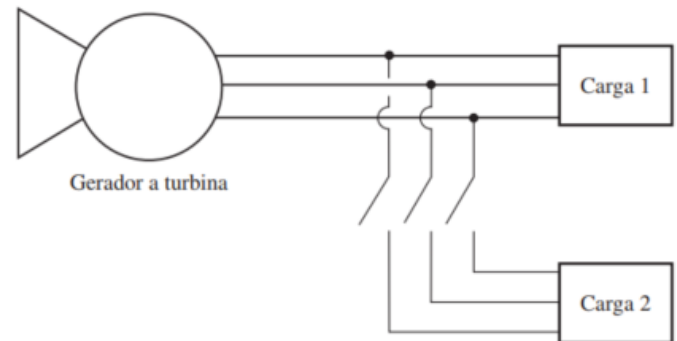
$$P = s_p (f_{vz} - f_{sis}) \rightarrow f_{sis} = f_{vz} - \frac{P}{s_p}$$

$$f_{sis} = 61 - \frac{1000 \text{ kW}}{1000 \text{ kW/Hz}} = 60 \text{ Hz}$$



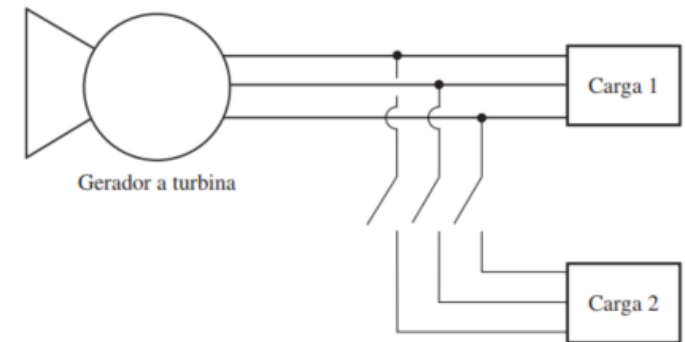
# Exemplo 7

A figura abaixo mostra um gerador alimentando uma carga. Uma segunda carga deve ser ligada em paralelo com a primeira. O gerador tem uma frequência sem carga de 61 Hz e uma inclinação  $s_p$  de 1 MW/Hz. A carga 1 consome uma potência ativa de 1000 kW, com FP 0,8 indutivo, ao passo que a carga 2 consome uma potência ativa de 800 kW, com FP 0,707 atrasado. (b) Depois que a carga 2 é ligada, qual é a frequência de operação do sistema?



# Exemplo 7

A figura abaixo mostra um gerador alimentando uma carga. Uma segunda carga deve ser ligada em paralelo com a primeira. O gerador tem uma frequência sem carga de 61 Hz e uma inclinação  $s_p$  de 1 MW/Hz. A carga 1 consome uma potência ativa de 1000 kW, com FP 0,8 indutivo, ao passo que a carga 2 consome uma potência ativa de 800 kW, com FP 0,707 atrasado. (b) Depois que a carga 2 é ligada, qual é a frequência de operação do sistema?

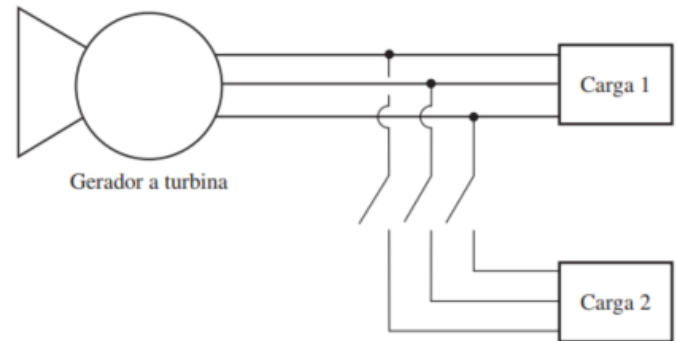


$$P = s_p (f_{vz} - f_{sis}) \rightarrow f_{sis} = f_{vz} - \frac{P}{s_p}$$

$$f_{sis} = 61 - \frac{1800 \text{ kW}}{1000 \text{ kW/Hz}} = 61 - 1,8 = 59,2 \text{ Hz}$$

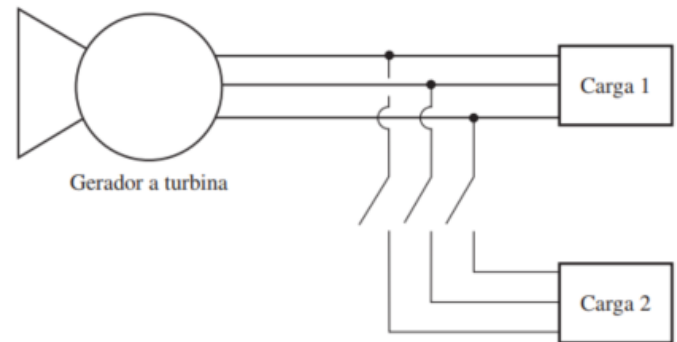
# Exemplo 7

A figura abaixo mostra um gerador alimentando uma carga. Uma segunda carga deve ser ligada em paralelo com a primeira. O gerador tem uma frequência sem carga de 61 Hz e uma inclinação  $s_p$  de 1 MW/Hz. A carga 1 consome uma potência ativa de 1000 kW, com FP 0,8 indutivo, ao passo que a carga 2 consome uma potência ativa de 800 kW, com FP 0,707 atrasado. (c) Depois que a carga 2 é ligada, que ação um operador poderá realizar para que a frequência do sistema retorne a 60 Hz?



# Exemplo 7

A figura abaixo mostra um gerador alimentando uma carga. Uma segunda carga deve ser ligada em paralelo com a primeira. O gerador tem uma frequência sem carga de 61 Hz e uma inclinação  $s_p$  de 1 MW/Hz. A carga 1 consome uma potência ativa de 1000 kW, com FP 0,8 indutivo, ao passo que a carga 2 consome uma potência ativa de 800 kW, com FP 0,707 atrasado. (c) Depois que a carga 2 é ligada, que ação um operador poderá realizar para que a frequência do sistema retorne a 60 Hz?



Operador reajusta o regulador, incrementando a frequência a vazio em 0,8 Hz, elevando-a para 61,8 Hz.

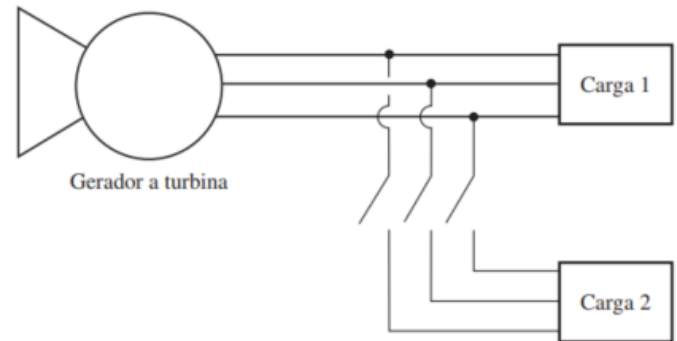
Esta ação leva a frequência do sistema de volta para 60 Hz.

# Exemplo 7

A figura abaixo mostra um gerador alimentando uma carga. Uma segunda carga deve ser ligada em paralelo com a primeira. O gerador tem uma frequência sem carga de 61 Hz e uma inclinação  $s_p$  de 1 MW/Hz. A carga 1 consome uma potência ativa de 1000 kW, com FP 0,8 indutivo, ao passo que a carga 2 consome uma potência ativa de 800 kW, com FP 0,707 atrasado. (c) Depois que a carga 2 é ligada, que ação um operador poderá realizar para que a frequência do sistema retorne a 60 Hz?

$$P = s_p (f_{vz} - f_{sis}) \rightarrow f_{sis} = f_{vz} - \frac{P}{s_p}$$

$$f_{sis} = 61,8 - \frac{1800 \text{ kW}}{1000 \text{ kW/Hz}} = 61,8 - 1,8 = 60 \text{ Hz}$$



Operador reajusta o regulador, incrementando a frequência a vazio em 0,8 Hz, elevando-a para 61,8 Hz.

Esta ação leva a frequência do sistema de volta para 60 Hz.

# Operação em Paralelo

- Resumo, operação isolado:
  - Potências ativas e reativa fornecida pelo gerador
    - São valores demandados pelas cargas conectadas.

# Operação em Paralelo

- Resumo, operação isolado:
  - Potências ativas e reativa fornecida pelo gerador
    - São valores demandados pelas cargas conectadas.
  - Ponto de ajuste do regulador
    - Controla a frequência de operação do sistema de potência.



# Operação em Paralelo

- Resumo, operação isolado:
  - Potências ativas e reativa fornecida pelo gerador
    - São valores demandados pelas cargas conectadas.
  - Ponto de ajuste do regulador
    - Controla a frequência de operação do sistema de potência.
  - Corrente de campo (ponto de ajuste de campo no regulador)
    - Controla a tensão terminal do sistema de potência.

# Operação em Paralelo

- Resumo, operação isolado:
  - Potências ativas e reativa fornecida pelo gerador
    - São valores demandados pelas cargas conectadas.
  - Ponto de ajuste do regulador
    - Controla a frequência de operação do sistema de potência.
  - Corrente de campo (ponto de ajuste de campo no regulador)
    - Controla a tensão terminal do sistema de potência.
- Como será a operação de geradores em paralelo em grandes sistemas de potência?

# Operação em Paralelo

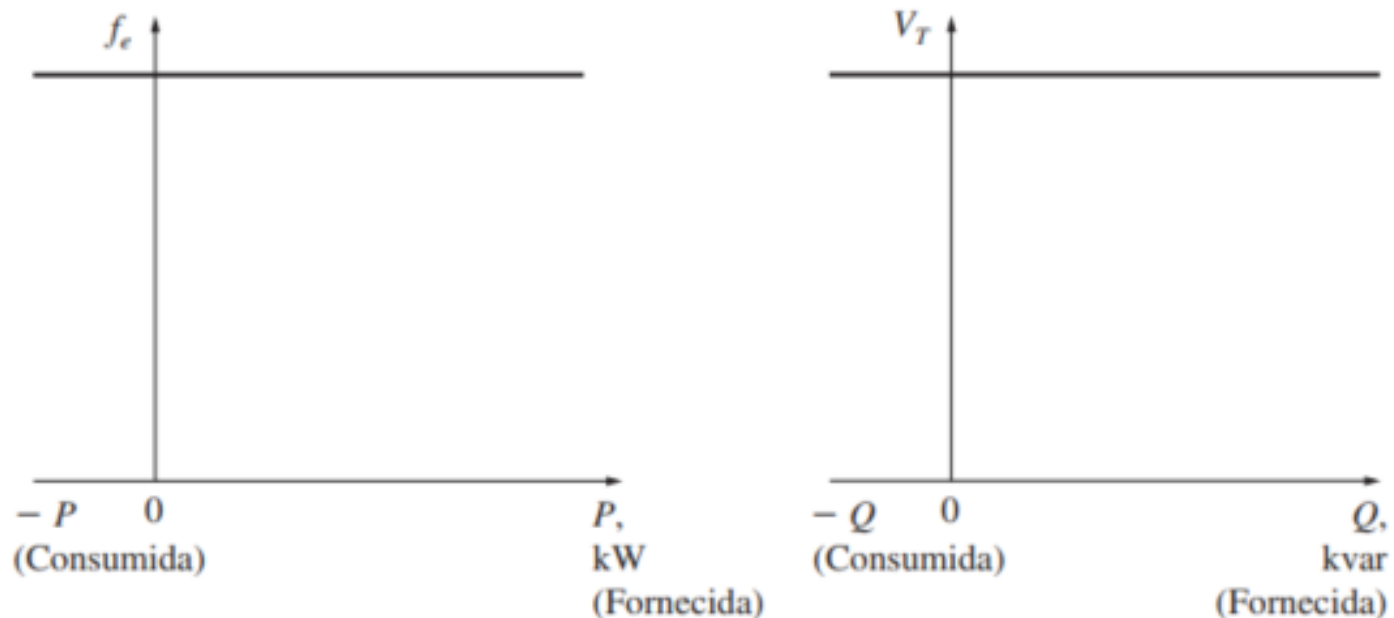
- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Barramento infinito

# Operação em Paralelo

- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Barramento infinito
    - Tensão e frequência não variam.

# Operação em Paralelo

- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Barramento infinito
    - Tensão e frequência não variam.



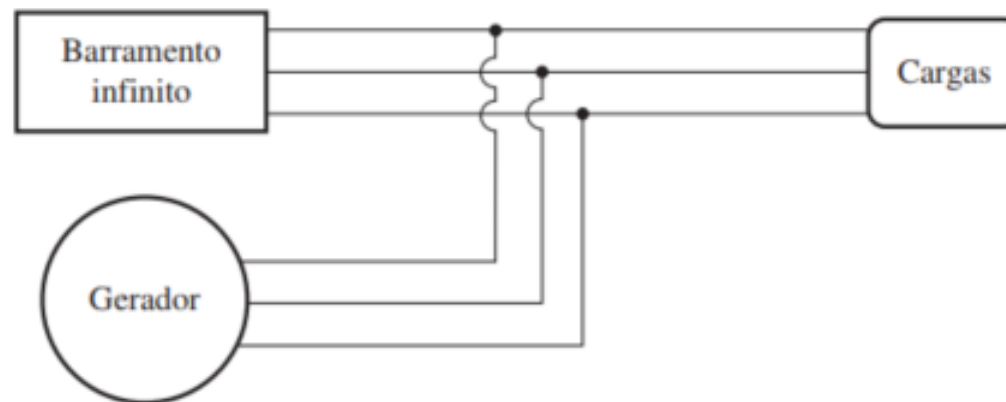
Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

# Operação em Paralelo

- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Barramento infinito
    - Tensão e frequência não variam.
  - Para este caso, é mais fácil explicar o funcionamento, sem levar em conta o regulador
    - Controle da corrente de campo “manual”.

# Operação em Paralelo

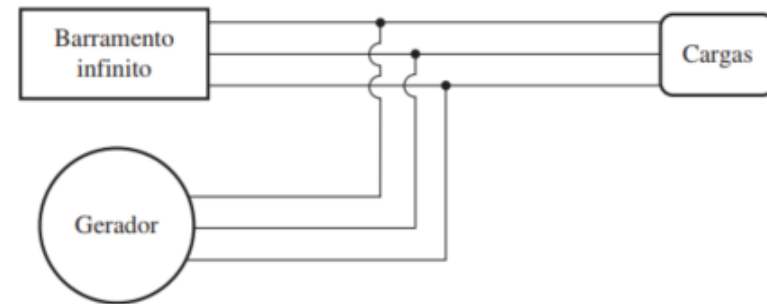
- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Barramento infinito
    - Tensão e frequência não variam.
  - Para este caso, é mais fácil explicar o funcionamento, sem levar em conta o regulador
    - Controle da corrente de campo “manual”.



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

# Operação em Paralelo

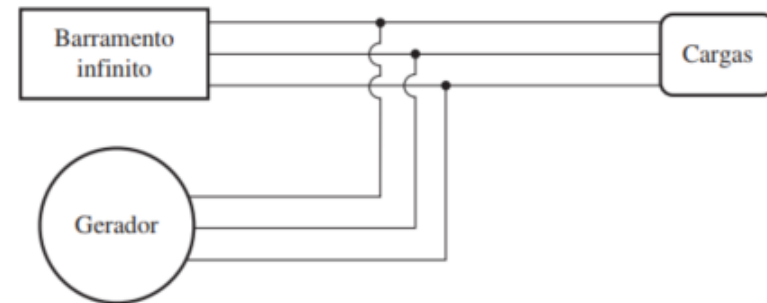
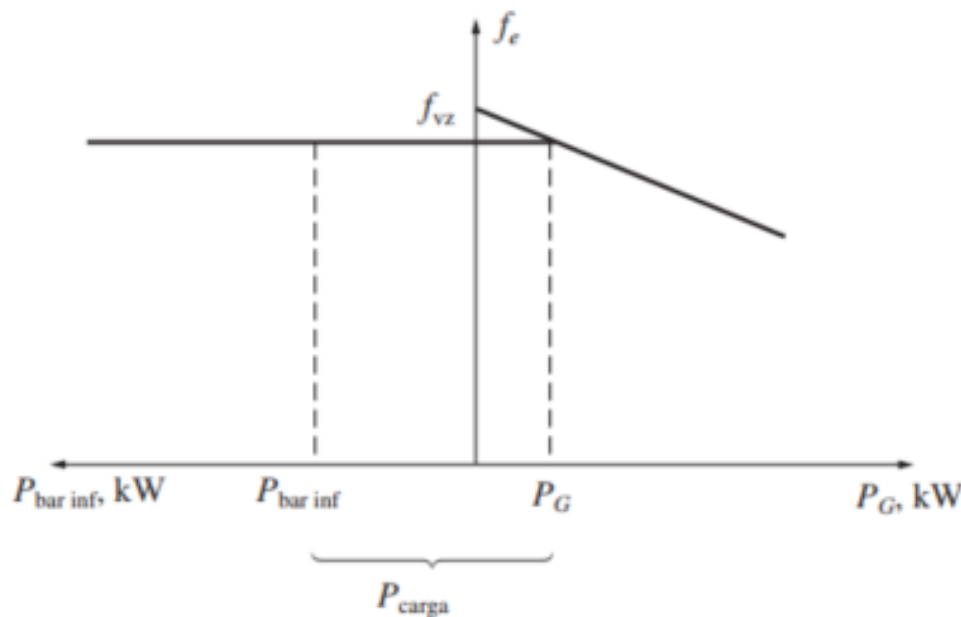
- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Ao conectar os geradores em paralelo, frequência e tensão terminal devem ser iguais.





# Operação em Paralelo

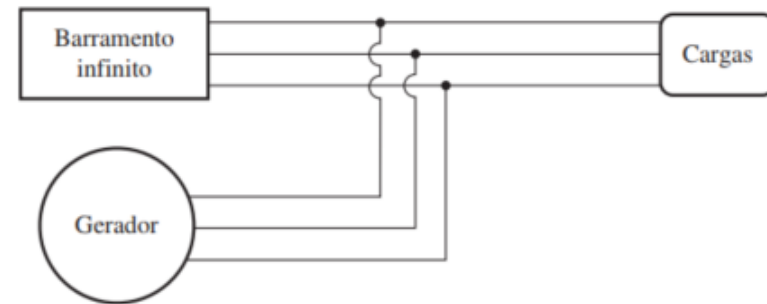
- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Ao conectar os geradores em paralelo, frequência e tensão terminal devem ser iguais.



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

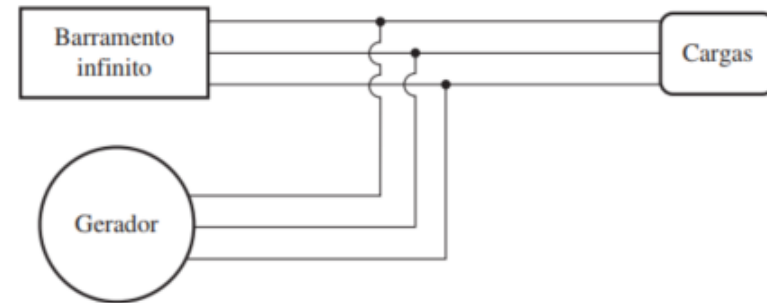
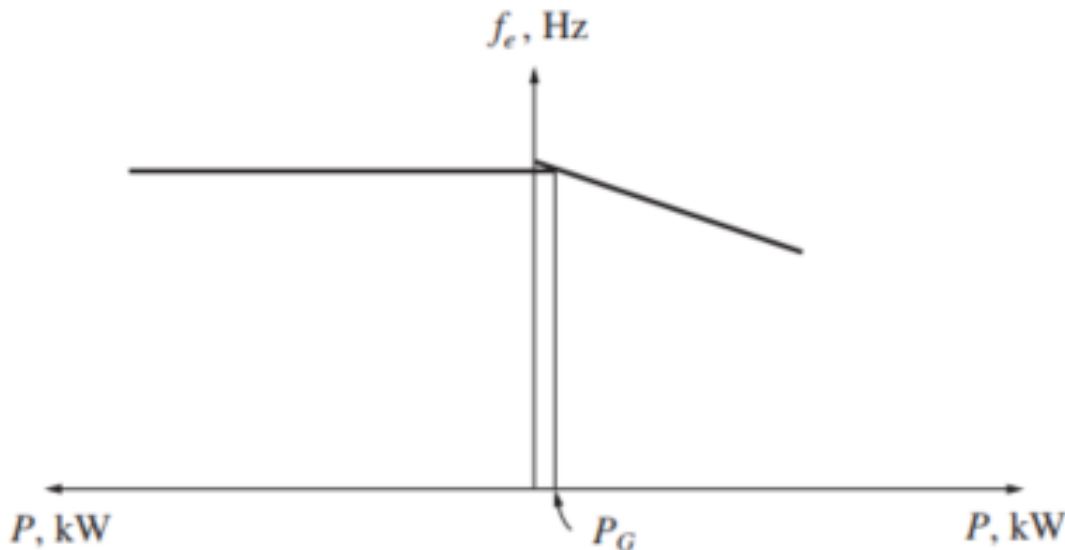
# Operação em Paralelo

- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Após entrada na rede, com frequência ligeiramente superior:



# Operação em Paralelo

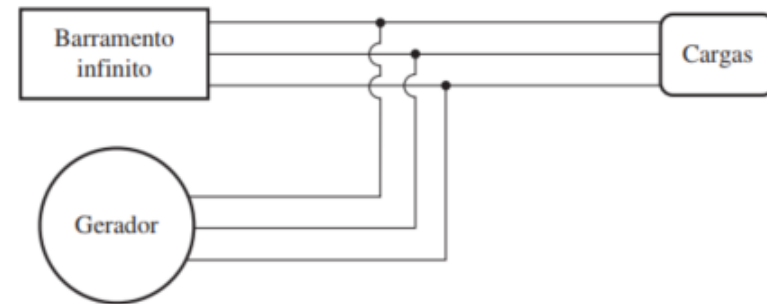
- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Após entrada na rede, com frequência ligeiramente superior:



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

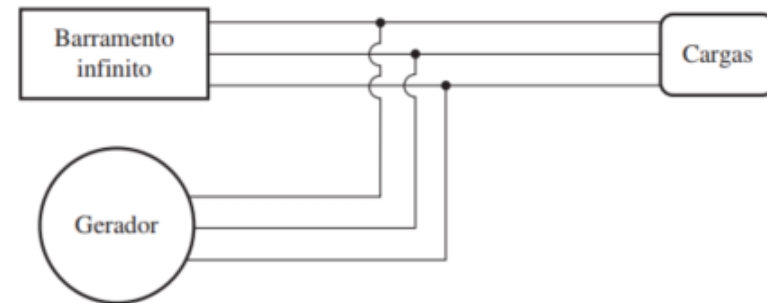
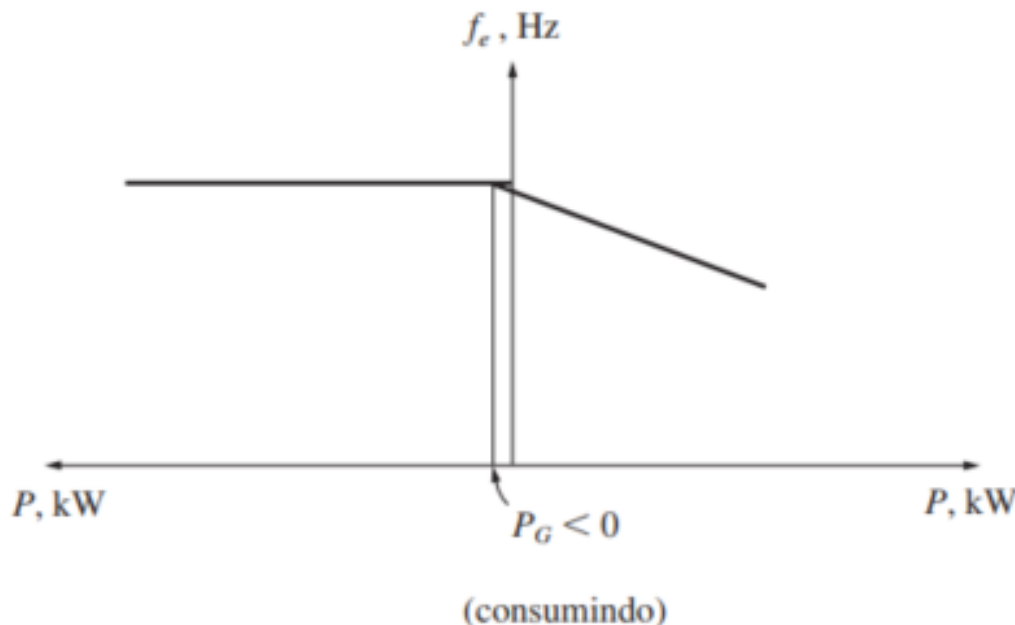
# Operação em Paralelo

- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Após entrada na rede, com frequência ligeiramente inferior:



# Operação em Paralelo

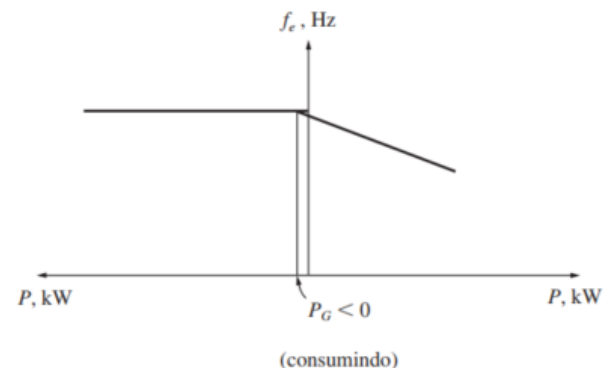
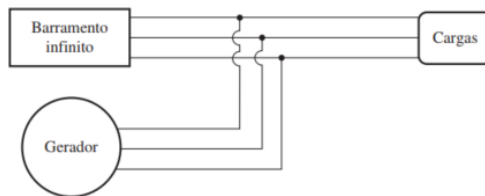
- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Após entrada na rede, com frequência ligeiramente inferior:



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

# Operação em Paralelo

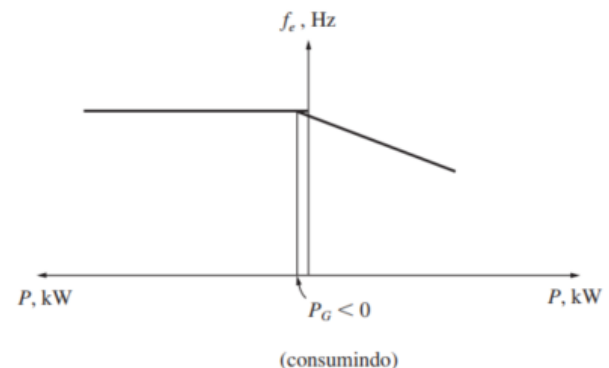
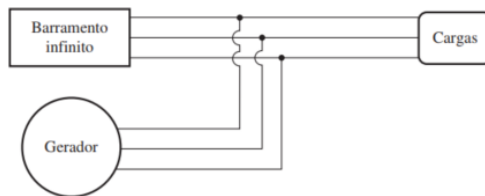
- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Após entrada na rede, com frequência ligeiramente inferior
    - Entra com função motor



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

# Operação em Paralelo

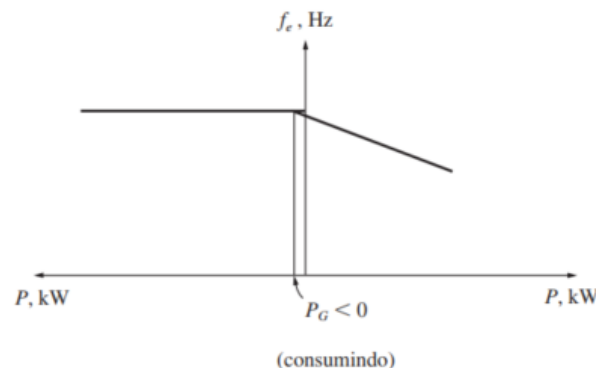
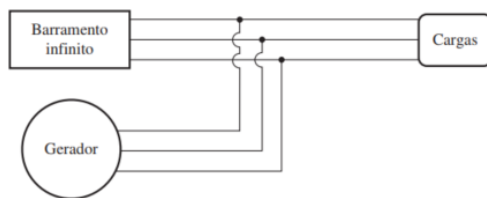
- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Após entrada na rede, com frequência ligeiramente inferior
    - Entra com função motor
    - Sistema de proteção ativo contra entrada da máquina como motor



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

# Operação em Paralelo

- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Após entrada na rede, com frequência ligeiramente inferior
    - Entra com função motor
    - Sistema de proteção ativo contra entrada da máquina como motor
  - Sequência: incrementar o ponto de ajuste do regulador?



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

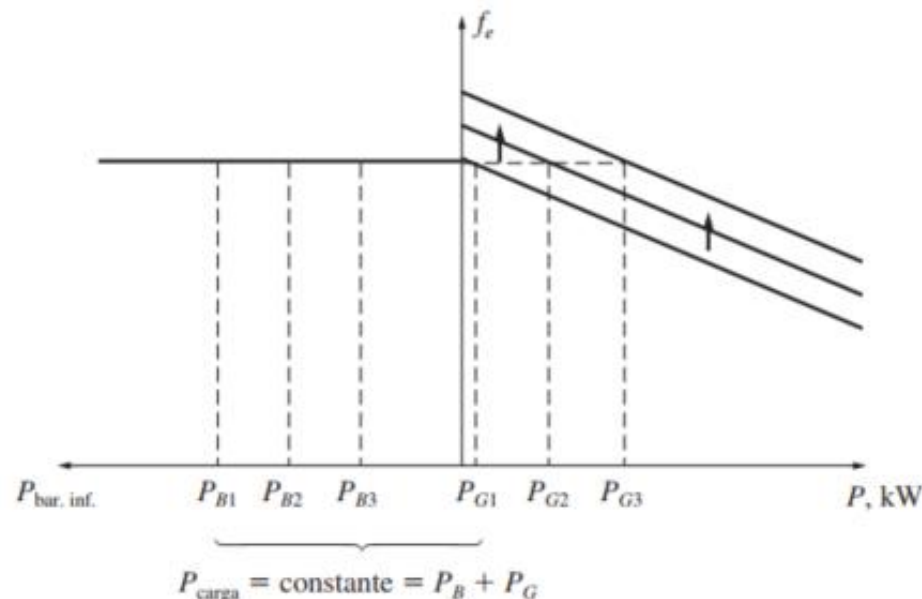


# Operação em Paralelo

- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Incrementar o ponto de ajuste do regulador após entrada em paralelo com o sistema

# Operação em Paralelo

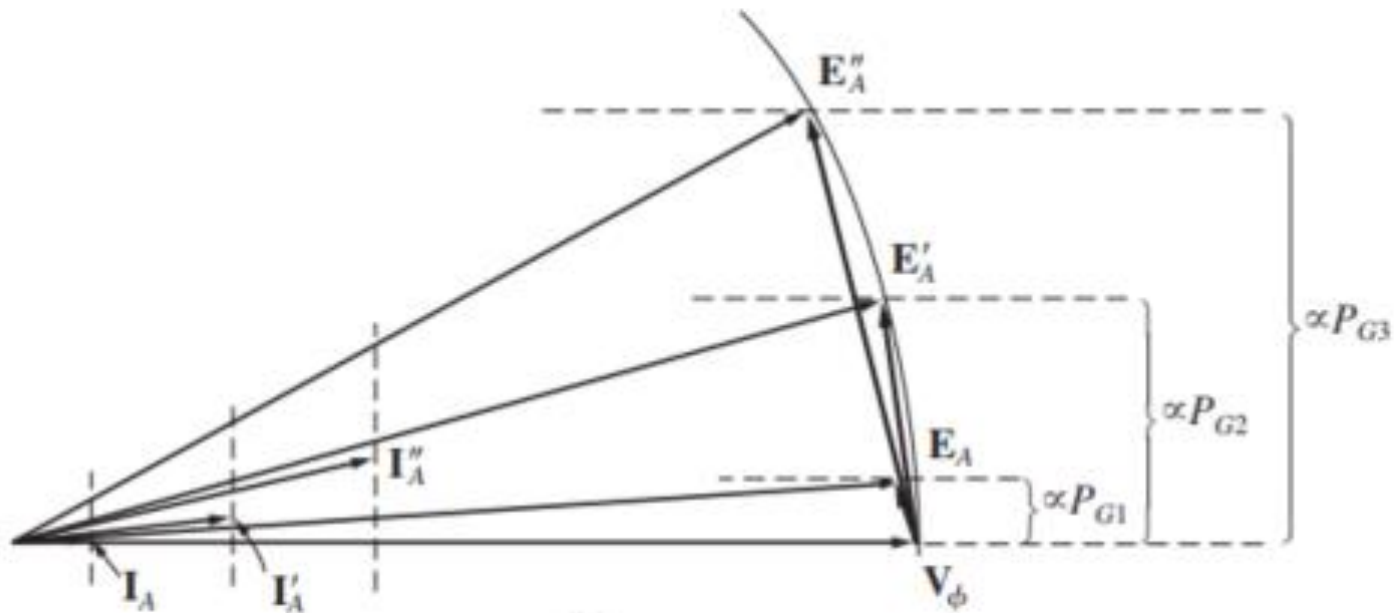
- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Incrementar o ponto de ajuste do regulador após entrada em paralelo com o sistema
    - Desloca a frequência a vazio do gerador para maiores valores



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

# Operação em Paralelo

- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Incrementar o ponto de ajuste do regulador após entrada em paralelo com o sistema

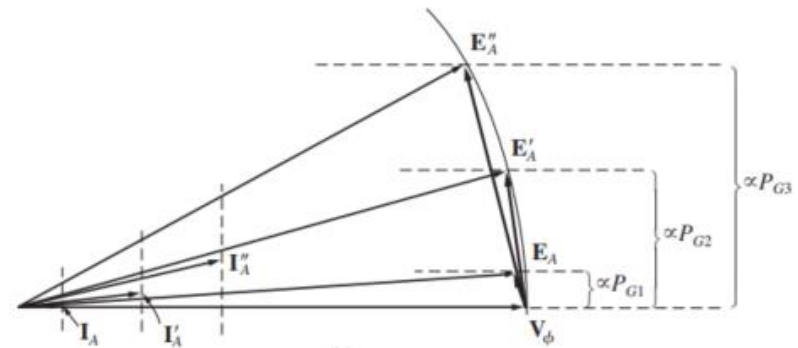


Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

# Operação em Paralelo

- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Incrementar o ponto de ajuste do regulador após entrada em paralelo com o sistema

$$P \propto E_{af} \cdot \sin(\delta)$$



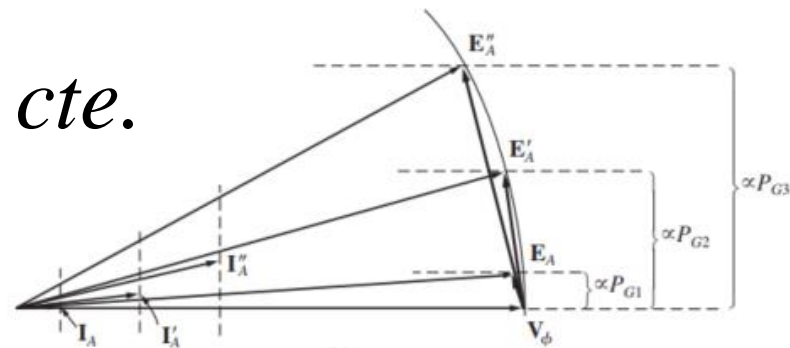
Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

# Operação em Paralelo

- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Incrementar o ponto de ajuste do regulador após entrada em paralelo com o sistema

$$P \propto E_{af} \cdot \sin(\delta)$$

$$E_{af} = cte. \rightarrow I_f = cte. \rightarrow \omega_m = cte.$$



# Operação em Paralelo

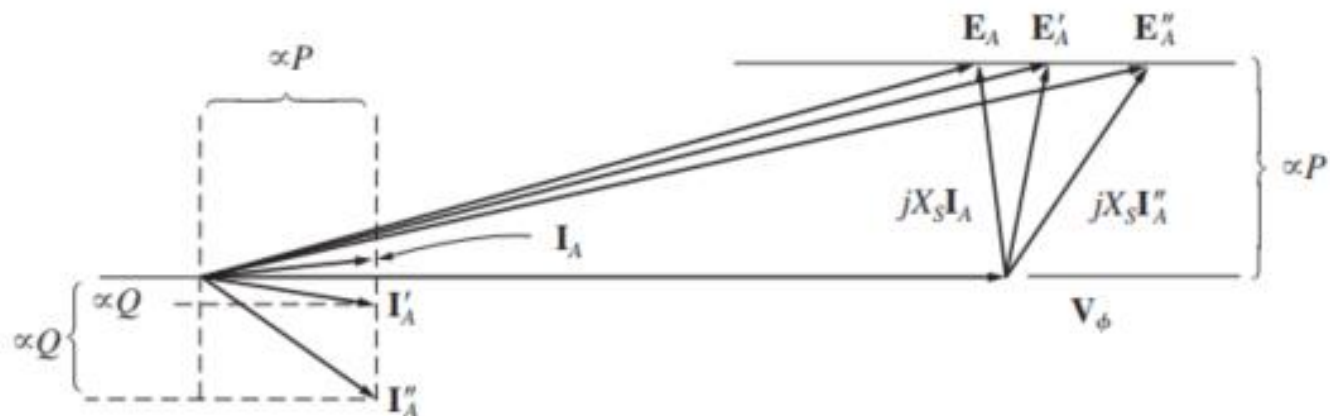
- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - O que acontece se o gerador enviar mais potência que a demanda?

# Operação em Paralelo

- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - O que acontece se o gerador enviar mais potência que a demanda?
    - Potência excedente fluirá para o barramento infinito

# Operação em Paralelo

- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - O que acontece se o gerador enviar mais potência que a demanda?
    - Potência excedente fluirá para o barramento infinito
  - Depois da potência ativa ajustada para o valor desejado



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.



# Operação em Paralelo

- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Depois da potência ativa ajustada para o valor desejado
    - Primeira restrição: potência ativa constante

# Operação em Paralelo

- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Depois da potência ativa ajustada para o valor desejado
    - Primeira restrição: potência ativa constante
    - Para determinado ponto de ajuste do regulador: a potência ativa se mantém constante.

# Operação em Paralelo

- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Depois da potência ativa ajustada para o valor desejado
    - Primeira restrição: potência ativa constante
    - Para determinado ponto de ajuste do regulador: a potência ativa se mantém constante.
    - Conectado ao barramento infinito: velocidade do rotor não se altera.

$$P \propto E_{af} \sin(\delta) = cte. \rightarrow P \propto I_a \cos(\theta) = cte.$$

# Operação em Paralelo

- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas
  - Depois da potência ativa ajustada para o valor desejado

$$P \propto E_{af} \sin(\delta) = cte. \rightarrow P \propto I_a \cos(\theta) = cte.$$

$$I_f \uparrow \Rightarrow \phi \uparrow \Rightarrow E_{af} \uparrow = K \cdot \phi \uparrow \cdot \omega$$

$$P \propto E_{af} \uparrow \sin(\delta \downarrow)$$

$$Q?$$

# Operação em Paralelo

- Em grandes sistemas de potência com fontes e cargas interligadas

- Aumento do fornecimento de potência reativa

$$P \propto E_{af} \sin(\delta) = cte. \rightarrow P \propto I_a \cos(\theta) = cte.$$

$$I_f \uparrow \Rightarrow \phi \uparrow \Rightarrow E_{af} \uparrow = K \cdot \phi \uparrow \cdot \omega$$

$$P \propto E_{af} \uparrow \sin(\delta \downarrow)$$

$$Q \uparrow \propto E_{af} \uparrow \cos(\delta \downarrow)$$

# Operação em Paralelo

- Resumo, operação em paralelo com um barramento infinito:
  - Frequência e tensão terminal do gerador
    - São controladas pelo sistema ao qual está ligado.

# Operação em Paralelo

- Resumo, operação em paralelo com um barramento infinito:
  - Frequência e tensão terminal do gerador
    - São controladas pelo sistema ao qual está ligado.
  - Ponto de ajuste do regulador
    - Controla a potência ativa fornecida pelo gerador ao sistema.

# Operação em Paralelo

- Resumo, operação em paralelo com um barramento infinito:
  - Frequência e tensão terminal do gerador
    - São controladas pelo sistema ao qual está ligado.
  - Ponto de ajuste do regulador
    - Controla a potência ativa fornecida pelo gerador ao sistema.
  - Corrente de campo do gerador
    - Controla a potência reativa fornecida pelo gerador ao sistema.
- E como operam geradores de fato em paralelo para atender a carga específica?





## **FIM** DO MÓDULO III – PARTE 3



# Avaliação

A ser descrito pelo professor/instrutor na plataforma SIGAA/UFERSA