Capítulo 8
Fluxo de carga c.a/c.c.

8.1 Introdução

- Um sistema de transmissão em corrente contínua (c.c.) que interliga dois sistemas de corrente alternada (c.a.) é chamado de elo de corrente contínua (elo c.c., do Inglês DC link).

- O primeiro sistema de transmissão de energia elétrica comercial usando HVDC (High Voltage Direct Current) foi o link de 98 km entre a Suécia continental e a ilha Gotland (Suécia) em 1954.

  O link operava em 100 kV, transmitindo 20 MW de potência.

  A justificativa para a implantação do link foi econômica: eliminação da construção de uma nova central térmica na ilha.

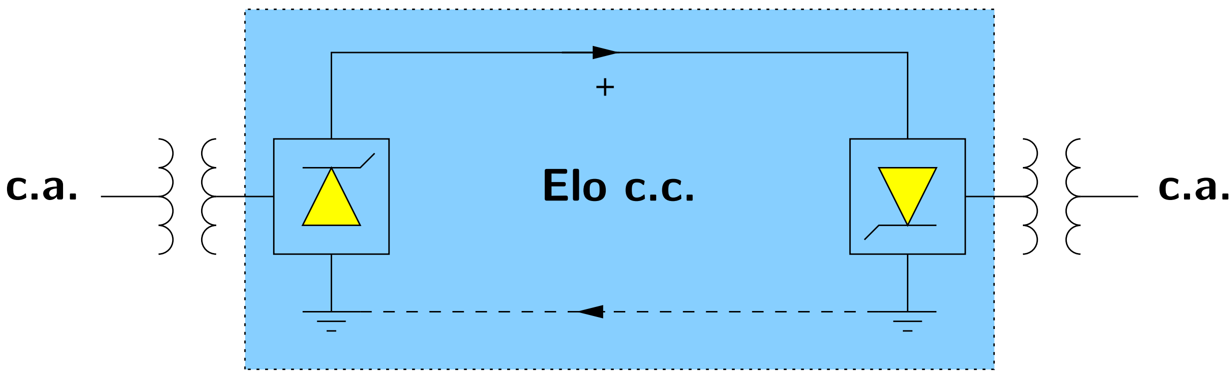
- Desde então as potências e as tensões de operação de links c.c. aumentaram muito (por exemplo, 6000 MW e $\pm$600 kV).

- Utilização de HVDC:

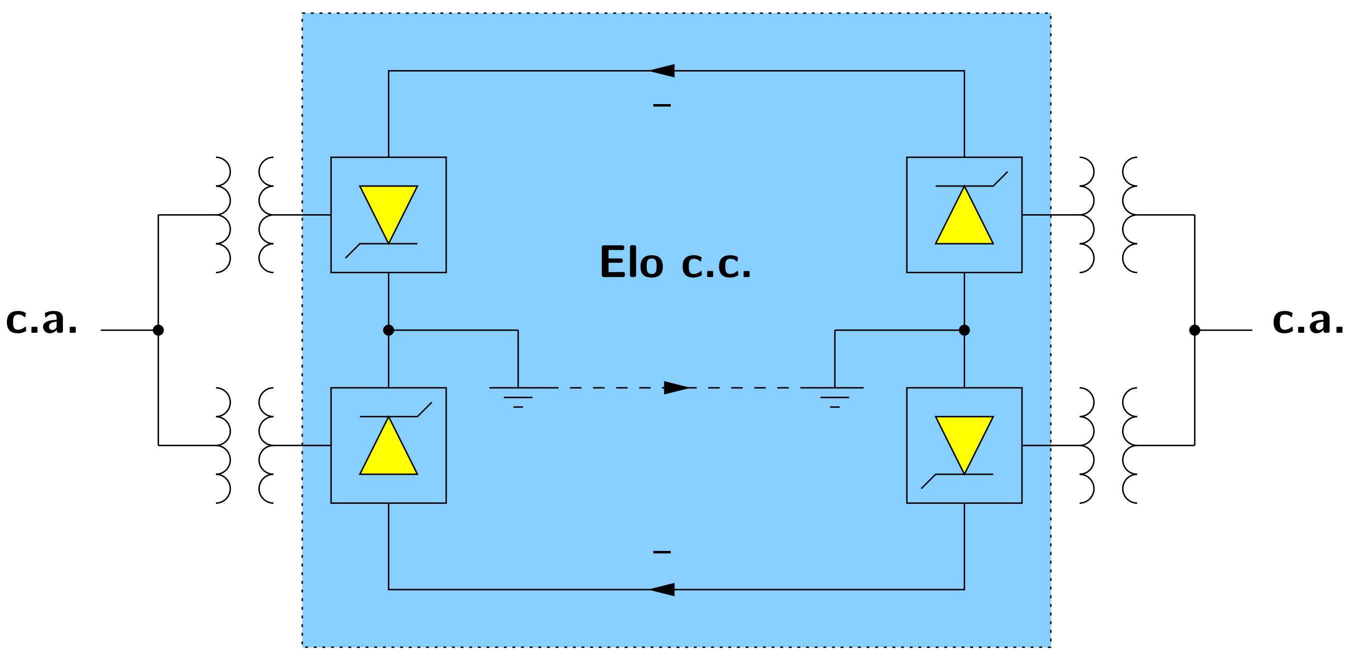
  - transmissão submarina.
  - transmissão aérea em longas distâncias.
  - amortecimento de oscilações (melhora da estabilidade).
  - interligação de sistemas com freqüências diferentes.
  - transmissão em longas distâncias em áreas metropolitanas.

8.2 Tipos de elos c.c.

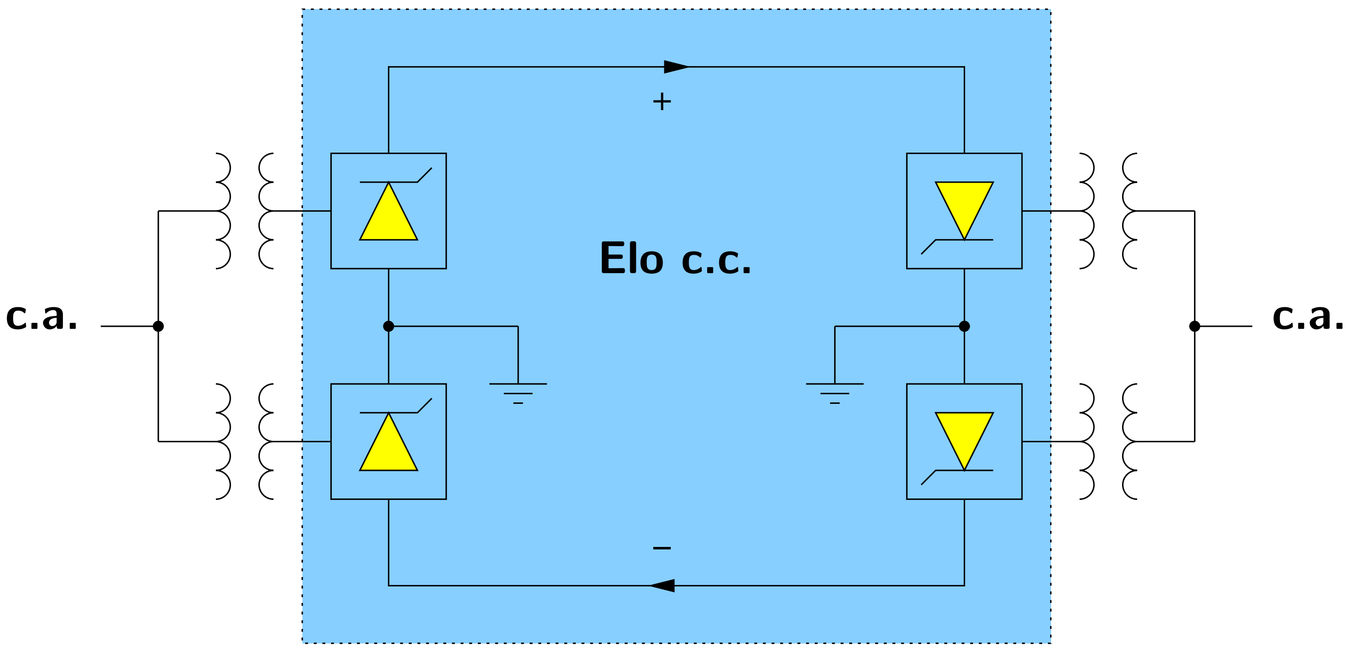
▶ **Elo monopolar: terra é usada como retorno de corrente.**



▶ **Elo homopolar: condutores com mesma polaridade (normalmente negativa) e retorno de corrente pela terra.**



- **Elo bipolar**: um condutor com tensão positiva e outro com negativa. A terra não é usada como retorno de corrente em condições normais de operação (em emergências isso pode ocorrer). Conversores ligados em série em cada lado.



8.3 Considerações sobre a transmissão em c.c.

8.3.1 Vantagens da transmissão em c.c.

- Menor número de condutores

  Torres menores e mais baratas

  Menores perdas

  Menor nível de isolação.

- **Comparação entre um sistema c.a. trifásico e um elo c.c. bipolar:**

  - **Potência c.a. (considerando fator de potência unitário)**

$$P_{ca} = \sqrt{3}\, V_\ell\, I_\ell$$

Potência c.c.

$$P_{cc} = 2\, V_d\, I_d$$

Para o sistema c.c. V_d é constante e, portanto, corresponde ao valor máximo:

$$V_d = V_{cc}^{\max}$$

Como o valor de pico da tensão de fase é $\sqrt{2}$ vezes maior que o respectivo valor eficaz (rms), tem-se:

$$V_\ell = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\, V_{ca}^{\max}$$

Considere que $V_{ca}^{\max} = V_{cc}^{\max}$ e que as potências transmitidas sejam as mesmas:

$$\begin{aligned}
P_{ca} &= P_{cc} \\
\sqrt{3}\, V_\ell\, I_\ell &= 2\, V_d\, I_d \\
\sqrt{3}\, \tfrac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\, V_{ca}^{\max}\, I_\ell &= 2\, V_{cc}^{\max}\, I_d \\
\tfrac{3}{2\sqrt{2}}\, I_\ell &= I_d
\end{aligned}$$

$$\Downarrow$$

$$\boxed{I_d = 1{,}06\, I_\ell}$$

Perdas c.a.

$$P_{ca}^{p} = 3\, I_\ell^2\, R_\ell$$

Perdas c.c.

$$P_{cc}^{p} = 2\, I_d^2\, R_\ell$$

Para uma mesma resistência de linha R_ℓ e considerando a relação entre as correntes, tem-se:

$$\boxed{P_{ca}^{p} \;=\; 1{,}33\, P_{cc}^{p}}$$

As perdas em c.a. são 33% maiores que as perdas c.c. para uma mesma potência transmitida.

- **Considerando agora que as perdas sejam as mesmas:**

$$3\, I_\ell^2\, R = 2\, I_d^2\, R$$
$$I_d = \sqrt{\frac{3}{2}}\, I_\ell$$

Para mesma potência transmitida ($P_{ca} = P_{cc}$) e considerando a relação entre as correntes:

$$V_d = \sqrt{\frac{3}{2}}\, \frac{V_\ell}{\sqrt{3}} = \sqrt{\frac{3}{2}}\, V_f$$

Em termos das tensões máximas:

$$V_{cc}^{\max} = \sqrt{\frac{3}{2}}\,\frac{V_{ca}^{\max}}{\sqrt{2}}$$
$$= 0{,}87\,V_{ca}^{\max}$$

A tensão c.c. é menor para mesmas perdas e mesma potência transmitida. Logo, o nível de isolação em c.c. é menor que em c.a.

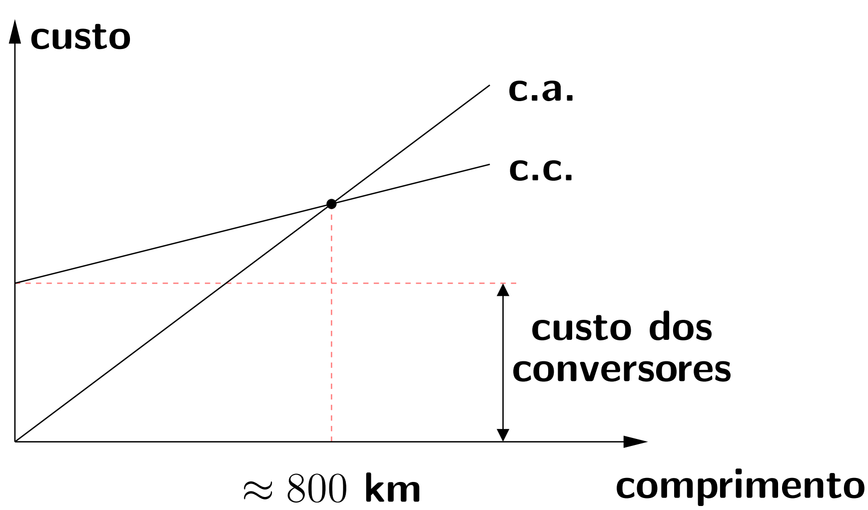
8.3.2 Análise de custos

- **A linha c.c. é mais barata que a linha c.a.: menos condutores, torres mais simples, menor nível de isolamento.**

  Porém, são também necessárias as estações conversoras (c.a./c.c. e c.c./c.a.), que são muito caras.

- **A linha c.a. tem preço por km aproximadamente constante.**

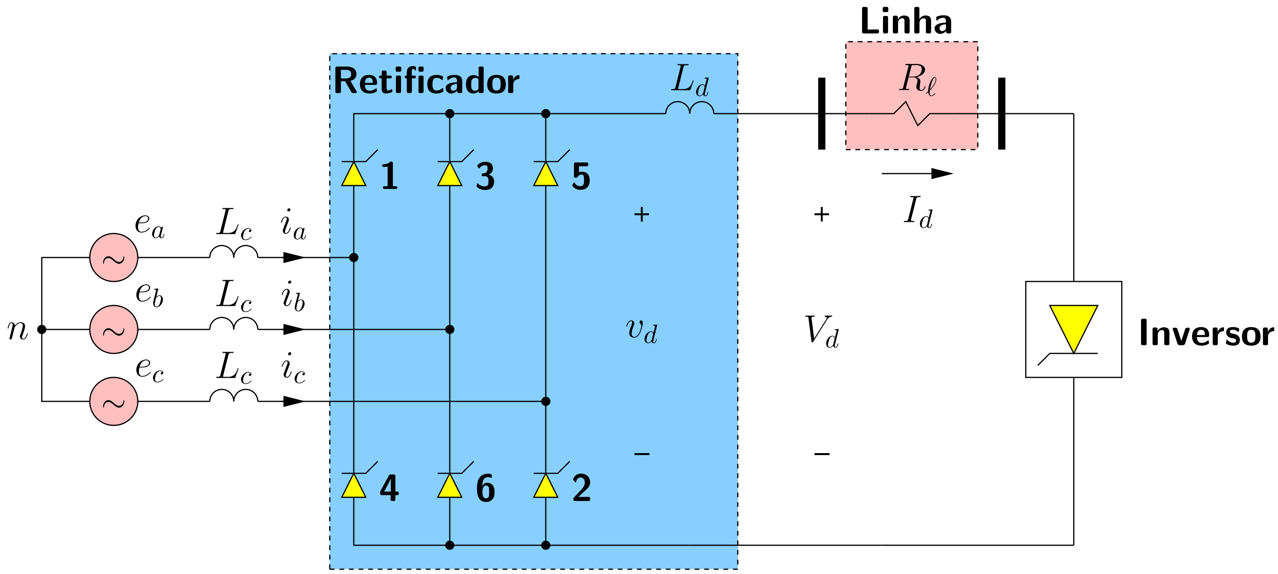
- **A decisão sobre qual sistema adotar (c.a. ou c.c.) sob o ponto de vista de custos depende basicamente do comprimento da linha:**



8.4 Conversores – visão geral

- **Configurações de conversores: monofásico ou trifásico, meia-onda ou onda completa.**

- **Conversor trifásico de 6 pulsos (onda completa, Graetz):**



- **Descrição dos elementos do circuito e hipóteses simplificadoras:**

  - L_c: **indutância de dispersão do conjunto gerador – transformador.**

    Na verdade, a fonte de tensão trifásica em série com a indutância L_c **podem representar o circuito equivalente de Thévenin do sistema c.a.**

  - R_ℓ: **resistência da linha de transmissão (demais parâmetros da linha são desprezados em c.c.).**

  - L_d: **reator de alisamento (alta indutância, da ordem de 1 H). Considera-se** $L_d \rightarrow \infty$ **na análise, o que garante uma corrente** I_d **constante (a tensão de saída do conversor não é constante, mas apresenta um ripple).**

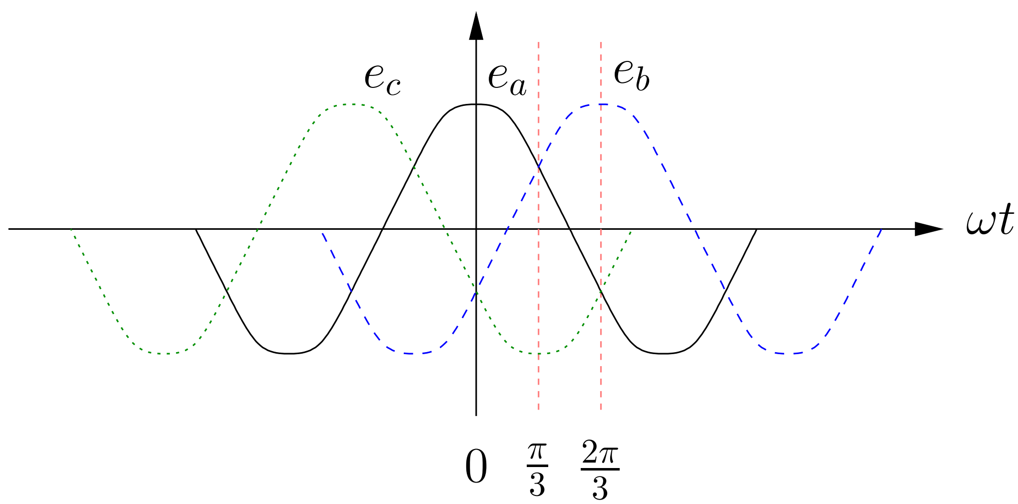
  - **A alimentação c.a. é feita através de rede trifásica equilibrada e senoidal.**

- **As válvulas do conversor apresentam resistência nula no sentido de condução e resistência infinita no sentido oposto.**

- **A ignição das válvulas é feita pelos gates e ocorrem a intervalos de tempo iguais. No caso tem-se 6 válvulas, portanto, elas são disparadas a cada $60°$ ($1/6$ de ciclo de tensão).**

- **A comutação é instantânea (uma válvula interrompe e outra conduz instantaneamente).**

▶ e_a, e_b **e** e_c **são as tensões de fase aplicadas ao conversor. O valor de pico das tensões de fase é** E_m**:**



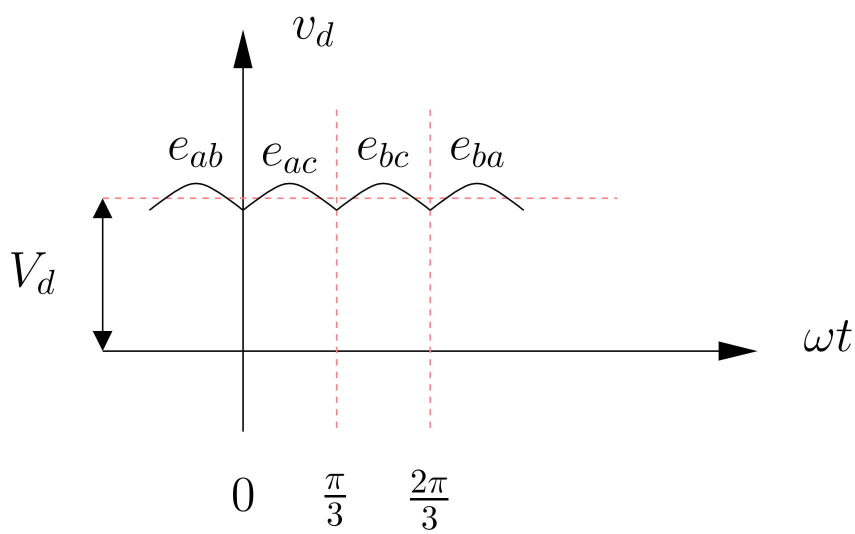
▶ **A análise a seguir será feita para a operação da ponte sem controle de ignição dos tiristores (tiristores comportando-se como diodos). O controle de ignição será incluído adiante.**

▶ **Dois tiristores conduzem por vez: aquele cuja tensão no catodo é a maior e aquele cuja tensão no anodo é a menor.**

No intervalo $0 \leq \omega t \leq \pi/3$ **a maior tensão é** e_a**, logo, o tiristor 1 conduz. A menor tensão é** e_c**, logo, o tiristor 2 também conduz. A tensão** v_d **será:**

$$v_d = e_{ac} = e_a - e_c$$

O mesmo tipo de raciocínio vale para os outros intervalos (de 60° em 60°). A tensão v_d será:



cujo valor médio é:

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_\ell = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \approx 1{,}65 E_m$$

em que V_ℓ é a tensão de linha no secundário do transformador.

Este valor de tensão V_d é normalmente denominado V_{do}, pois é associado a um ângulo de atraso (no disparo dos tiristores) nulo ($\alpha = 0$).

- **Com controle de ignição, ou seja, com ângulo de atraso não nulo ($\alpha \neq 0$):**

$$V_d = V_{do} \cos \alpha$$

- **A faixa de variação do ângulo de ignição é de 0 a 180°. De 0 a 90°, V_d assume valores positivos. De 90° a 180°, V_d é negativo. Neste último caso, como o sentido da corrente não pode mudar, a ponte passa a operar como inversor.**

- **Pode-se mostrar que, sendo α o ângulo de ignição e ϕ o ângulo de defasagem entre tensão e corrente no secundário do transformador, $\cos\phi = \cos\alpha$. Ou seja, um ângulo de ignição maior implica em um fator de potência menor, explicando o fato do conversor consumir potência reativa.**

  São colocados capacitores ou condensadores síncronos no lado c.a. para o fornecimento da potência reativa necessária.

- **A comutação não é de fato instantânea, mas leva um certo tempo para ocorrer. Por exemplo, para $\omega t = \pi/3$ o tiristor 1 deixa de conduzir, passando o tiristor 3 a conduzir. Essa transição não é instantânea. Os tiristores 1 e 3 conduzem simultaneamente por um certo tempo, e este fato é denominado overlap. Isso implica em uma diminuição de V_d:**

$$\begin{aligned} V_d &= \frac{V_{do}}{2}\left[\cos\alpha + \cos\left(\alpha+\mu\right)\right] = \frac{3\sqrt{2}V_\ell}{2\pi}\left[\cos\alpha + \cos\left(\alpha+\mu\right)\right] \\ &= V_{do}\cos\alpha - R_c I_d \end{aligned}$$

  em que V_ℓ é a tensão de linha no secundário do transformador e μ é o ângulo de comutação (a comutação ocorre durante um tempo μ/ω). Define-se o ângulo de extinção $\delta = \alpha + \mu$.

  A resistência de comutação é dada por:

$$R_c = \frac{3\omega L_c}{\pi} = \frac{3X_c}{\pi} = 6fL_c$$

  e, embora seja considerada como resistência para efeitos de queda de tensão, não consome potência ativa.

  A corrente na linha é:

$$I_d = \frac{V_\ell}{\sqrt{2}X_c}\left[\cos\alpha + \cos\left(\alpha+\mu\right)\right]$$

  em que $X_c = \omega L_c$.

- **A corrente de linha (rms) no secundário do transformador é:**

$$I_\ell = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d$$

- **A corrente no secundário do transformador é dada ainda por:**

$$I_\ell = I_p + j\, I_q$$

em que:

$$I_p = \frac{\sqrt{6} I_d}{\pi} \left| \frac{\cos\alpha + \cos(\alpha+\mu)}{2} \right|$$

e:

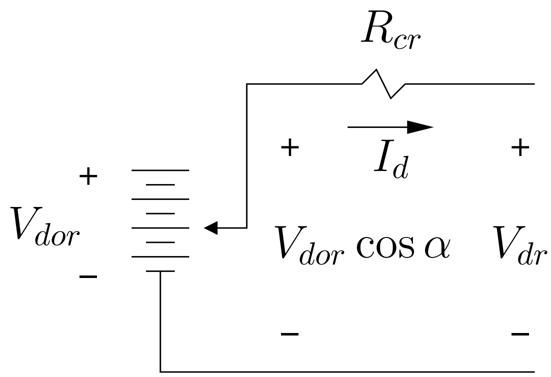
$$I_q = \frac{\sqrt{6} I_d}{\pi} \left| \frac{2\mu + \sin 2\alpha - \sin 2(\alpha+\mu)}{4(\cos\alpha - \cos(\alpha+\mu)} \right|$$

- **Mostra-se que:**

$$\cos\phi \approx \frac{1}{2}\left[\cos\alpha + \cos\left(\alpha+\mu\right)\right]$$

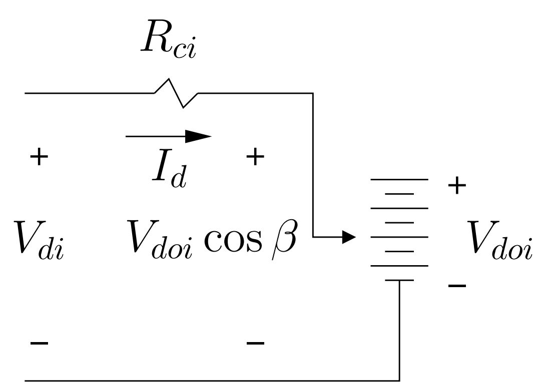
ou seja, quando se considera a comutação ($\mu \neq 0$) o fator de potência visto do lado c.a. ($\cos\phi$) é ainda menor, sendo necessária uma injeção ainda maior de reativos.

▶ **Circuito equivalente do retificador:**



V_{dor}	–	**tensão para ângulo de ignição nulo**
V_{dr}	–	**tensão no início da linha c.c.**
I_d	–	**corrente no início da linha c.c.**
R_{cr}	–	**resistência de comutação, dada por** $3\omega L_c/\pi = 3X_c/\pi = 6fL_c$

▶ **Circuito equivalente do inversor:**



β – **ângulo de ignição do inversor** ($\beta = \pi - \alpha$)

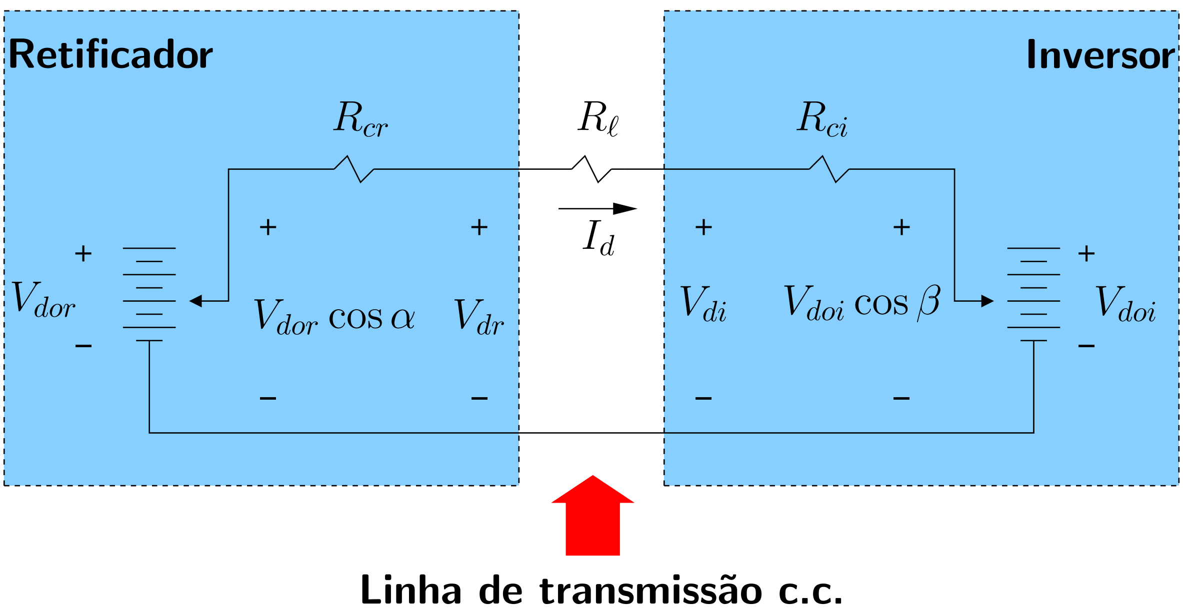
▶ **O fator de potência no lado c.a. do inversor é:**

$$\cos\phi \approx \frac{1}{2}\left[\cos\gamma + \cos\left(\gamma+\mu\right)\right]$$

em que γ é o ângulo de extinção do inversor:

$$\gamma = \pi - \delta$$

▶ **O circuito equivalente do elo c.c. é:**



▶ **Controle do elo c.c.:**

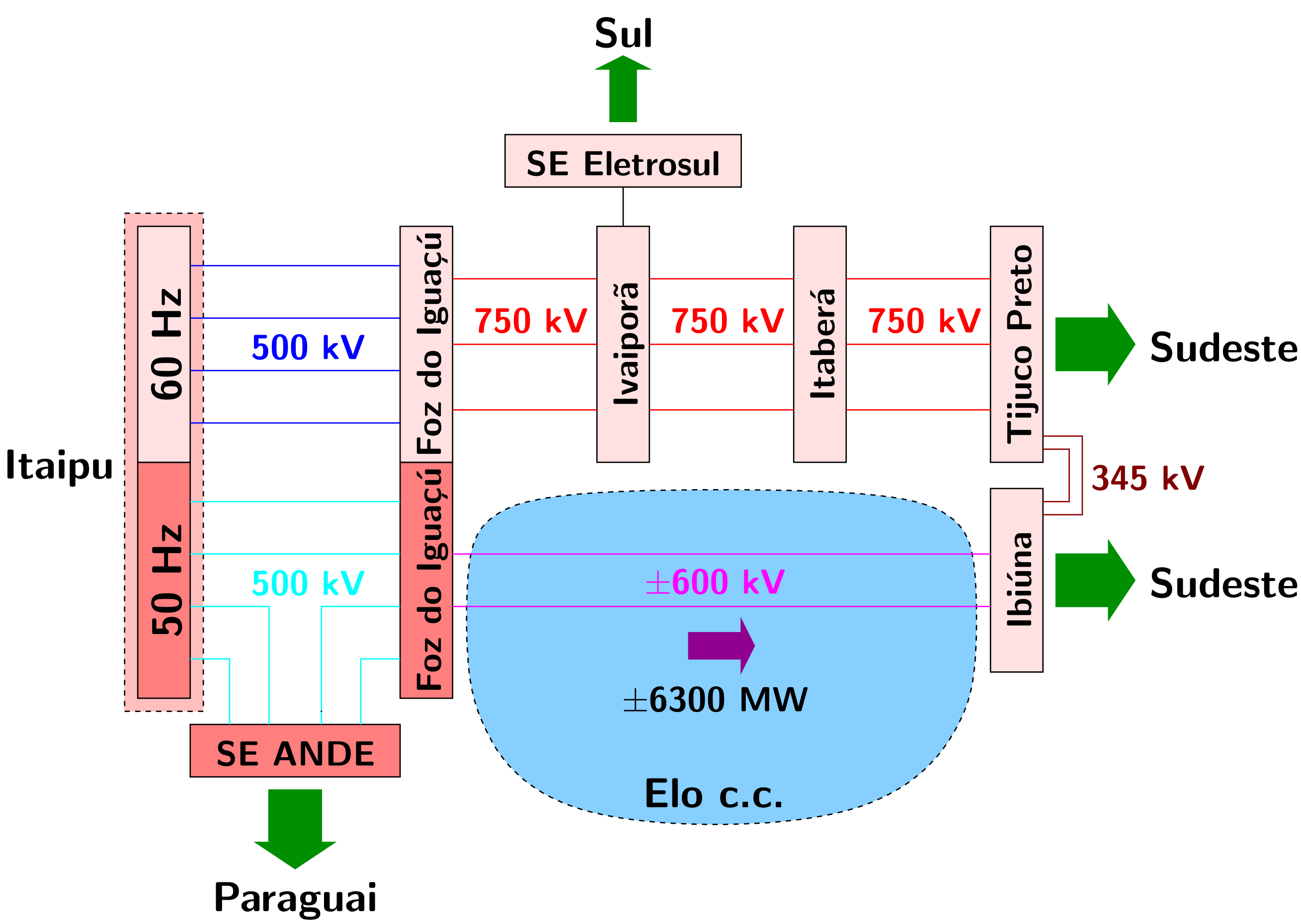
$$I_d = \frac{V_{dr} - V_{di}}{R_\ell} = \frac{V_{dor}\cos\alpha - V_{doi}\cos\beta}{R_{cr} + R_\ell + R_{ci}}$$

- **Controle lento ($\approx$ 5 segundos) $\rightarrow$ mudanças em V_{dor} e V_{doi} através dos taps dos transformadores alimentadores dos conversores.**

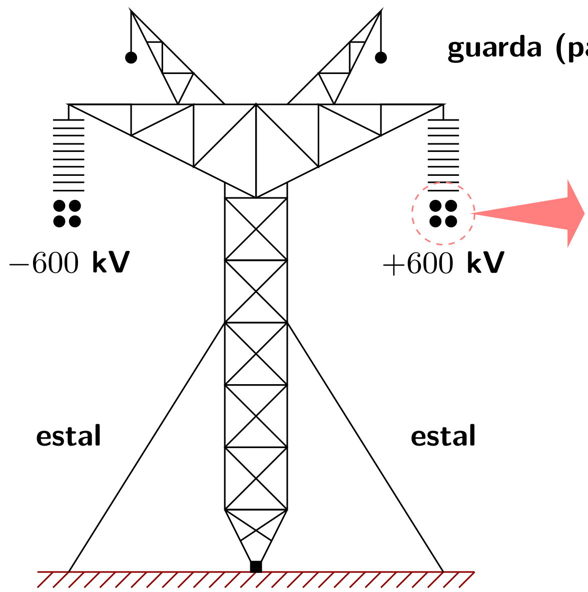
- **Controle rápido (alguns milisegundos) $\rightarrow$ controle dos ângulos de ignição α e β.**

8.5 Elo c.c. de Itaipu

- **Configuração:**



▶ **Torres de transmissão em c.c.:**



4 $\times$ ACSR 1273 MCM

$\phi = 34{,}12$ **mm**

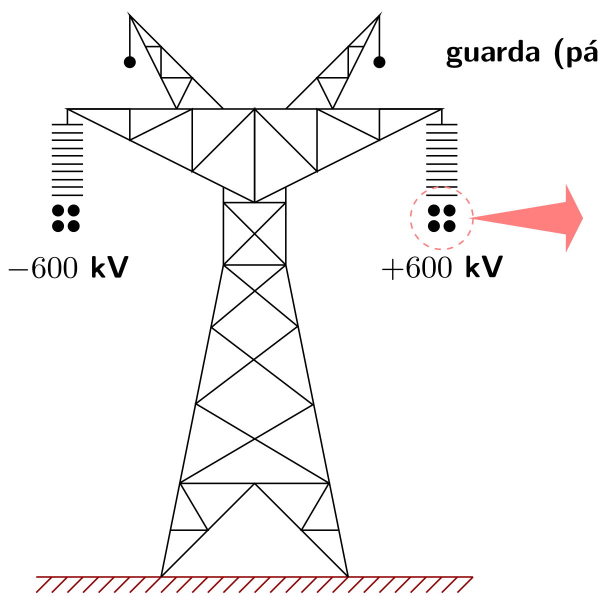
$d = 457$ **mm (entre condutores)**

linha c.c. bipolar

torre estaiada

(mais simples e leve que torres c.a.)

Estaiada



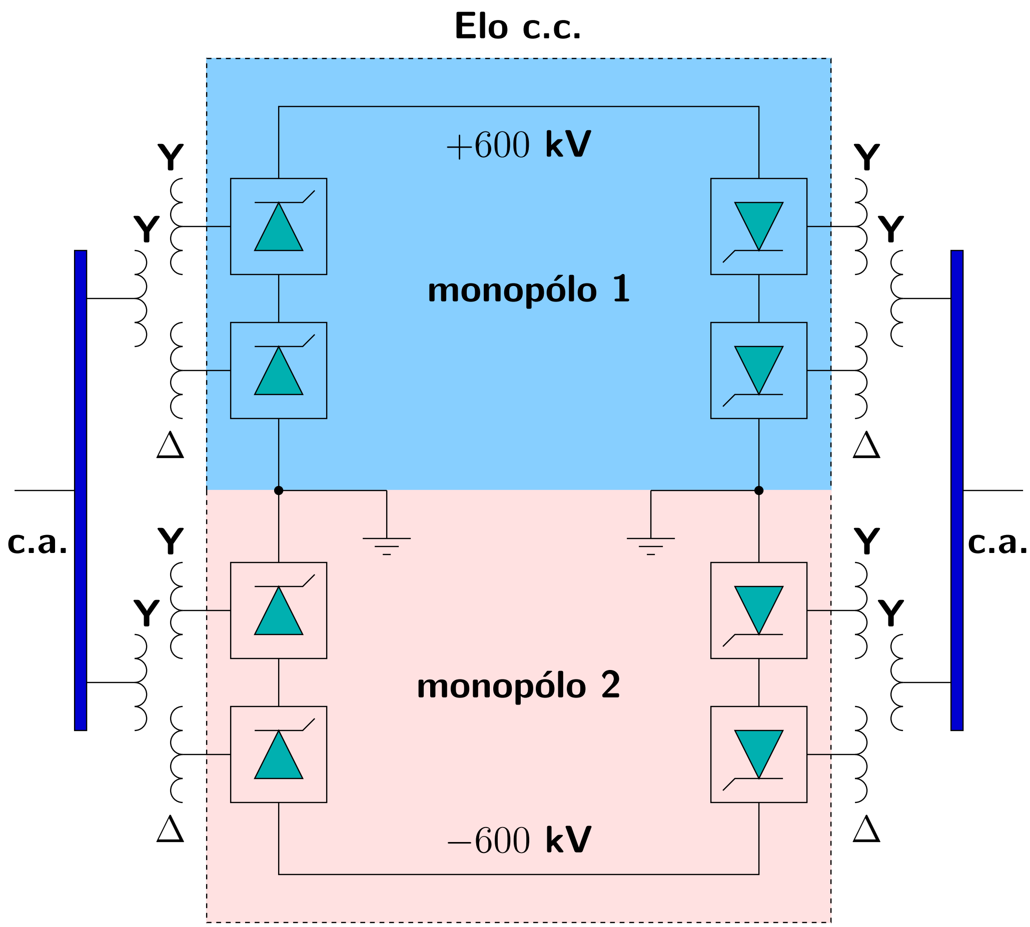
4 $\times$ ACSR 1273 MCM

$\phi = 34{,}12$ **mm**

$d = 457$ **mm (entre condutores)**

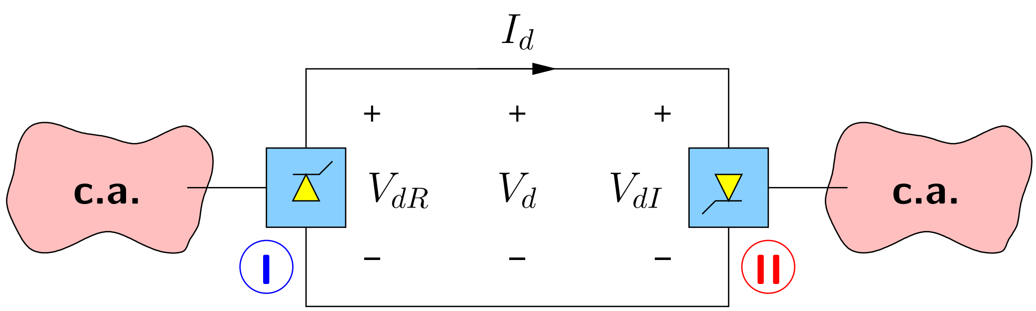
Autoportante

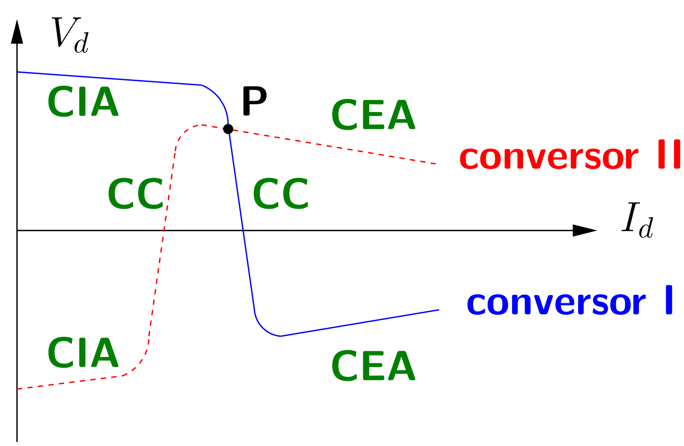
▶ **Sistema bipolar de 12 pulsos:**



8.6 Controle de elos c.c.

► **As características de operação dos conversores podem ser representadas através de curvas $[V_d \times I_d]$.**

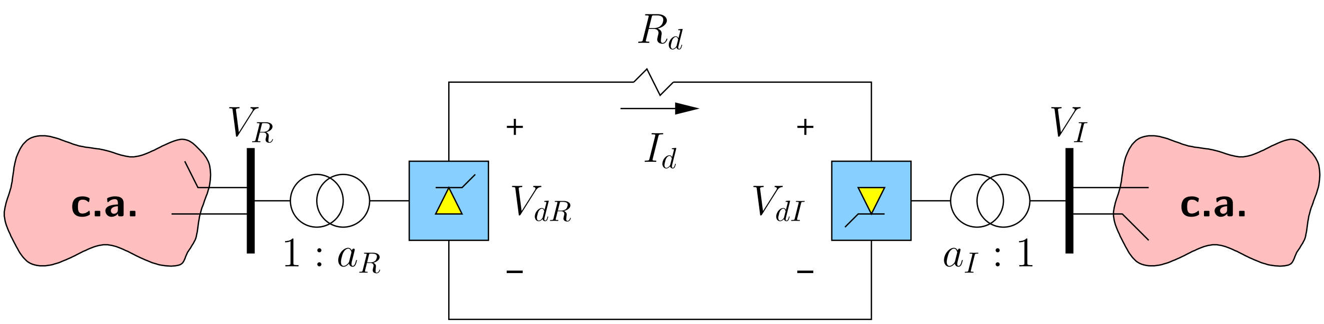




V_d	**tensão em algum ponto da linha c.c. (por exemplo, no ponto central)**
P	**ponto de operação $\Rightarrow$ pode-se obter os valores das variáveis c.c., como por exemplo α_R, I_d, V_{dR}, etc.**
CIA	**constant ignition angle (mínimo ângulo α_R)**
CEA	**constant extinction angle (mínimo ângulo γ_I)**
CC	**constant current**

8.7 Fluxo de carga c.a./c.c.

- **Considere o sistema elétrico c.a./c.c. a seguir.**



- **As seguintes hipóteses simplificadoras são adotadas:**
  - **As tensões no lado c.a. são balanceadas e senoidais**
  - **A operação dos conversores é perfeitamente balanceada**
  - **As tensões e corrente c.c. são constantes (não há ripple)**
  - **Os transformadores conectados aos conversores não apresentam perdas ôhimcas e perdas de magnetização**

- **Equações no lado do retificador:**

$$V_{dR} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_R V_R \cos \alpha_R - \frac{3}{\pi} X_c I_d \tag{1}$$

$$\begin{aligned} P_R &= P_{dR} = V_{dR} I_d \\ |S_R| &= k \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_R V_R I_d \\ Q_R &= \left(|S_R|^2 - P_R^2\right)^{1/2} \end{aligned} \tag{2}$$

em que $k \approx 0{,}995$ (fator de compensação pela existência de overlap).

▶ **Equações no lado do inversor:**

$$V_{dI} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_I V_I \cos\gamma_I - \frac{3}{\pi} X_c I_d \tag{3}$$

$$\begin{aligned} P_I &= P_{dI} = V_{dI} I_d \\ |\, S_I \,| &= k \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_I V_I I_d \\ Q_I &= \left(|\, S_I \,|^2 - P_I^2 \right)^{1/2} \end{aligned} \tag{4}$$

▶ **Equação de relação entre os conversores:**

$$V_{dR} = V_{dI} + R_d I_d \tag{5}$$

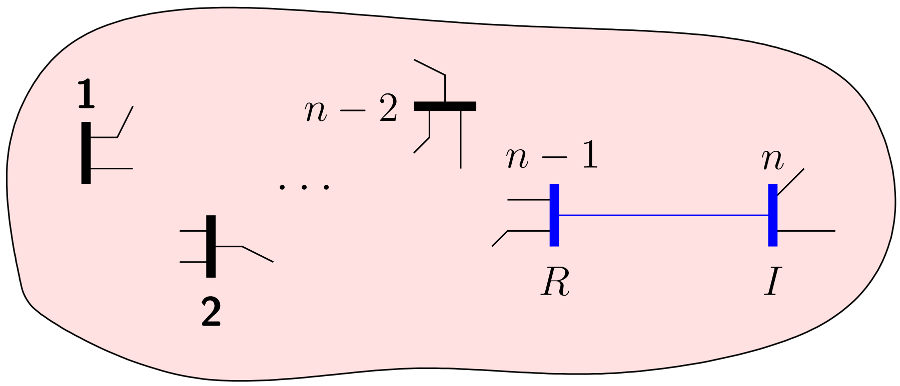
▶ **O elo c.c. contribui com o aparecimento de 7 variáveis internas:**

$$\boldsymbol{x} = [\ V_{dR}\ \ a_R\ \ \alpha_R\ \ V_{dI}\ \ a_I\ \ \gamma_I\ \ I_d\ ]^T$$

ou $\cos\alpha_R$ **ou** $\operatorname{sen}\gamma_I$

melhoram a convergência

▶ **Considere uma rede com n barras, sendo que as barras terminais do elo c.c. (R e I) são as duas últimas:**



As equações de fluxo de carga são:

$$
\begin{aligned}
\Delta P_1 &= P_1^e - P_1^c(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{V}) \\
\Delta P_2 &= P_2^e - P_2^c(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{V}) \\
&\vdots \\
\Delta P_{n-2} &= P_{n-2}^e - P_{n-2}^c(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{V}) \\
\Delta P_R &= P_R^e - P_R^c(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{V}) - P_R(V_R, V_I, \boldsymbol{x}) \\
\Delta P_I &= P_I^e - P_I^c(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{V}) - P_I(V_R, V_I, \boldsymbol{x}) \\
\\
\Delta Q_1 &= Q_1^e - Q_1^c(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{V}) \\
\Delta Q_2 &= Q_2^e - Q_2^c(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{V}) \\
&\vdots \\
\Delta Q_{n-2} &= Q_{n-2}^e - Q_{n-2}^c(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{V}) \\
\Delta Q_R &= Q_R^e - Q_R^c(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{V}) - Q_R(V_R, V_I, \boldsymbol{x}) \\
\Delta Q_I &= Q_I^e - Q_I^c(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{V}) - Q_I(V_R, V_I, \boldsymbol{x})
\end{aligned}
\tag{6}
$$

- **Somente as equações de fluxo de carga referentes às barras terminais do elo c.c. foram modificadas.**
- **Os termos P_R, P_I, Q_R e Q_I são obtidos através das equações (2) e (4).**

- **Apareceram 7 novas variáveis no sistema de equações (6), correspondentes às variáveis do elo c.c.**

  Portanto, são necessárias 7 novas equações que devem ser acrescentadas ao sistema de equações (6).

  Estas equações podem ser escritas de forma geral como:

$$\boldsymbol{R}\left(V_R, V_I, \boldsymbol{x}\right) = \boldsymbol{0}$$

- **Três dessas equações são (1), (3) e (5), ou seja:**

$$V_{dR} - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_R V_R \cos\alpha_R + \frac{3}{\pi} X_c I_d = 0 \tag{7}$$

$$V_{dI} - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_I V_I \cos\gamma_I + \frac{3}{\pi} X_c I_d = 0 \tag{8}$$

$$V_{dR} - V_{dI} - R_d I_d = 0 \tag{9}$$

- **As outras 4 equações correspondem a especificações do tipo de controle utilizado:**

Modos de controle	Variáveis especificadas			
A	α_R	γ_I	V_{dI}	P_{dI}
B	a_R	γ_I	V_{dI}	P_{dI}
C	α_R	γ_I	a_I	P_{dI}
D	a_R	γ_I	a_I	P_{dI}
E	α_R	γ_I	a_R	P_{dI}
F	α_R	a_I	V_{dI}	P_{dI}
G	α_R	a_I	a_R	P_{dI}
A_I	α_R	γ_I	V_{dI}	I_d
B_I	a_R	γ_I	V_{dI}	I_d
C_I	α_R	γ_I	a_I	I_d
D_I	a_R	γ_I	a_I	I_d
E_I	α_R	γ_I	a_R	I_d
F_I	α_R	a_I	V_{dI}	I_d
G_I	α_R	a_I	a_R	I_d

- **Exemplos de especificações de controles:**

  (i) **Tap do transformador:** $a - a^e = 0$

  (ii) **Tensão c.a.:** $V_d - V_d^e = 0$

  (iii) **Corrente c.c.:** $I_d - I_d^e = 0$

  (iv) **Ângulos de disparo:** $\alpha - \alpha^e = 0$

  (v) **Potência c.c. transmitida:** $P_d - P_d^e = 0$

  - **O modo de controle A é o mais comumente utilizado.**
  - **Os demais são usados se alguma outra variável atinge um de seus limites.**

▶ **O sistema de equações de fluxo de carga c.a./c.c. pelo método de Newton segundo a abordagem simultânea é:**

$$
\begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{P} \\ \Delta \boldsymbol{P}_t \\ \Delta \boldsymbol{Q} \\ \Delta \boldsymbol{Q}_t \\ \Delta \boldsymbol{R} \end{bmatrix}
=
\left[\begin{array}{cc|cc|c}
\multicolumn{2}{c|}{\multirow{2}{*}{$\boldsymbol{H}$}} & \multicolumn{2}{c|}{\multirow{2}{*}{$\boldsymbol{N}$}} & 0 \\
 & & & & \boldsymbol{A} \\ \hline
\multicolumn{2}{c|}{\multirow{2}{*}{$\boldsymbol{M}$}} & \multicolumn{2}{c|}{\multirow{2}{*}{$\boldsymbol{L}$}} & 0 \\
 & & & & \boldsymbol{C} \\ \hline
0 & 0 & 0 & \boldsymbol{D} & \boldsymbol{E}
\end{array}\right]
\cdot
\begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \boldsymbol{\theta}_t \\ \Delta \boldsymbol{V} \\ \Delta \boldsymbol{V}_t \\ \Delta \boldsymbol{x} \end{bmatrix}
$$

em que

$$
\boldsymbol{A} = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x}} \boldsymbol{P}_t \qquad \boldsymbol{D} = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{V}_t} \boldsymbol{R}
$$

$$
\boldsymbol{C} = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x}} \boldsymbol{Q}_t \qquad \boldsymbol{E} = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x}} \boldsymbol{R}
$$

▶ **As matrizes $\boldsymbol{H}$, $\boldsymbol{M}$, $\boldsymbol{N}$ e $\boldsymbol{L}$ formam a matriz Jacobiana do método de Newton convencional.**

- **O sistema de equações de fluxo de carga c.a./c.c. pelo método de Newton segundo a abordagem alternada é:**

$$\begin{array}{|c|}\hline \Delta \boldsymbol{P} \\ \hline \Delta \boldsymbol{P}_t \\ \hline \Delta \boldsymbol{Q} \\ \hline \Delta \boldsymbol{Q}_t \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|}\hline \boldsymbol{H} & \boldsymbol{N} \\ \hline \boldsymbol{M} & \boldsymbol{L} \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|}\hline \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \hline \Delta \boldsymbol{\theta}_t \\ \hline \Delta \boldsymbol{V} \\ \hline \Delta \boldsymbol{V}_t \\ \hline \end{array} \tag{10}$$

$$\boxed{\Delta \boldsymbol{R}} = \boxed{\boldsymbol{E}} \cdot \boxed{\Delta \boldsymbol{x}} \tag{11}$$

  - **As equações (10) e (11) são resolvidas alternadamente.**
  - **Para a resolução de (11) mantém-se $\boldsymbol{V}_t$ e $\boldsymbol{\theta}_t$ constantes (obtidos em (10)).**

- **Pode-se utilizar também as equações de fluxo de carga pelo método desacoplado rápido:**

$$\begin{aligned} \Delta \boldsymbol{P}/\boldsymbol{V} &= \boldsymbol{B}' \cdot \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \boldsymbol{Q}/\boldsymbol{V} &= \boldsymbol{B}'' \cdot \Delta \boldsymbol{V} \\ \Delta \boldsymbol{R} &= \boldsymbol{E} \cdot \Delta \boldsymbol{x} \end{aligned}$$

- **Com base no fato de que o acoplamento entre c.a. e c.c. se dá principalmente através das magnitudes de tensão, pode-se formular o problema como:**

$$\Delta \boldsymbol{P}/\boldsymbol{V} = \boldsymbol{B}' \cdot \Delta \boldsymbol{\theta}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{Q}/\boldsymbol{V} \\ \Delta \boldsymbol{Q}_t/\boldsymbol{V}_t \\ \Delta \boldsymbol{R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \multicolumn{2}{c}{\multirow{2}{*}{$\boldsymbol{B}''$}} & \boldsymbol{0} \\ & & \boldsymbol{C}'' \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{D}'' & \boldsymbol{E} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{V} \\ \Delta \boldsymbol{V}_t \\ \Delta \boldsymbol{x} \end{bmatrix}$$

8.8 Observações

- **Em geral a tolerância de convergência das variáveis c.c. é igual à das variáveis c.a.**

- **A fim de permitir a utilização dessas tolerâncias iguais, é necessário definir um sistema por unidade para as variáveis c.c.**

- **Tem-se então:**

$$V_B^{\text{cc}} = V_B^{\text{ca}}$$
$$S_B^{\text{cc}} = S_B^{\text{ca}}$$

- **Para a corrente de base c.c.:**

$$\begin{aligned} S_B^{\text{cc}} &= S_B^{\text{ca}} \\ V_B^{\text{cc}} I_B^{\text{cc}} &= \sqrt{3} V_B^{\text{ca}} I_B^{\text{ca}} \end{aligned}$$
$$\Downarrow$$
$$I_B^{\text{cc}} = \sqrt{3} I_B^{\text{ca}}$$

Referências

- J. Arrillaga, C.P. Arnold, B.J. Harker, Computer Modelling of Electrical Power Systems, John Wiley and Sons, 1983. (cap. 6)
- J.C. Oliveira, A. Oliveira, Transmissão de energia elétrica em corrente contínua, curso de extensão, Universidade Federal de Uberlândia, 1985.
- T. Smed, G. Andersson, G.B. Sheblé, L.L. Grigsby, A new approach to AC/DC power flow, IEEE Transactions on Power Systems, v.6, n.3, Aug 1991, pp.1238–1244.
- J. Arrillaga, C.P. Arnold, Computer Analysis of Power Systems, John Wiley and Sons, 1993. (cap. 4).
- M.E. El-Hawary, Electrical Power Systems, IEEE Press, 1995.