

Introdução ao cálculo de curto-circuitos trifásicos simétricos pela norma CEI-909

Apontamentos para as disciplinas de Instalações Eléctricas

Manuel António Matos

Índice

1.	Introdução	1
2.	Generalidades	1
3.	Definições (CEI 909).....	2
4.	Corrente de curto-circuito	2
5.	Cálculo de curto-circuitos	5
5.1.	Princípio geral do cálculo	5
5.2.	Cálculo segundo CEI-909.....	6
6.	Exemplos de cálculo	8
6.1.	Rede MT	8
6.2.	Ramal BT.....	9

ANEXO: Evolução temporal de diversas situações de curto-circuito

1. Introdução

O presente texto descreve os aspectos mais importantes do cálculo expedito de curto-circuitos trifásicos simétricos em redes de BT e MT, incluindo as definições essenciais e os procedimentos de cálculo da recomendação CEI-909 aplicáveis a estas redes.

O cálculo sistemático em redes de grande dimensão ou o estudo dos curto-circuitos assimétricos não são assim abordados, sendo objecto de estudo em disciplinas específicas do ramo de Sistemas de Energia Eléctrica.

2. Generalidades

A simulação numérica de curto-circuitos em determinados pontos da rede tem enorme importância no planeamento, projecto e exploração das instalações e redes, ao permitir antever as consequências dos defeitos simulados. Esse conhecimento possibilita a tomada das medidas necessárias para minimizar essas consequências, com a mínima perturbação possível no sistema. Isto inclui, não só a colocação e regulação de dispositivos que promovam a interrupção dos circuitos defeituosos, mas também garantir que todos os componentes da rede percorridos pelas correntes de defeito podem suportar os seus efeitos enquanto elas persistem.

De forma geral, calculam-se as correntes de curto-circuito com os seguintes objectivos:

- Determinação do poder de corte de disjuntores e fusíveis: com a previsão da corrente máxima de curto-circuito no ponto da rede onde estão instalados, tem-se o limite inferior do poder de corte destes dispositivos;
- Previsão dos esforços térmicos e electrodinâmicos provocados pela passagem da corrente: todos os elementos da rede, sobretudo pontos nevrálgicos como barramentos e seccionadores, terão que suportar os efeitos destrutivos da passagem das correntes de curto-circuito;
- Regulação das protecções: a especificação das correntes e tempos de disparo das protecções baseia-se nos valores previstos da corrente de curto-circuito.

Normalmente, procura-se a corrente de curto-circuito máxima (eficaz ou instantânea) mas também pode interessar a corrente de curto-circuito mínima. Neste texto, aborda-se apenas o primeiro destes aspectos, em relação aos curto-circuitos trifásicos simétricos, usualmente (mas nem sempre) o caso mais desfavorável.

Os métodos de cálculo de curto-circuitos baseiam-se no teorema da sobreposição, que permite calcular separadamente a situação depois do defeito, e no teorema de Thévenin,

que fornece a base conceptual para esses cálculos. Tecnicamente, o cálculo é realizado por redução de impedâncias (redes simples) ou matricialmente (redes de grande dimensão). Neste texto, usar-se-á, como se disse, o primeiro método.

3. Definições (CEI 909)

A recomendação CEI 909 é um padrão internacional para o cálculo de correntes de curto-circuito. Nos parágrafos seguintes apresentam-se as definições mais importantes nela incluídas.

I_k'' **Corrente inicial simétrica de curto-circuito:** valor eficaz da componente simétrica alternada da corrente de curto-circuito presumida, no instante da ocorrência do curto-circuito, no ponto k.

S_k'' **Potência inicial simétrica de curto-circuito:** $S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k''$

i_{DC} **Componente contínua da corrente de curto-circuito:** valor médio da envolvente da corrente de curto-circuito, decrescente de um valor inicial até zero.

i_p **Valor máximo da corrente de curto-circuito:** valor máximo instantâneo da corrente de curto-circuito presumida.

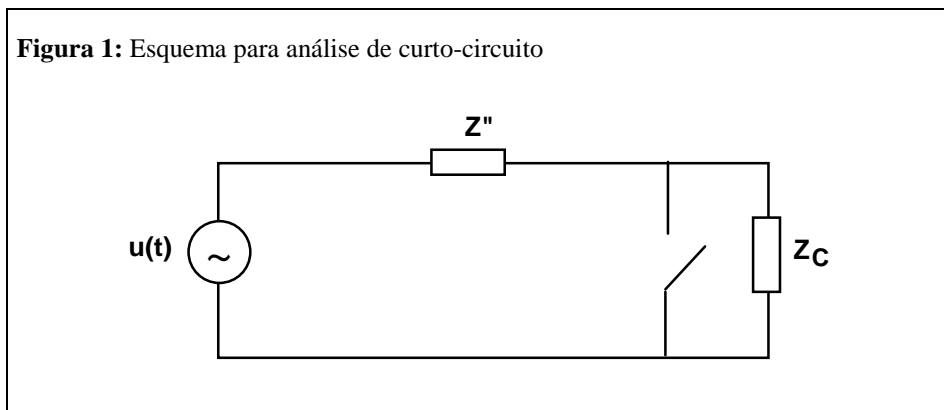
I_b **Corrente simétrica de curto-circuito cortada:** valor eficaz de um ciclo da componente alternada simétrica no instante da separação dos contactos do aparelho de corte.

4. Corrente de curto-circuito

A ocorrência de um curto-circuito envolve, para além do grande aumento das correntes circulando no sistema, um fenómeno transitório (fecho de um circuito, normalmente indutivo). Nesta secção, apresentam-se alguns resultados no domínio dos tempos que mostram a variação dos termos transitórios com os factores de potência envolvidos (antes e depois do curto-circuito) e com o instante em que ocorre o curto-circuito.

Suponha-se, para começar, um circuito como a da figura 1, alimentado em corrente alternada com uma tensão $u(t) = \sqrt{2} U \cos(\omega t + \epsilon)$, onde Z'' é a impedância da rede vista do ponto do defeito e Z_c é a impedância da carga. Neste exercício, supõe-se que Z'' não varia durante o curto-circuito.

Figura 1: Esquema para análise de curto-circuito



Como é já conhecido, o valor da corrente antes do defeito é dado por:

$$i(t^-) = \sqrt{2} I \cos(\omega t + \varepsilon - \varphi) \quad (1)$$

onde $I = U/|Z''+Z_C|$ e $\varphi = \arctang(X''+X_C)/(R''+R_C)$. A ocorrência do defeito (fecho do interruptor da figura) ocasiona, como se sabe, um fenómeno descrito por uma equação diferencial, cuja resolução permite determinar a expressão da corrente de curto-circuito:

$$i(t^+) = \sqrt{2} \cdot I'' \cdot \left[\cos(\omega t + \varepsilon - \varphi'') - \cos(\varepsilon - \varphi'') \cdot e^{-t/\tau} \right] + \underbrace{\sqrt{2} \cdot I \cdot \cos(\varepsilon - \varphi)}_{i(0^-)} \cdot e^{-t/\tau} \quad (2)$$

onde $I'' = U/|Z''|$, $\varphi'' = \arctang X''/R''$ e $\tau = L''/R''$. Neste ponto, merecem saliência alguns aspectos da expressão (2), tendo em conta, nomeadamente, os valores típicos em jogo:

- O segundo termo da expressão corresponde ao decaimento da corrente antes do defeito $i(0^-)$, normalmente muito inferior aos restantes valores, pelo que é geralmente ignorado;
- O primeiro termo inclui duas parcelas: um termo forçado sinusoidal, à frequência da rede, e uma componente contínua que se anula mais ou menos rapidamente, de acordo com τ (ou seja, X''/R'' , que lhe é proporcional);
- A expressão entre parêntesis rectos é nula para $t=0$ (a expressão da corrente é uma função contínua!), mas pode chegar quase a ser 2, ou seja, nos instantes iniciais, a corrente **total** de curto-circuito pode ser quase dupla do valor máximo do termo forçado. A componente contínua assume, assim, importância fundamental.

Como se vê na expressão (2), o valor máximo da componente contínua depende do instante em que se dá o defeito, sendo máximo para $\varepsilon=\varphi''+\pi$ e mínimo para $\varepsilon=\varphi''\pm\pi/2$. Para valores elevados de X''/R'' (típicos em MAT e AT), $\varphi''\cong\pi/2$, obtendo-se a conclusão simples de que a situação mais desfavorável corresponde a um curto-circuito

ocorrendo quando a tensão se anula. No Anexo a este texto, apresentam-se curvas da evolução da corrente de curto-circuito para diferentes situações de ϵ , ϕ (cargas indutivas e capacitivas) e ϕ'' , que mostram a assimetria resultante da componente contínua.

Um outro ponto importante é o facto de que os valores de X'' não permanecem inalterados durante o curto-circuito, devido à variação da contribuição dos alternadores e motores (assunto estudado nas disciplinas de máquinas eléctricas). Tradicionalmente, considera-se uma sequência de três períodos no curto-circuito, em que se podem supor constantes as reactâncias:

- Período subtransitário: reactâncias subtransitórias x'' ;
- Período transitório: reactâncias transitórias x' ;
- Período permanente: reactâncias síncronas x_s .

Em relação a este aspecto, a norma CEI 909 distingue duas situações, representadas nas figuras 2 e 3: curtos-circuitos "perto dos alternadores" e "longe dos alternadores". Como se pode ver, na primeira situação há uma diminuição progressiva do valor eficaz da componente forçada, notando-se claramente o início do período permanente. Na outra situação, o valor eficaz da componente forçada não se altera, por serem desprezáveis as reactâncias dos alternadores na impedância equivalente vista do ponto do defeito. No presente texto, apenas este último caso ("longe dos alternadores") será abordado.

Figura 2: Curto-circuito *perto* dos alternadores (figura retirada da norma)

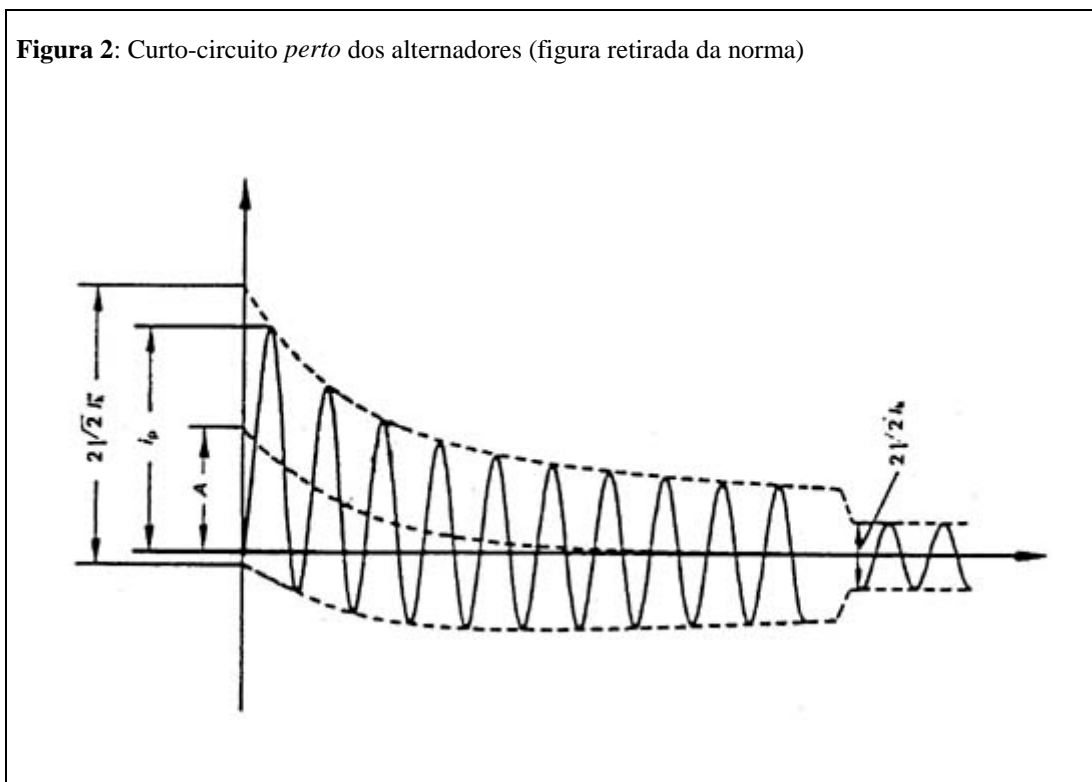
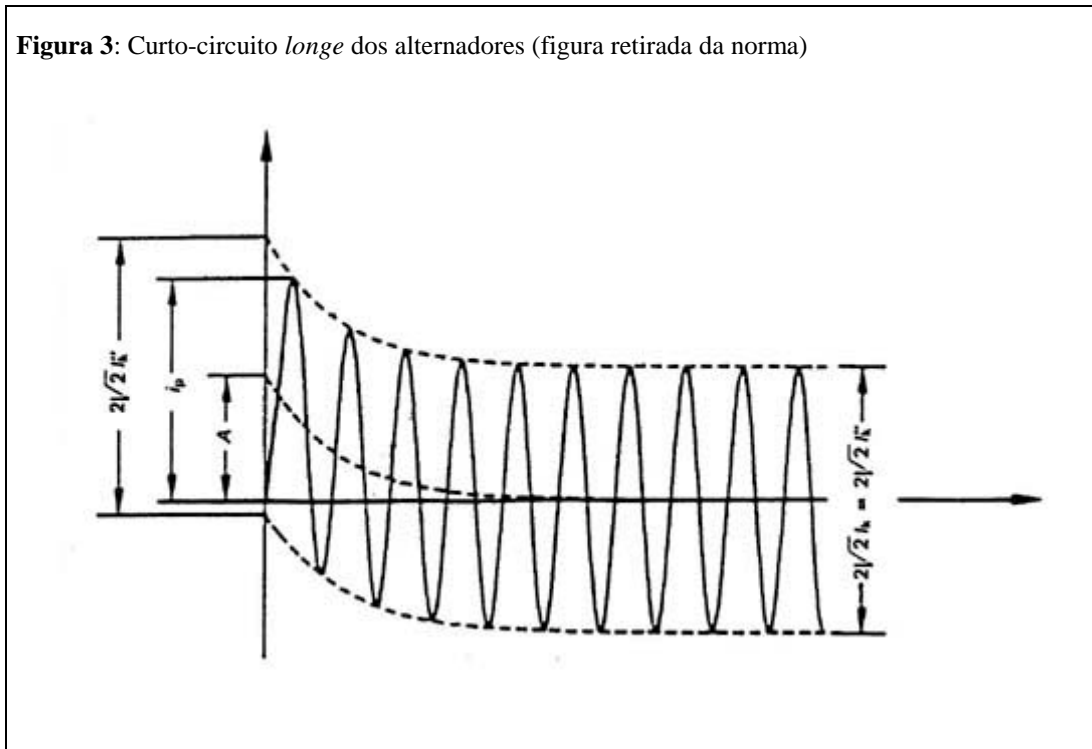


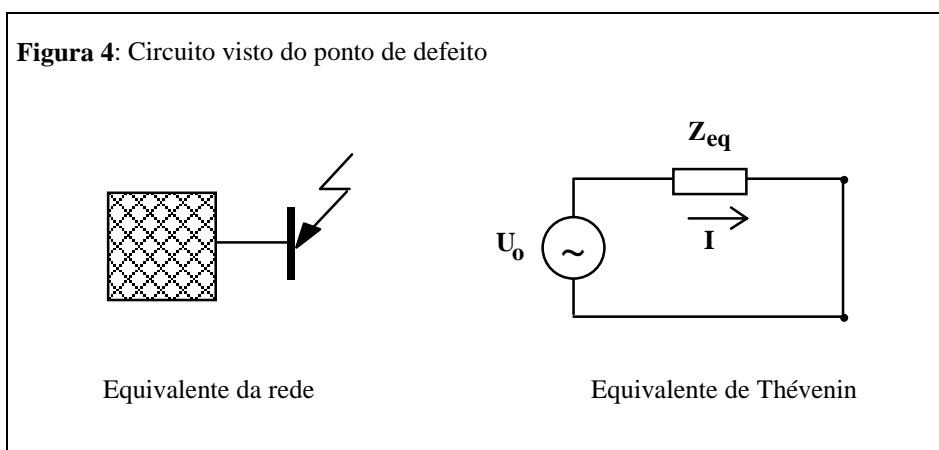
Figura 3: Curto-circuito *longe* dos alternadores (figura retirada da norma)



5. Cálculo de curto-circuitos

5.1. Princípio geral do cálculo

A base usada para o cálculo é o teorema de Thévenin, começando por se construir um equivalente da rede vista do ponto do defeito, com a correspondente determinação de uma impedância equivalente Z_{eq} e de uma fonte de tensão em circuito aberto U_0 , como se representa na figura 4 (todos os valores em p.u.).



A formulação indicada permite calcular imediatamente o valor da componente eficaz da corrente de curto-circuito:

$$I = \frac{U_0}{Z_{eq}} \quad (3)$$

mas também pode ser utilizada, quando é dada a corrente num certo ponto da rede, para calcular a impedância equivalente para montante (supondo conhecida a tensão em circuito aberto):

$$Z_{eq} = \frac{U_0}{I} \quad (4)$$

Lembrando que as expressões (3) e (4) são para valores em p.u., e sendo de esperar que a tensão seja próxima da tensão nominal (1 p.u.), pode então dizer-se, simplifadamente, que, em p.u., a corrente de curto-circuito é aproximadamente o inverso da impedância equivalente.

5.2. Cálculo segundo CEI-909

Apresenta-se, a seguir, o procedimento básico de cálculo de curto-circuitos longe dos alternadores, segundo CEI-909. Efectua-se primeiro o cálculo do valor eficaz da componente simétrica, ao qual se junta, posteriormente, o efeito da componente contínua.

5.2.1. Rede de alimentação

Em geral, é conhecido o valor da potência ou da corrente simétrica de curto-circuito da rede de alimentação, o que permite calcular a impedância equivalente para montante, de acordo com (4). Sendo I''_{KQ} o valor eficaz da corrente, tem-se:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_n}{I''_{KQ}} \quad (5)$$

onde c toma o valor 1 em redes de 400 V, 1,05 em BT (outras tensões) e 1,1 em MT e AT. Ou seja, prescinde-se de tentar calcular U_0 da expressão (4), que é aproximado pelo valor da tensão nominal, afectada do parâmetro c. Quanto ao argumento da impedância, toma-se $R_Q=0$ se $U_n > 35$ kV e, nos outros casos, $R_Q = 0,1 \cdot X_Q$ e $X_Q = 0,995 \cdot Z_Q$ (excepto, evidentemente, se os valores forem conhecidos).

Finalmente, note-se que poderá haver várias redes de alimentação, devendo realizar-se o cálculo da impedância equivalente para cada uma delas, supondo desligada a rede a jusante do ponto de alimentação respectivo.

5.2.2. Impedância equivalente

Uma vez determinadas a(s) impedância(s) equivalente(s) para montante, e sendo conhecidas as impedâncias da rede em estudo, o passo seguinte consiste em calcular a impedância equivalente vista do ponto do defeito, Z_K . Este valor pode obter-se por análise matricial da rede, como será estudado em outras disciplinas, mas é possível calculá-lo, de forma expedita, com as seguintes aproximações:

- Desprezam-se as admitâncias das cargas;
- Desprezam-se as admitâncias capacitivas de linhas e cabos.

Estas aproximações simplificam muito os cálculos, mas saliente-se, por ser erro frequente, que **não se desprezam as resistências** de linhas e cabos (que, em BT, até são preponderantes). O cálculo de Z_K é realizado, portanto, por redução de impedâncias, envolvendo, normalmente, algumas transformações estrela-triângulo.

5.2.3. Corrente inicial simétrica

Uma vez determinado o valor de Z_K , pode calcular-se o valor da corrente inicial simétrica, através de:

$$I_K'' = \frac{c \cdot U_n}{Z_K} \quad (6)$$

O princípio é o mesmo da expressão (5), devendo salientar-se que c pode não ser o usado anteriormente, se os cálculos de (5) e (6) forem efectuados em diferentes níveis de tensão. Note-se ainda que, como se estão a considerar apenas os curto-circuitos longe dos alternadores, o valor eficaz da corrente não se altera durante o curto-circuito (pelo que não é apenas o "inicial"), sendo portanto $I_b = I_K''$, ou seja, a corrente simétrica cortada não depende do instante do corte.

5.2.4. Valor máximo da corrente

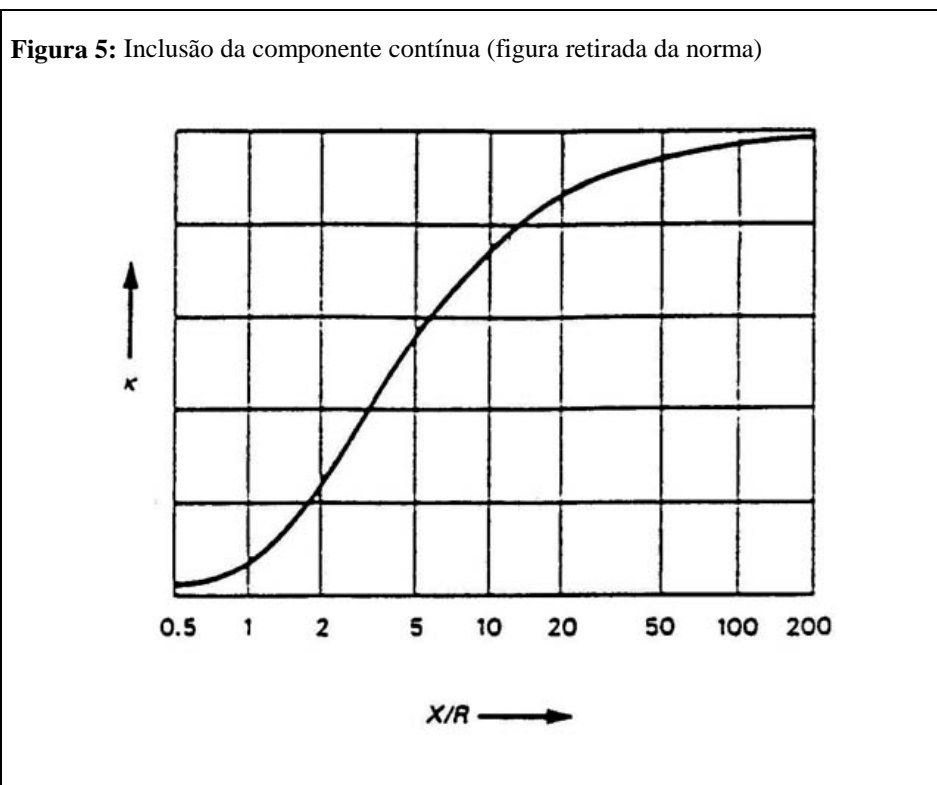
O processo de cálculo seguido inclui, como se disse, o efeito da componente contínua *a posteriori*, através de um factor multiplicativo k que depende de X_K/R_K . O valor máximo da corrente de curto-circuito é dado por:

$$i_p = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_K'' \quad (7)$$

O valor de k pode ser tirado do gráfico da figura 5, mas uma boa aproximação é dada pela expressão:

$$k \cong 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3R/X} \quad (8)$$

com o cuidado de que, em BT, $k \leq 1,8$. Recomenda-se o exercício de conjugar os valores de k com a análise das curvas de corrente de curto-circuito apresentadas no Anexo.



Neste ponto, é essencial salientar que este processo de cálculo pressupõe, no caso de redes emalhadas, que o valor de X/R não varia muito de ramo para ramo. Na verdade, só assim é lícito separar o cálculo da corrente simétrica do cálculo da componente contínua, pois nesta última não pode aplicar-se a transformada de Steinmetz.

Quando surgem situações em que este pressuposto não é aplicável (p.ex. redes com cabos e linhas aéreas), a norma CEI-909 recomenda, entre outras hipóteses, que se aplique um factor de correcção de 15%, ou seja, que se multiplique i_p por 1,15.

6. Exemplos de cálculo

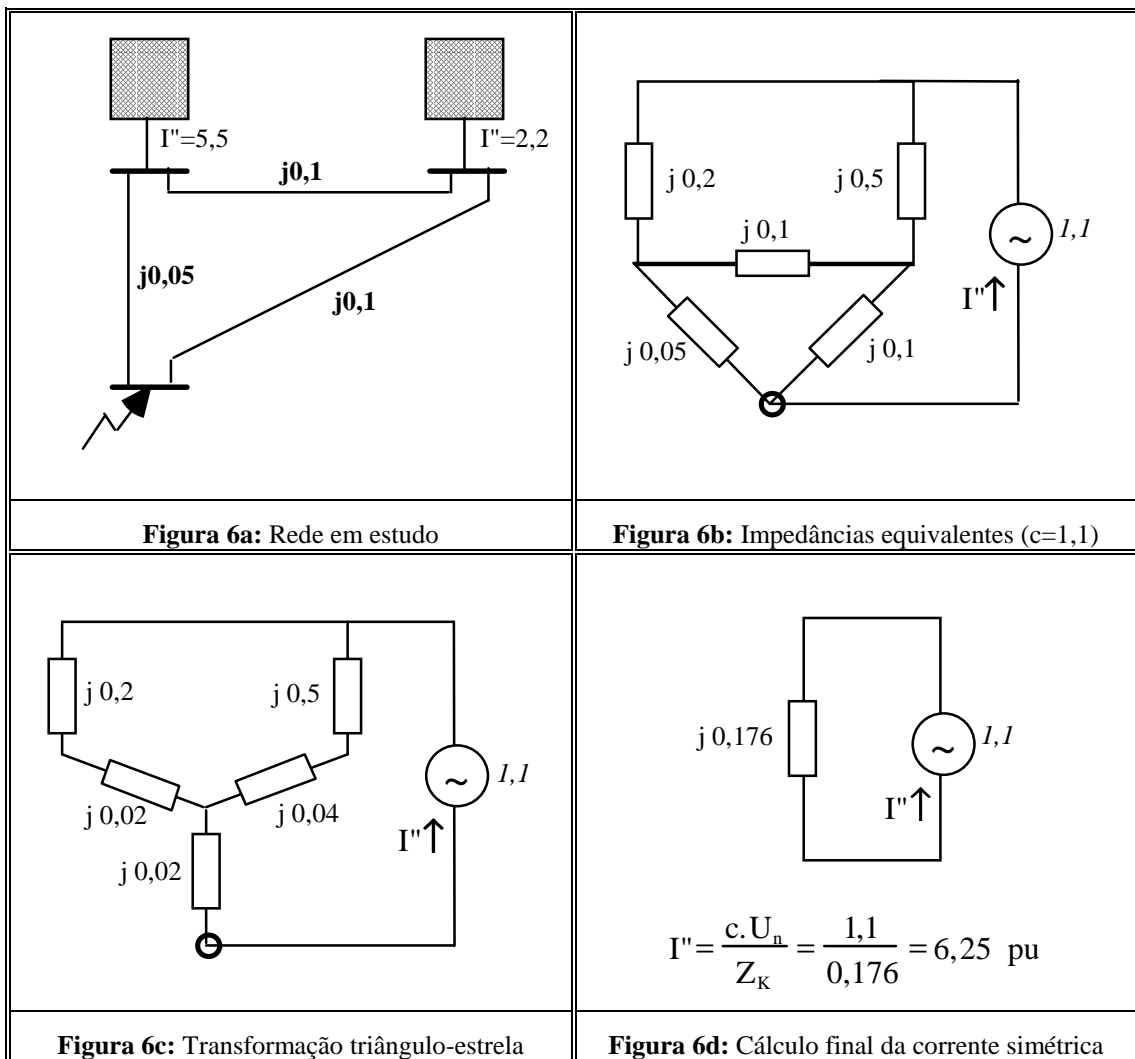
Os dois exemplos seguintes destinam-se a ilustrar alguns aspectos do cálculo de curto-circuitos, não constituindo modelos completos da abordagem a esse tipo de problemas.

6.1. Rede MT

Cálculo da corrente simétrica inicial num barramento de uma rede emalhada MT, com ligação a duas redes de alimentação. A rede é a da figura 6a, onde se dão as impedâncias

das linhas em pu, e os valores das correntes de curto-circuito de cada uma das redes (também em pu).

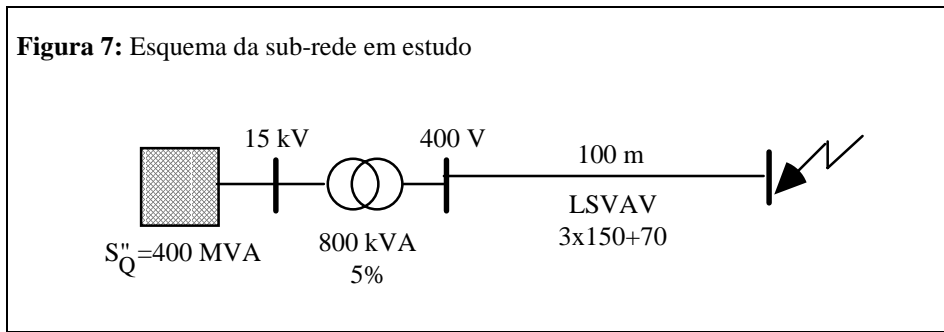
Repare-se que, sendo a análise efectuada em pu, se tem $U_n=1$ pu. O cálculo das impedâncias equivalentes das redes usa $c=1,1$ para obter as impedâncias indicadas na figura 6b (por exemplo $Z_Q^1 = 1,1/5,5 = 0,2$ pu). Com algumas transformações (fig 6c) e redução de impedâncias, chega-se finalmente ao valor da corrente simétrica de curto-circuito (fig 6d).



6.2. Ramal BT

Cálculo da corrente máxima de curto-circuito presumido no extremo do ramal indicado na figura 7. É conhecida a potência de curto-circuito simétrica no barramento MT do PT.

Figura 7: Esquema da sub-rede em estudo



6.2.1. Valores de base

$$S_b = 800 \text{ kVA} \quad Z_b^{BT} = \frac{400^2}{800 \cdot 10^3} = 0,2 \ \Omega \quad I_b^{BT} = \frac{800 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 1,16 \text{ kA}$$

6.2.2. Equivalente da rede de alimentação

$$I_Q'' = S_Q'' = \frac{400 \cdot 10^6}{800 \cdot 10^3} = 500 \text{ pu} \quad U_n = 1 \text{ pu} \quad c=1,1$$

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_n}{I_Q''} = \frac{1,1 \cdot 1}{500} = 0,0022 \text{ pu} \quad (\text{admite-se } Z_Q = j 0,0022 \text{ pu})$$

6.2.3. Impedância equivalente vista do ponto de defeito

$$\begin{aligned} (\text{cabos}) \quad z &= 0,1 \cdot (0,206 + j 100 \pi \cdot 0,22 \cdot 10^{-3}) = 0,0206 + j 0,0069 \ \Omega/\text{km} \\ &= 0,103 + j 0,0345 \text{ pu} \end{aligned}$$

$$(\text{transformador}) \quad x = 0,05 \text{ pu}$$

$$\begin{aligned} Z_K &= j 0,0022 + j 0,05 + 0,103 + j 0,0345 \\ &= 0,103 + j 0,0867 \text{ pu} \end{aligned}$$

6.2.4. Corrente simétrica inicial (valor eficaz)

$$(c=1 \ !) \quad I_K'' = \frac{1}{0,103 + j 0,0867} = 7,428 \ e^{-j0,7} \text{ pu} \quad [8,62 \text{ kA}]$$

6.2.5. Valor máximo da corrente de curto-circuito

$$k \cong 1,02 + 0,98 e^{-3 \cdot 0,1037 \cdot 0,0867} = 1,048$$

$$i_p = \sqrt{2} \cdot 1,048 \cdot 7,428 = 11,01 \text{ pu} \quad \mathbf{[12,77 \text{ kA}]}$$

6.2.6. Alguns comentários

Note-se a importância do transformador e das canalizações BT (nomeadamente a resistência) na limitação do curto-circuito. Por outro lado, a componente contínua não ocasiona um aumento muito grande (<5%) em relação à corrente simétrica, dado o baixo valor de X/R (<1) visto do ponto de defeito.

ANEXO

Evolução temporal de diversas situações de curto-circuito

As figuras que se seguem mostram a evolução da corrente de curto-circuito, para diversas situações de ocorrência do defeito (zero ou máximo da tensão), diversos tipos de carga (indutiva típica, puramente capacitiva e puramente indutiva) e diferentes factores de potência pós-defeito. Em todos os casos, usaram-se valores máximos da corrente antes e depois do defeito respectivamente de 100 e 1000 A.

Influência do instante do defeito

As figuras 1 e 2 comparam curto-circuitos muito indutivos ($\text{tg } \varphi''=10$), ocorrendo quando a tensão se anula (1) e no seu máximo (2). Mostram-se a tensão (traço mais fino) e corrente total de curto-circuito, nos dois casos, sendo patente a assimetria da corrente no primeiro caso, mais desfavorável portanto.

As figuras 3 e 4 dão o detalhe das diversas componentes da corrente total para as mesmas situações, sendo patente nos dois casos a pequena componente contínua correspondente à atenuação da corrente antes do defeito, normalmente desprezável. A parte simétrica (componente forçada) é também evidentemente igual nos dois casos (na figura 4 está escondida pela corrente total). A grande diferença é a componente contínua da corrente pós-defeito, muito maior no primeiro caso.

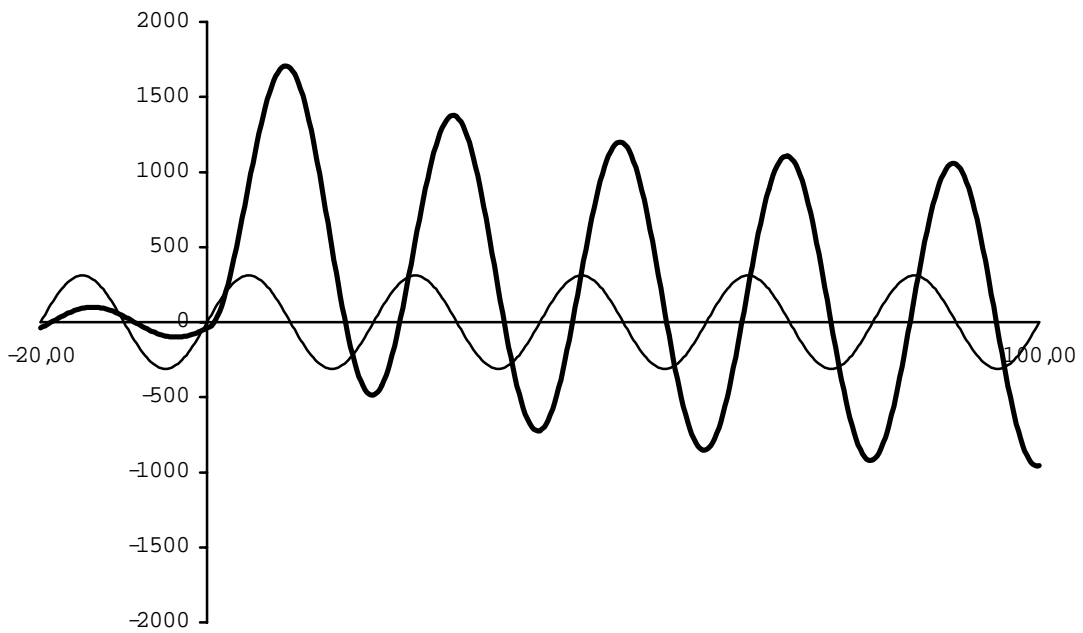
Influência do tipo de carga

As figuras 5 e 6 mostram, na mesma situação das figuras 1 e 3, o detalhe das correntes para cargas puramente capacitivas e puramente indutivas. A maior variação do factor de potência entre as situações pré e pós-defeito justifica um ligeiro aumento da corrente total máxima no caso capacitivo, mas é notório que não é esta a maior influência nos valores da corrente.

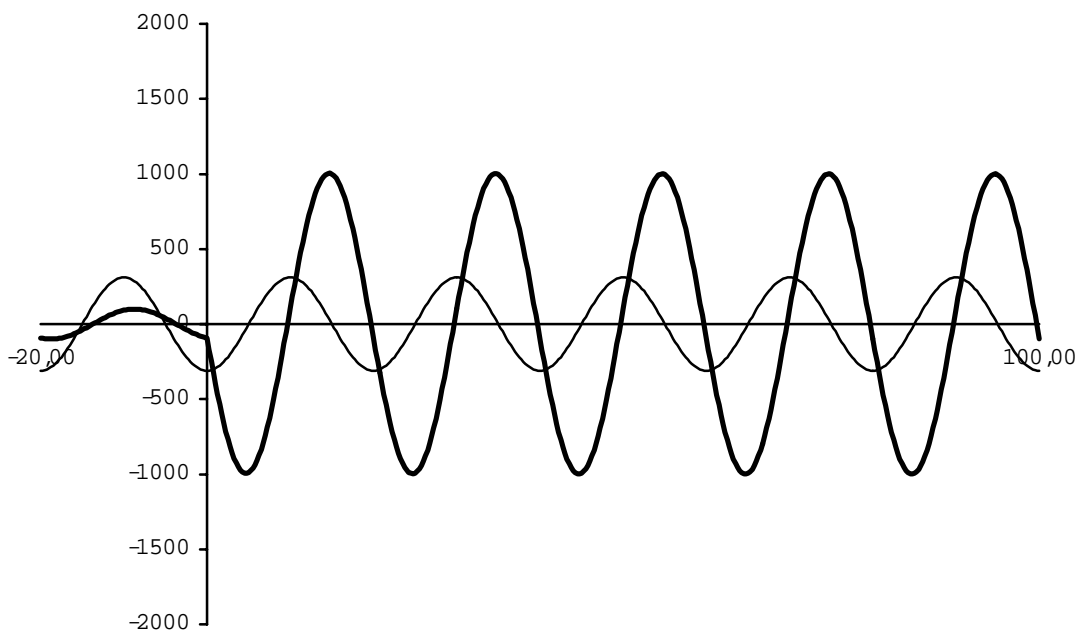
Influência do factor de potência pós-defeito

A figura 7 mostra, para a mesma situação da figura 1, que a atenuação da componente contínua varia bastante com o valor de X''/R'' (neste caso igual a 2,5), com grande influência, não só na duração do efeito de assimetria, como sobretudo no valor máximo da corrente total. A figura 8 dá o detalhe das diversas componentes, sendo notória a mais rápida atenuação da componente contínua.

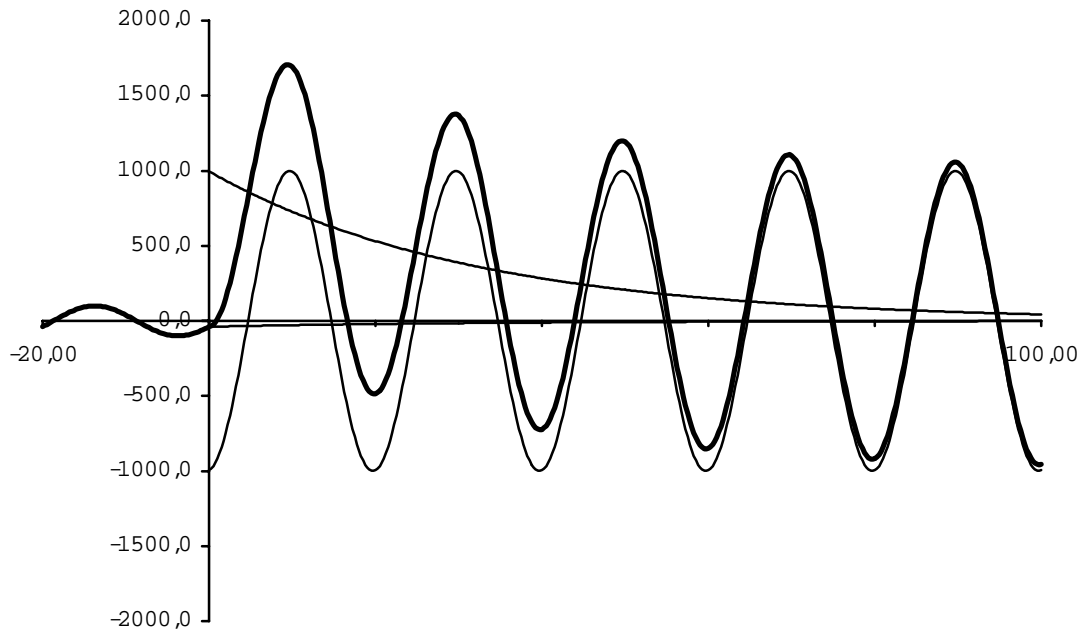
- 1.** Carga indutiva típica, curto-circuito quando a tensão se anula
 $\varepsilon = 3\pi/2$, $\text{tg } \varphi = 0.4$, $\text{tg } \varphi'' = 10$



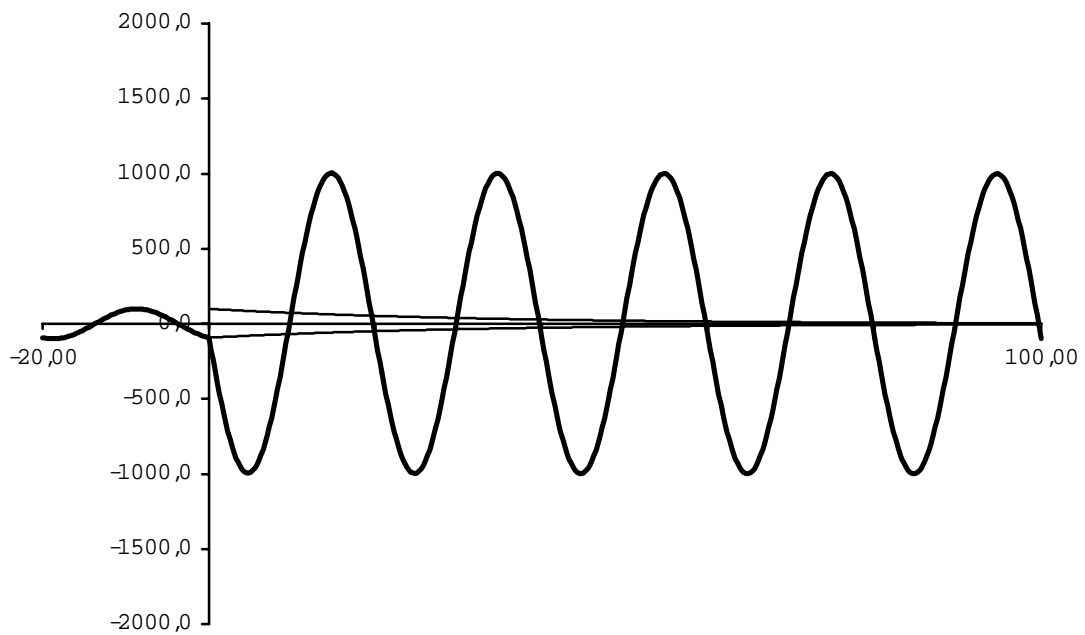
- 2.** Carga indutiva típica, curto-circuito no máximo da tensão
 $\varepsilon = \pi$, $\text{tg } \varphi = 0.4$, $\text{tg } \varphi'' = 10$



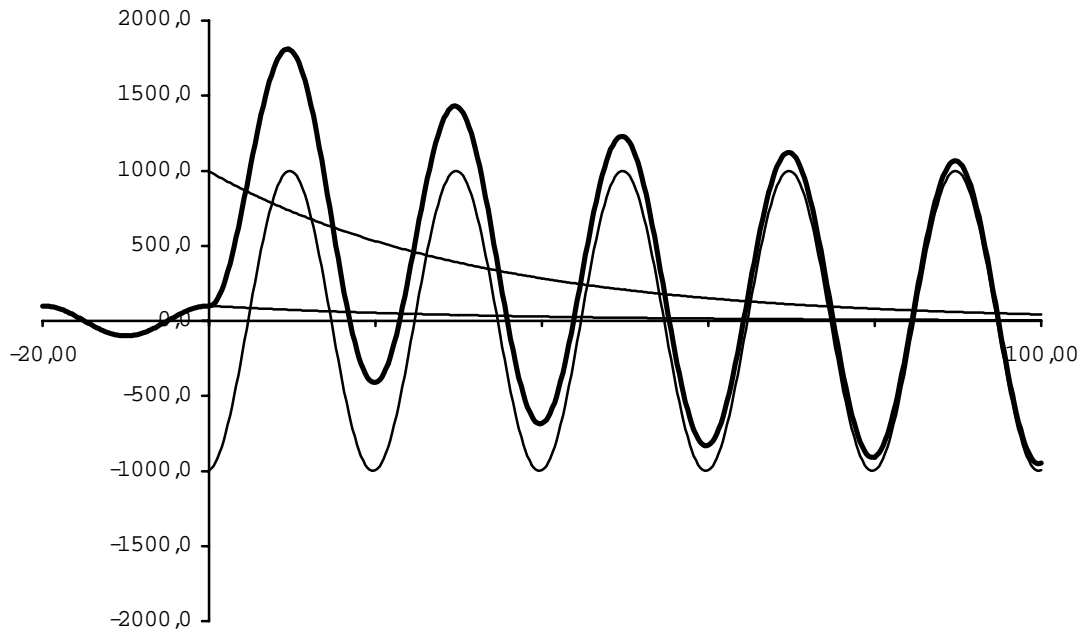
3. Carga indutiva típica, curto-circuito quando a tensão se anula (detalhe)
 $\varepsilon = 3\pi/2$, $\text{tg } \varphi = 0.4$, $\text{tg } \varphi'' = 10$



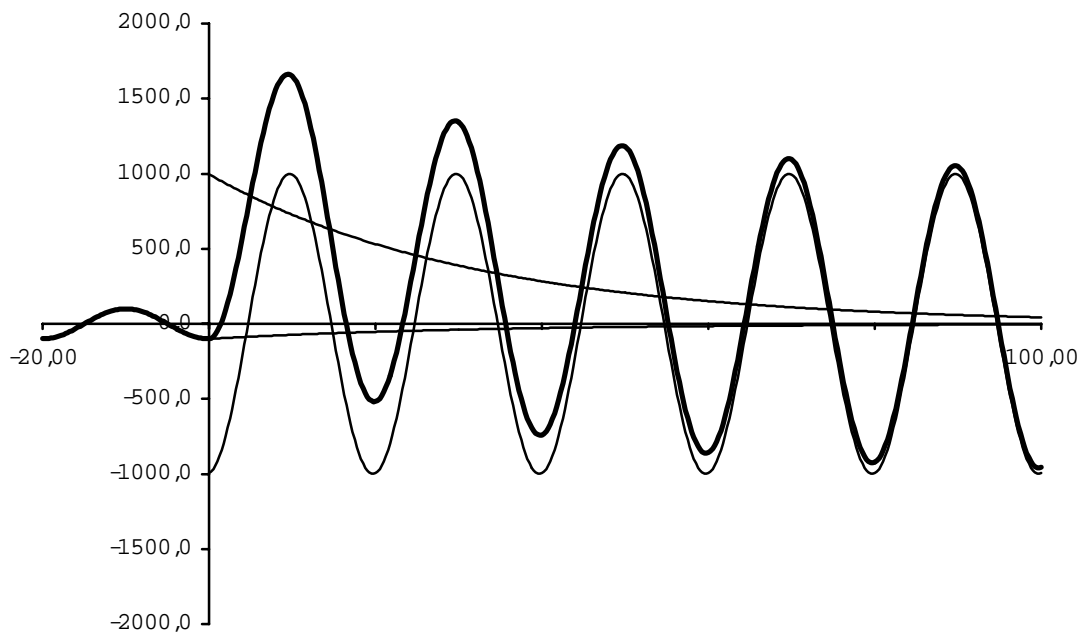
4. Carga indutiva típica, curto-circuito no máximo da tensão (detalhe)
 $\varepsilon = \pi$, $\text{tg } \varphi = 0.4$, $\text{tg } \varphi'' = 10$



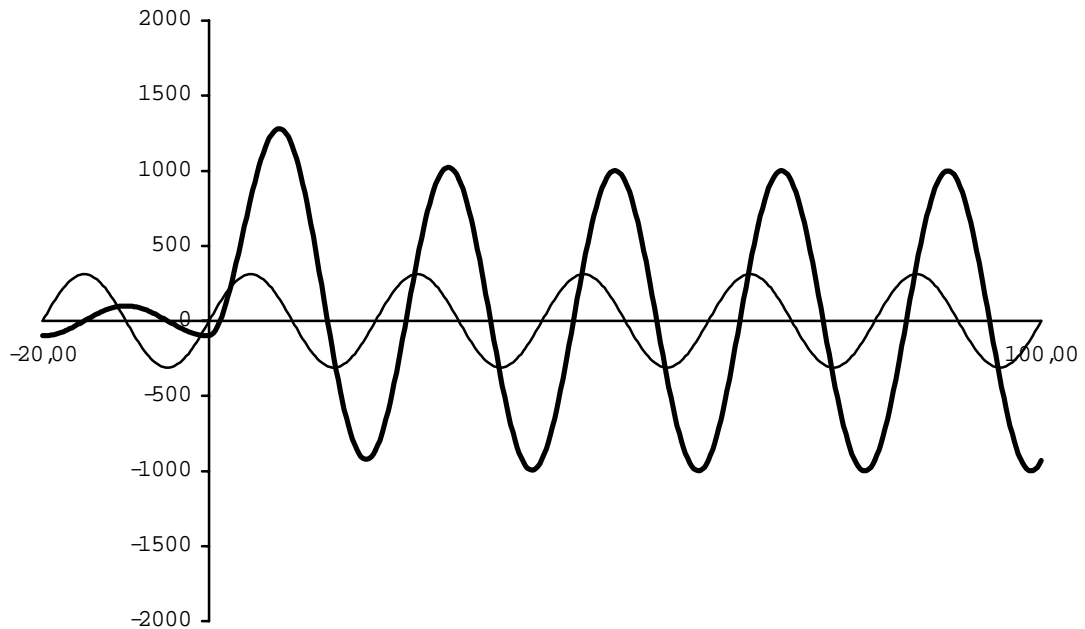
5. Carga capacitiva pura, curto-circuito quando a tensão se anula (detalhe)
 $\varepsilon = 3\pi/2$, $\varphi = -\pi/2$, $\text{tg } \varphi'' = 10$



6. Carga indutiva pura, curto-circuito quando a tensão se anula (detalhe)
 $\varepsilon = 3\pi/2$, $\varphi = \pi/2$, $\text{tg } \varphi'' = 10$



7. Carga indutiva típica, curto-circuito quando a tensão se anula
 $\varepsilon = 3\pi/2$, $\text{tg } \varphi = 0.4$, $\text{tg } \varphi'' = 2.5$



8. Carga indutiva típica, curto-circuito quando a tensão se anula (detalhe)
 $\varepsilon = 3\pi/2$, $\text{tg } \varphi = 0.4$, $\text{tg } \varphi'' = 2.5$

