

Determinação das correntes de curto-circuito

1. Introdução

- Nas instalações eléctricas é, quase sempre, requerida a protecção contra curto-circuitos onde quer que haja uma descontinuidade eléctrica.
- A corrente de curto circuito deve ser calculada, em cada nível de uma instalação eléctrica, tendo em vista a determinação das características dos equipamentos necessárias a suportar ou cortar a corrente de defeito.

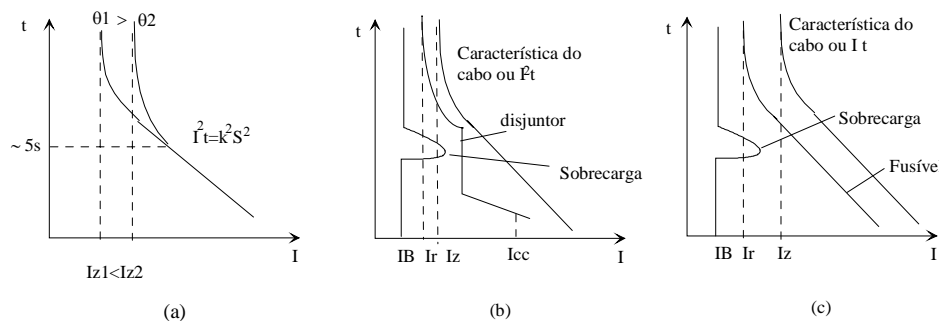
- Dois valores de corrente de curto-circuito devem ser calculadas:
- A corrente máxima de curto circuito é utilizada para determinar
 - i)- o poder de corte dos disjuntores;
 - ii)- o poder de fecho dos disjuntores;
 - iii) – os esforços electrodinâmicos sobre condutores e equipamento.
- A corrente de curto-circuito máxima corresponde a um curto-circuito na imediata vizinhança, a jusante, dos terminais do dispositivo de protecção. Esta corrente deve ser calculado com exactidão e usada com uma margem de protecção

- A corrente mínima de curto - circuito, é essencial quando da selecção da curva tempo/ corrente dos disjuntores e dos fusíveis, em particular quando:
- i)- os circuitos são longos e/ou a impedância da fonte é relativamente elevada (geradores, UPSs);
- ii)- a protecção de pessoas depende da actuação dos disjuntores ou dos fusíveis, essencialmente no sistema eléctricos TN e IT.
- Convém salientar que a corrente de curto-circuito mínima corresponde a um curto-circuito no extremo de uma canalização, geralmente resultante de um defeito fase-terra no caso de instalações em BT ou a de um defeito fase-fase para instalações em MT ou AT já que o neutro não é distribuído.

- qualquer que seja o caso e qualquer que seja ao tipo de intensidade de corrente de curto-circuito, mínima ou máxima, o dispositivo de protecção deverá cortar o curto-circuito dentro de um intervalo de tempo, t_c , compatível com a fadiga térmica admissível pelo cabo a proteger, dada pela expressão (1).

- $$\int i^2 dt \leq k^2 S^2 \quad (1)$$

- em que S é a secção recta da alma condutora e K uma constante calculada com base em diferentes coeficientes de correcção dependentes do modo de instalação, proximidade de circuitos, etc..



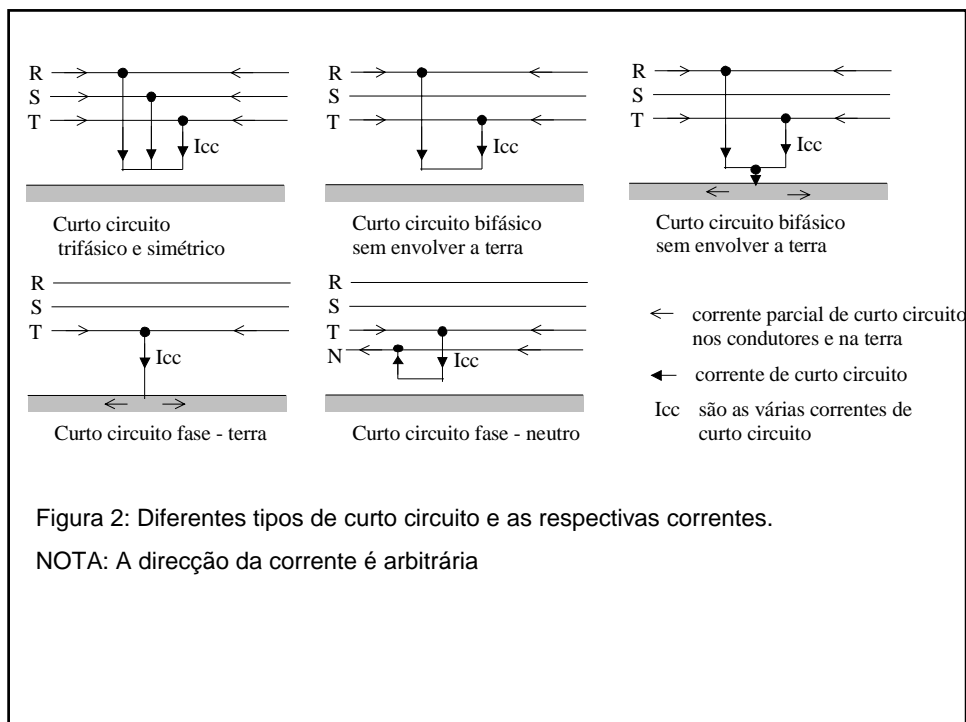
Na figura 1 a) representa-se a característica i^2t de um condutor a duas temperaturas ambientes $\theta_1 > \theta_2$ em que a corrente limite admissível nesse cabo $I_{z1} < I_{z2}$.

Na figura 1 b) e 1 c) representam-se, respectivamente, a condição a verificar na protecção de uma canalização quando se utiliza um disjuntor ou um fusível aM

2. Tipos de curto circuito

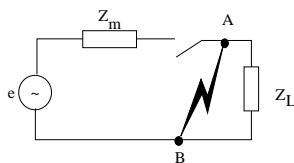
- podem ser caracterizados de várias formas como por exemplo:
- **i)- Duração**
- - **auto - extingüível**: como é o caso de um curto- circuito criado pela humidade a temperatura desenvolvida nesse ponto pode provocar a secagem e assim eliminar o defeito.
- - **transitório**: a falha de isolamento pode introduzir uma impedância relativamente elevada que tende a manter-se originando uma intensidade de corrente superior ao valor da corrente de serviço mas que , na maior parte dos casos, rapidamente evolui para a corrente de curto circuito.
- - **estacionário**: mantém-se se não existir a actuação de um dispositivo de protecção.
- **ii) Origem**
- - **mecânica** : quebra ou corte de um condutor, contacto accidental entre condutores
- - **sobretensões** internas ou de origem atmosférica
- - **falha de isolamento**: devido à temperatura, humidade ou a corrosão
- - **localização**: no interior ou exterior de equipamentos (máquinas ou dispositivos)

- Os curto circuito podem ser do tipo:
- - **fase – neutro**;
- - **fase - terra** : verificando-se este tipo de defeito em cerca de 80% dos casos;
- - **fase –fase** : cerca de 15% dos defeitos verificando-se que normalmente degeneram num curto-circuito trifásico;
- - **trifásico**: apenas 5% dos casos reportados de situações de defeito são resultantes de um curto-circuito que envolve as três fases.
- Na figura 2 representam-se estas diferente situações de curto-circuito



3. Estabelecimento da corrente de curto circuito

- Podemos considerar, de uma forma simplificada, que um rede eléctrica é constituída por uma fonte de energia em corrente alternada, AC, de valor constante, um interruptor, uma impedância Z_m que representa todas as impedâncias a montante do interruptor e uma carga de impedância Z_L .
- Este esquema simplificado encontra-se representado na figura 3



- Numa rede real, a impedância a montante representa o equivalente a tudo o que se encontra a montante do ponto de curto circuito, incluindo as várias redes com diferentes tensões (AT, MT, BT) e a série de condutores de ligação com diferentes secções, S , e comprimentos, ℓ .
- Quando o interruptor, representado na figura 3, se encontra fechado a corrente, designada por corrente de serviço, I_s , circula através da rede

- Quando o defeito ocorre entre A e B, a impedância entre esses ponto é nula (defeito franco), ou desprezável e a corrente aumenta grandemente tornando se na corrente de curto-circuito I_{cc} pois apenas é limitada pela impedância a montante Z_m . A corrente de curto – circuito, I_{cc} que se desenvolve nas condições transitória depende da reactância, X , e da resistência R , que constituem a impedância Z_m .

- $$Z_m = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2)$$

- Nas redes de distribuição de energia a reactância $X = \omega L$ é normalmente muito maior que R e a relação R/X está compreendida entre 0,1 e 0,3. Neste caso podemos considerar que essa a relação é virtualmente igual ao $\cos \varphi_{cc}$ para pequenos valores, isto é:

- $$R = |Z_{cc}| \cos \varphi_{cc} \Rightarrow \cos \varphi_{cc} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (3)$$

- Contudo, as condições transitórias mantêm-se enquanto a corrente de curto circuito varia em função da distância entre a fonte e o ponto onde ocorre o defeito.
- Esta distância, não é necessariamente uma distância física, mas quer significar que a impedância do gerador é menor que a impedância existente entre o gerador e o ponto de defeito.

3.1 Defeito afastado do gerador

- Ocurto-circuito num ponto da rede afastado do gerador constitui uma situação muito frequente. O fenómeno transitório resultante da aplicação de uma tensão a uma impedância constituída por uma resistência e uma reactância. Esta tensão pode ser dada pela expressão geral:

- $$e = E \sin(\omega t + \alpha) \quad (4)$$

- A corrente, i , é então a soma de dois componente:

- $$i = i_a + i_{dc} \quad (5)$$

- Nota: se nos lembrarmos do estudo dos fenómenos transitórios em corrente alternada por aplicação da Lei de Ohm para o circuito R L, obtemos:

- $$E \sin(\omega t + \alpha) = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (6)$$

- A solução desta equação diferencial pode ser escrita a partir da soma do chamado regime livre (transitório) e do regime forçado (permanente), sob a forma

- $$i = Ae^{-\lambda t} + I \sin(\omega t + \alpha - \phi) \quad (7)$$

em que I representa a amplitude da corrente de regime permanente e ϕ o esfasamento imposto pelo circuito em regime permanente

- A constante de integração é obtida a partir das condições iniciais do circuito em que x , representa a solução da equação característica sem segundo membro:

$$Lx + R = 0 \Rightarrow x = -\frac{R}{L} \quad (8)$$

- para o instante $t=0$ podemos considerar que $i=0$ vindo:

$$0 = A + I \sin(\alpha - \phi) \Rightarrow A = -I \sin(\alpha - \phi) \quad (9)$$

- sendo a corrente então dada pela expressão geral (7), podemos escrever (10)

$$i = -I \sin(\alpha - \phi) e^{-\frac{R}{L}t} + I \sin(\omega t + \alpha - \phi) \quad (10)$$

- isto é, a corrente é dada pela soma de um termo contínuo que se vai amortecendo com o tempo dada a existência da exponencial com expoente negativo, com um termo alternado e sinusoidal.

- Será conveniente salientar que a corrente I aqui referida não é mais que a corrente I_{cc} apenas limitada pela impedância a montante que temos vindo a referir. Assim, regressando à expressão (5) o primeiro termo terá é alternado e sinusoidal da forma :

$$i_a = I \sin(\omega t + \alpha) \quad (11)$$

- em I é a corrente máxima dada por :

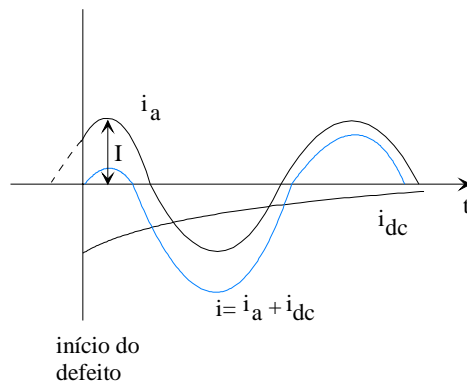
$$I = \frac{E}{|Z_m|} \quad (12)$$

- e α é o ângulo característico correspondente à diferença entre o início do defeito e o zero da tensão.
- O segundo termo de (5) é o termo aperiódico, já que tem a forma:

$$i_{dc} = -I \sin(\alpha) e^{-\frac{R}{L}t} \quad (13)$$

- O seu valor inicial depende de α e o decaimento com o tempo (expoente negativo) depende do valor da relação R/L .

- No início do curto circuito, ($t=0$), a corrente i é nula por definição (a corrente de serviço, I_s , é desprezável).
- A figura 4 representa a soma algébrica das duas componente i_a e i_{dc} .

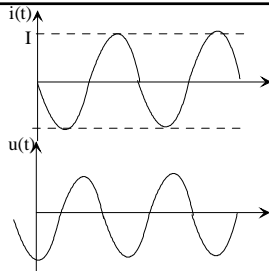


- O momento em que o defeito acontece, ou seja, o instante em que se verifica o curto circuito, em relação à tensão da rede é caracterizado pelo ângulo de esfasamento α . A expressão da intensidade de corrente dada por (10) e (12)

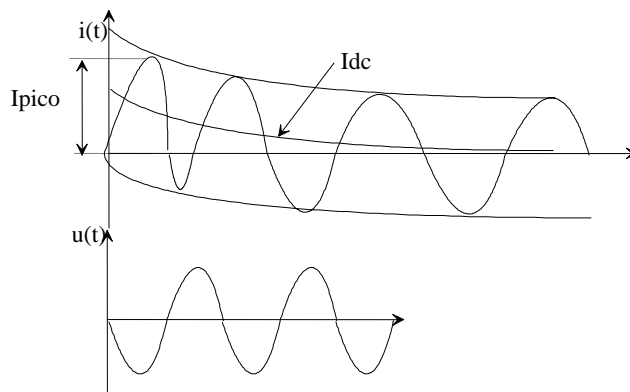
$$i = \frac{E}{|Z_m|} \left[\sin(\omega t + \alpha - \phi) - \sin(\alpha - \phi) e^{-\frac{R}{L}t} \right] \quad (14)$$

- mostra as duas componentes, uma alternada com um esfasamento ϕ em relação à tensão e a outra aperiódica que decai para zero à medida que t tende para infinito

- Considerando os dois casos extremos definidos quando:
- $\alpha = \varphi = \pi/2$
- a **corrente** diz-se, neste caso, **simétrica** já que a corrente varia de forma simétrica em relação ao eixo dos tempos e tem o mesmo desde o início do curto circuito até ao regime final, com um valor de pico (amplitude) igual dado por (12) como mostra a figura 5



- $\alpha = 0$
- A corrente diz-se, neste caso **corrente de curto circuito assimétrica** o valor inicial de pico, I_{pico} , depende ,no entanto de φ isto é da relação R/X do circuito.
- Na figura 6 está representada esta situação em que a corrente tem a expressão dada por (15)
- $$i_{cc,a} = \frac{E}{|Z_m|} \left[\sin(\omega t - \phi) - \sin(-\phi) e^{-\frac{R}{L}t} \right] \quad (15)$$



O factor exponencial da expressão (15) é inversamente proporcional a R/L ou R/X

Nota: Figura mal desenhada nos apontamentos

- O valor da corrente de pico I_{pico} , deve ser então calculado de modo a determinar o poder de fecho dos disjuntores e avaliar os efeitos electrodinâmicos que a instalação deve poder suportar.
- O seu valor pode ser deduzido através do valor eficaz da corrente de curto circuito simétrica, I_{ccs} , utilizando a expressão

$$I_{pico} = KI_{ccs} = K\sqrt{2}I_{ccs(eficaz)} \quad (16)$$

- Os valores até agora descritos na expressões para as corrente e tensões são, como já foi referido valores máximos pelo que trabalhando em valores eficaz, e tratando-se de grandezas sinusoidais, terão de ser divididos por .

$$\sqrt{2}$$

- O valor de K é função da relação R/X ou R/L e tem uma variação típica indicada no gráfico da figura 7:

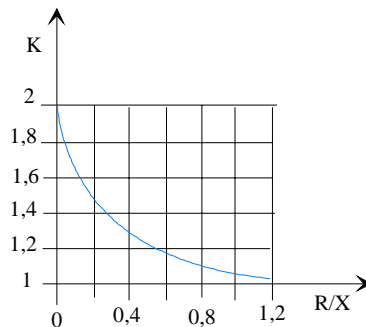


Figura 7: variação de K em função de R/X ou R/L (CEI60909)

3.2 Defeito próximo do gerador

- A variação da impedância do gerador, neste caso é dominante já que os cabos ou condutores terão comprimento pequeno, logo R e X são desprezáveis.
- Assim a impedância do gerador é a única que irá limitar a corrente de curto circuito. O fenómeno transitório que se desenvolve nestas condições é complicado devido à variação da força electromotriz resultante do curto circuito. Por simplicidade a força electromotriz é considerada constante e a reactância interna da máquina geradora é que varia.
- A variação da reactância do gerador varia nas seguintes fases.
 - Período subtransitório: com a duração típica de 10 a 20 ms iniciais.
 - Período transitório: até 500ms
 - Período permanente: parte final, sem variação de valor enquanto durar a causa do curto circuito.(a que corresponde a reactância síncrona da máquina.
- Nestes períodos a reactância cresce em cada estágio ou período o que faz com que a corrente de curto circuito vá sofrendo reduções graduais.

- Dada a velocidade de actuação das protecções (disjuntores e relés de protecção), a abertura do circuito em defeito é realizada durante o período transitório.
- Assim as máquinas e equipamentos devem ser projectados para suportar durante o tempo que dura o período subtransitório, a corrente máxima produzida normalmente designada por **corrente de choque ou de pico** dada pela expressão (16) e os dispositivos de protecção deverão ter um poder de corte nunca inferior a essa intensidade de corrente de pico que é o **valor máximo da corrente assimétrica de curto circuito**

- Para finalizar, convém lembrar que:
- será também o valor máximo da corrente assimétrica de curto circuito o utilizados na determinação dos esforço electrodinâmicos que os dispositivos e materiais (isoladores, condutores, barramentos) deverão suportar.
- Em redes de distribuição em BT e em HT a corrente de curto circuito no período transitório é muitas vezes utilizada se o corte dos circuitos ocorrerem antes do regime permanente. Nestes casos torna-se útil utilizar o poder de corte designado por I_b , que determina o poder de corte correspondente a um atraso dos disjuntores. O valor I_b será o valor da corrente de curto circuito no momento da abertura efectiva. Este tempo de abertura efectiva será dado pela soma do tempo de operação mínima do relé com o tempo mínimo

4. Cálculos normalizados das corrente de curto circuito

- As normas propõem vários métodos
- O guia de aplicação C 15-105 que suplementa a norma Francesa NF C15-100 na parte correspondente a instalações de corrente alternada em baixa tensão apresenta em detalhe quatro métodos
- **O método das impedâncias:** consiste em adicionar as várias resistências e somando as várias reactâncias, da malha de defeito separadamente, desde a fonte(incluindo esta), até ao ponto onde se verifica o defeito e calculando a impedância correspondente e fazer:

$$I_{cc} = \frac{U_n}{\sum Z}$$

não são tomados em conta alguns factores como:
 - a reactância dos disjuntores e barramentos;
 - a resistência das máquinas rotativas

- **O método de composição:** que pode ser usado quando as características das fontes de alimentação são desconhecidas.
- A impedância do circuito a montante é calculada com base num valor estimado da corrente de curto circuito na origem. O factor de potência, que como vimos era dado por:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{R}{X}$$

- é considerado idêntico tanto na origem do circuito como no ponto de defeito. Isto quer dizer que se considera que dois troços sucessivos de uma instalação eléctrica têm impedâncias elementares suficientemente semelhantes em termos de características para se considerar que a soma vectorial dessas impedâncias como a soma algébrica.
- Esta aproximação pode ser utilizada na determinação do valor do módulo da corrente de curto circuito com exactidão suficiente apenas para instalações com potência até aos 800kVA

- **O método convencional:** é aquele que pode ser usado quando a impedância ou a corrente de curto circuito Icc a montante de um dado circuito não é conhecida.

Serve para:

- para determinar a corrente mínima de curto circuito e a corrente de defeito no fim de uma linha.
- É baseado no facto de se considerar que a tensão na origem é igual a 80% da tensão nominal da instalação durante o curto circuito ou durante o defeito considerado.
- Considera-se, neste método apenas a impedância dos condutores. Tipicamente utiliza-se apenas a resistência e aplica-se um factor maior que a unidade aos condutores com secções elevadas de modo a ter em conta a reactâncias. Os factores são do tipo:

Factores	Secções
1,15	150mm ²
1,20	185 mm ²

Este método é muito utilizado nos circuitos terminais de uma instalação, cuja origem está muito afastada da fonte de energia da rede

- **O método simplificado:** é normalmente baseado no uso de tabelas construídas à custa de numerosas considerações simplificativas, indicando para cada secção dos condutores:
 - a corrente estipulada dos dispositivos de protecção contra sobrecargas;
 - comprimentos máximos protegidos, isto é ,que garante a protecção de pessoas contra contactos indirectos;
 - comprimentos máximos permitidos que garantem as quedas de tensão.
- As referidas tabelas são calculadas utilizando essencialmente os métodos da composição e o convencional.
- O campo de aplicação deste método é o da BT 230/400V.

- As normas CEI 909 (VDE0102) aplicam-se a todas as redes, radiais ou malhadas até 230KV. Este método, baseado no teorema de Thevenin calcula a fonte de tensão equivalente no ponto de curto circuito e determina a corrente de curto circuito correspondente.
- Todas as redes, as máquinas síncronas e assíncronas são substituídas, nos cálculos pelas suas impedâncias (directa, inversa e homopolar).
- Todas as capacidades das linhas, e admitâncias em paralelo de máquinas não rotativas, são desprezadas excepto as homopolares.
- Outros métodos usam o princípio da sobreposição e necessitam que a corrente de carga seja previamente calculada. A norma CEI 0103 (VDE 865) propõe um método que calcula o corrente de curto circuito termicamente equivalente.

4.1.2 Cálculo da corrente de curto circuito

- As correntes de curto circuito dependem do tipo de curto circuito a considerar. Assim teremos:
- **Curto - circuito trifásico**
- Se o curto circuito envolve as três fases a corrente de curto circuito é dada por:

$$I_{cc_{3f}} = \frac{U_c}{\sqrt{3}Z_{cc}} = \frac{\frac{U_c}{\sqrt{3}}}{Z_{cc}} = \frac{U_o}{Z_{cc}}$$

- U_c é a tensão composta, correspondente à tensão ou do transformador em vazio que é considerada 3 a 5% superior à tensão do transformador em carga.
- Para calcular Z_{cc} , (veja-se a figura 8). De facto a impedância do sistema directo por fase é dada por :

- $$Z_{cc} = \sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2} \quad (18)$$

O cálculo ou determinação da corrente de curto circuito trifásico I_{cc3f} é essencial para a selecção do equipamento no que diz respeito ao poder de corte e de fecho e a esforços electrodinâmicos.

- **Curto - circuito fase-fase sem envolver a terra**

- É um defeito entre duas fases, e neste caso a tensão a considerar é a tensão composta U_c . Assim I_{cc2f} é menor que a que se verifica no caso anterior já que:

- $$(19)$$

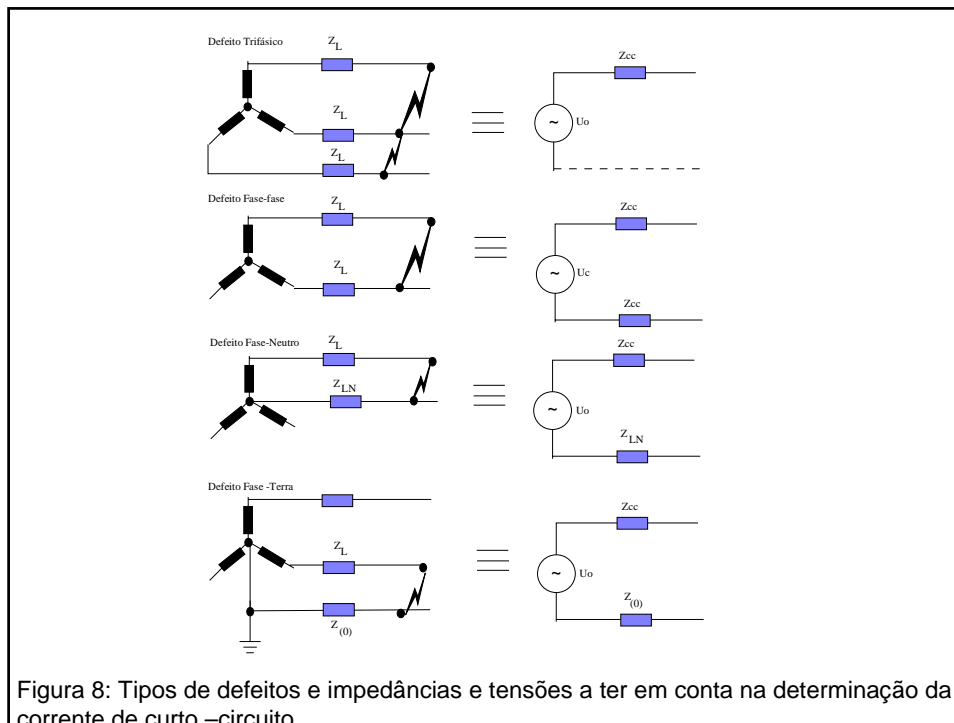
$$I_{cc_{2f}} = \frac{U_c}{2Z_{cc}} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{cc_{3f}} = 0,86 I_{cc_{3f}}$$

- **Curto - circuito fase-neutro sem envolver a terra**
- Este curto-circuito é um defeito entre uma fase e o neutro, logo, a tensão a considerar é a tensão simples e a corrente I_{cc1f} é dada por:

- $$I_{cc1f} = \frac{\frac{U_c}{\sqrt{3}}}{Z_{cc} + Z_{LN}} = \frac{U_o}{Z_{cc} + Z_{LN}} \quad (20)$$

Em certos casos especiais de defeitos fase – neutro, a impedância homopolar das fontes é menor que Z_{cc} (por exemplo: aos terminais de uma transformador estrela-zigzag ou gerador em regime subtransitário). Neste caso a corrente de defeito fase – neutro pode ser maior que num curto-circuito trifásico

- **Curto - circuito fase- terra**
- Este tipo de defeito põe em jogo a impedância homopolar $Z(0)$. Excepto quando máquinas rotativas estão envolvidas (impedâncias homopolares baixas), a corrente de curto circuito I_{cc0} é menor que a trifásica.
- O cálculo de I_{cc0} torna-se necessário num sistema de neutro à terra ,(TT), quando se pretende determinar ou escolher os dispositivos de protecção em BT ou ajustar os patamares de disparo dos dispositivos homopolares em HT



4.1.3 Determinação das várias impedância de curto – circuito

- Impedância da rede
- Impedância a montante
- De uma forma geral, pontos a montante da fonte de energia não são tomados em conta. Os dados disponíveis da rede a montante são limitados apenas à informação do distribuidor sobre a potência de curto circuito S_{cc} , em MVA
- Assim a impedância equivalente da rede a montante é dada por:

$$Z_m = \frac{U_c^2}{S_{cc}}$$

- Impedância interna de transformador
- A impedância dos transformadores pode ser calculada tendo em conta a tensão de curto circuito, u_{cc} , expressa em % .
- $$Z_T = \frac{U_c^2}{S_T} \times u_{cc} \quad (23)$$
- em que U_c é a tensão composta em vazio do transformador, S_T
- Para transformadores de distribuição pública os valores de u_{cc} são fixados por norma europeia em documento Harmonizado (HD428-1S1) de Outubro de 1992 e que pode ser transcrita na tabela

Potência nominal de transformadores HT/BT em kVA	≤630	800	1000	1250	1600	2000
Tensão de curto-circuito u_{cc} (%)	4	4,5	5	5,5	6	7

Em geral a resistência do transformador é muito menor que a reactância e por isso, a impedância do transformador pode ser considerada da mesma ordem de grandeza da reactância. Contudo, para baixas potência o cálculo de Z_T é necessário dado que a relação R_T/X_T é maior. O valor da resistência é então determinado utilizando as perdas por efeito de Joule, W , nos enrolamentos do transformador.

$$W = 3R_T I_n^2 \Rightarrow R_T = \frac{W}{3I_n^2} \quad (24)$$

Não podemos esquecer que:

1)- quando n transformadores idênticos são ligados em paralelo, as suas impedâncias internas estão também em paralelo pelo que o valor da resistência e da reactância do conjunto será obtida dividindo por n a de um deles (todas são iguais).

- 2)- os transformadores utilizados em unidades rectificadores têm ucc da ordem dos 10 a 12% de forma a limitar a corrente de curto circuito. Quando a impedância a montante do transformador e a sua impedância interna são consideradas, a corrente de curto circuito pode ser expressa por:

$$I_{cc} = \frac{U_c}{\sqrt{3}(Z_m + Z_T)} \quad (25)$$

- Inicialmente, a impedância a montante e a do transformador são tomadas como reactâncias puras e a impedância de curto circuito Z_{cc} é então dada pela soma algébrica das duas.

• Impedância das ligações

Corrente	Resistividade(*)	ρ (Ωmm ² /m)		Condutores envolvidos
		Cobre	Alumínio	
I_{cc} máxima	$\rho_1 = 1,25\rho_{20}$	0,0225	0,036	Fase-neutro
I_{cc} mínima	$\rho_1 = 1,5\rho_{20}$	0,027	0,043	Fase-neutro
Corrente de defeito nos sistemas TN e IT	$\rho_1 = 1,25\rho_{20}$	0,0225	0,036	Fase-neutro(**) Pe-PEN
Queda de tensão	$\rho_1 = 1,25\rho_{20}$	0,0225	0,036	Fase-neutro(**)
Verificação da fadiga térmica em condutores, Sobrecargas.	$\rho_1 = 1,5\rho_{20}$	0,027	0,043	Fase-neutro PE-PEN se no mesmo cabo
	$\rho_1 = 1,25\rho_{20}$	0,0225	0,036	PE separado

(*) ρ_{20} é a resistividade dos condutores a 20°C. 0,018Ωmm² /m para o cobre e 0,029Ωmm² /m para o alumínio.

(**) N, a secção recta do condutor de neutro é menor que a secção do condutor de fase

