

# Os efeitos das correntes de curto-circuito nos conjuntos de aterramento de proteção temporários

**Tema:** Redes de Distribuição

**Autores:** Breno Pereira Gomes de Souza

**Co-Autores:** -

**Empresa:** Breno Souza Consultoria

---

## Resumo

Este artigo aborda os impactos das correntes de curto-circuito nos conjuntos de aterramento de proteção temporários, destacando sua importância para a segurança de trabalhadores durante as atividades de manutenção em circuitos desenergizados. São explorados de forma introdutória alguns dos motivos que levam a energização acidental do circuito e o desenvolvimento apresenta uma análise detalhada dos efeitos das correntes de curto-circuito sobre os conjuntos de aterramento, abordando fatores como efeitos térmicos e forças eletromagnéticas que podem comprometer a integridade dos componentes. Além disso, são discutidas práticas visando à mitigação de riscos e à conformidade com padrões internacionais de segurança.

## 1. Introdução

Este artigo explora os efeitos das correntes de curto-circuito nos conjuntos de aterramento de proteção temporário, destacando sua importância como dispositivos críticos para a segurança em atividades de manutenção elétrica. Os conjuntos, compostos por cabos, terminais, grampos e outros elementos, desempenham a função de desviar as correntes de falha e sensibilizar as proteções do circuito, protegendo os trabalhadores contra choques elétricos e reduzindo os riscos de acidentes graves. O texto aborda inicialmente os princípios técnicos que fundamentam o uso de aterramentos temporários, enfatizando sua relevância para garantir condições seguras durante intervenções em redes desenergizadas. O papel desses dispositivos é amplamente discutido no contexto das falhas elétricas, com ênfase no impacto das correntes de curto-circuito, que podem gerar forças térmicas e eletrodinâmicas intensas, comprometendo tanto a segurança dos trabalhadores quanto a integridade dos equipamentos. A análise técnica apresentada no artigo detalha os fatores que afetam o desempenho dos conjuntos de aterramento, como os efeitos térmicos provocados pelas correntes de curto-circuito, bem como as forças eletromagnéticas que atuam sobre o conjunto durante o momento de falha. Outro ponto de destaque é a influência das características das correntes de curto-circuito, como magnitude e duração, nos esforços a que os conjuntos de aterramento são submetidos. O artigo examina os desafios relacionados aos efeitos térmicos e às forças que incidem sobre os conjuntos. Com uma abordagem prática e fundamentada, o artigo busca não apenas esclarecer os conceitos envolvidos, mas também oferecer subsídios técnicos para a escolha e o uso adequado de conjuntos de aterramento de proteção temporária. Assim, ele se posiciona como um recurso valioso

para engenheiros, técnicos e profissionais do setor elétrico que lidam com a instalação e manutenção de redes. Ao fornecer uma visão abrangente e detalhada, o trabalho contribui para a disseminação de boas práticas e o fortalecimento da cultura de segurança no setor elétrico, promovendo uma maior conscientização sobre os riscos associados e as medidas de mitigação mais eficazes.

## 2. Desenvolvimento

### === Conjuntos de Aterramento de Proteção Temporário

O aterramento temporário consiste na aplicação de dispositivos condutores que conectam os circuitos a um ponto de potencial zero (terra), ao mesmo tempo em que fornecem um caminho alternativo de baixa impedância em paralelo aos trabalhadores durante a realização das atividades de manutenção.

Os conjuntos de aterramento de proteção temporário desempenham um papel essencial na segurança do trabalho em instalações elétricas desenergizadas quando da ocorrência de uma energização acidental. Quando corretamente instalados e dimensionados, são eles que sensibilizam as proteções de retaguarda para efetivar o desligamento do circuito, ao mesmo tempo em que garantem a equipotencialidade entre as partes do circuito e o ponto de trabalho e minimizam as correntes sobre os trabalhadores. Desta forma, eles protegem os trabalhadores contra os riscos associados à energização acidental do circuito.

Os motivos para uma energização acidental podem ser vários, por exemplo:

- \* Falhas Operacionais, nas quais a energização decorre por erros de manobra do circuito ou erros na comunicação e sinalização;
- \* Indução eletromagnética, onde correntes podem ser induzidas no circuito em decorrência à proximidade de campos eletromagnéticos de linhas energizadas próximas ou em decorrência de descargas atmosféricas;
- \* Falhas em sistemas de proteção, quando equipamentos defeituosos podem energizar o circuito (relés, disjuntores, chaves seccionadoras, religadores, etc.);
- \* Correntes de retorno, quando em certas condições, podem retornar pelo sistema neutro por meio de condutores aterrados e energizar partes do circuito;
- \* Atos externos e ambientais, como energizações por atos de vandalismo, acidentes com queda de condutores ou quebra de postes, eventos naturais como queda de árvores, contato de objetos estranhos na rede, ou queda de raios em componentes do circuito;
- \* Interligações, quando ocorrem ligações cruzadas entre circuitos que em situações normais não estão interconectados;
- \* Geração distribuída, onde geradores ou painéis solares podem energizar o circuito em situações de falhas nas proteções, ou quando não forem devidamente desconectados.

Como vemos, há inúmeras possibilidades de energização acidental de um circuito. Isto demonstra a grande importância da utilização dos conjuntos de aterramento temporário e o papel crucial que eles desempenham para garantir a segurança das equipes em tarefas executadas com circuitos desenergizados.

Contudo, o simples fato de instalar um conjunto de aterramento não garante por si só a segurança da equipe. Durante um evento de energização acidental, todo o conjunto sofre grandes exigências térmicas

e mecânicas impostas pelas correntes de curto-circuito que percorrem o aterramento. Entender esses fenômenos é essencial para mitigar riscos e garantir a integridade dos conjuntos. Um equipamento mal dimensionado, mesmo em perfeito estado de conservação, pode falhar diante destes esforços. Portanto, conhecer quais são nestas exigências e como elas afetam o aterramento temporário é fundamental para garantir um correto dimensionamento e a segurança destes equipamentos. Exploramos a seguir as correntes de curto-circuito e seus efeitos sobre os conjuntos de aterramento de proteção temporário.

#### === Correntes de Curto-Circuito

A energização de um circuito aterrado é uma condição anormal no sistema elétrico onde a baixa impedância entre os condutores fase e o terra resulta em correntes muito elevadas, denominadas correntes de curto-circuito.

As correntes de curto-circuito em redes elétricas podem ser classificadas como simétrica ou assimétrica, dependendo das características do circuito e das componentes de corrente no instante da falha. Entender as diferenças entre elas é fundamental para o dimensionamento dos aterramentos de proteção temporários.

#### ==== Correntes de curto-circuito simétricas

##### ===== Características Principais

A corrente de curto-circuito simétrica é composta exclusivamente pela componente alternada (AC), a qual oscila de forma senoidal e segue a frequência da rede elétrica. Essa corrente não possui componente contínua (DC), o que faz com que a sua forma de onda seja equilibrada ao redor do ponto zero desde o início do curto-circuito.

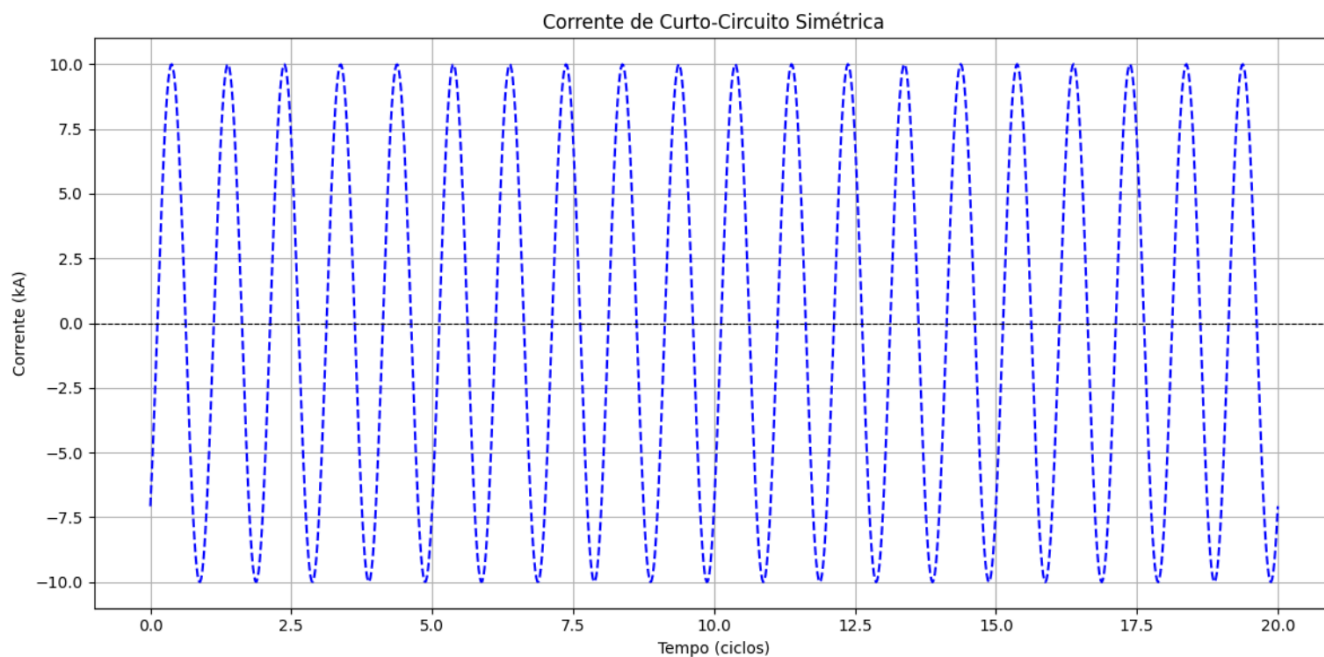
A equação que descreve uma corrente de curto-circuito puramente simétrica é dada por:

$$I_{\text{sim}}(t) = I_{\text{máx}} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \theta) \quad (1)$$

Onde:

- \*  $I_{\text{sim}}(t)$ : Corrente simétrica no tempo  $t$ .
- \*  $I_{\text{máx}}$ : Amplitude de pico da corrente simétrica.
- \*  $\sin$ : Função seno que descreve o comportamento alternado da corrente.
- \*  $\omega$ : Frequência angular, dada por  $\omega = 2\pi f$ .
- \*  $t$ : Tempo, em segundos.
- \*  $\alpha$ : Ângulo de fase da tensão no início da corrente, em radianos.
- \*  $\theta$ : Ângulo de fase do circuito, em radianos.

Esta equação produz o gráfico para uma corrente simétrica, conforme apresentado na figura 1



*figura 1. Comportamento da corrente de curto-circuito puramente simétrica*

#### ==== Condições para a corrente simétrica

A corrente de curto-circuito pode ser considerada simétrica em duas situações:

. Quando o valor da relação  $\text{stem:}[X/R]$  do circuito é baixo, quanto menor for essa relação, menor será o tempo necessário para que a componente transitória (componente contínua) se dissipe. Em circuitos com baixa reatância e alta resistência, a componente contínua é rapidamente amortecida, apresentando um comportamento predominantemente simétrico. A norma ASTM F855 considera circuitos com correntes de curto-circuito simétricas aqueles onde o valor de  $(X/R \leq 1.8)$ ;

. Quando o curto ocorre em um momento específico do ciclo da tensão em que não há diferença significativa entre a fase da tensão e a corrente. Nesse caso, a corrente desenvolve-se sem um deslocamento de forma de onda, mantendo a simetria ao redor do eixo horizontal.

#### ==== Correntes de curto-circuito assimétricas

As correntes de curto-circuito assimétricas são um fenômeno elétrico fundamental a ser considerado no projeto e operação do sistema elétrico. Elas influenciam diretamente o desempenho dos dispositivos de proteção e o dimensionamento de equipamentos devido aos esforços térmicos e mecânicos causados pela sua alta magnitude inicial.

As correntes de curto-circuito assimétricas são aquelas que apresentam uma forma de onda desequilibrada ao redor do eixo zero no início da falha. Esse comportamento é resultado da superposição de duas componentes:

\* \*\*Componente Alternada (AC)\*\*: Parte da corrente que oscila de acordo com a frequência do sistema, mantendo a forma de onda senoidal.

\* \*\*Componente Contínua (DC)\*\*: Componente não oscilante, que decai exponencialmente com o tempo e não acompanha a frequência da rede.

A corrente de curto-circuito assimétrica ( $I_{\text{assim}}$ ) pode ser expressa pela soma das componentes simétrica (AC) e assimétrica (DC):

$$I_{\text{assim}} = I_{AC} + I_{DC} \quad (2)$$

Substituindo os componentes:

$$I_{\text{sim}}(t) = I_{\text{máx}} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \theta) - I_{\text{máx}} \cdot \sin(\alpha - \theta) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

$$I_{\text{sim}}(t) = I_{\text{máx}} \cdot (\sin(\omega t + \alpha - \theta) - \sin(\alpha - \theta) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (4)$$

Onde:

- \*  $I_{\text{sim}}(t)$ : Corrente simétrica no tempo  $t$ .
- \*  $I_{\text{máx}}$ : Amplitude de pico da corrente simétrica.
- \*  $\sin$ : Função seno que descreve o comportamento alternado da corrente.
- \*  $\omega$ : Frequência angular, dada por  $\omega = 2\pi f$ .
- \*  $t$ : Tempo, em segundos.
- \*  $\alpha$ : Ângulo de fase da tensão no início da corrente, em radianos.
- \*  $\theta$ : Ângulo de fase do circuito, em radianos.
- \*  $e^{-\frac{t}{\tau}}$ : Decaimento exponencial da componente contínua ao longo do tempo.
- \*  $\tau$  é a constante de tempo, dada por  $\tau = \frac{L}{R}$ , onde  $L$  é a indutância e  $R$  a resistência do circuito.

Esta equação produz o gráfico para uma corrente simétrica, conforme apresentado na <<fig2, figura 2>>

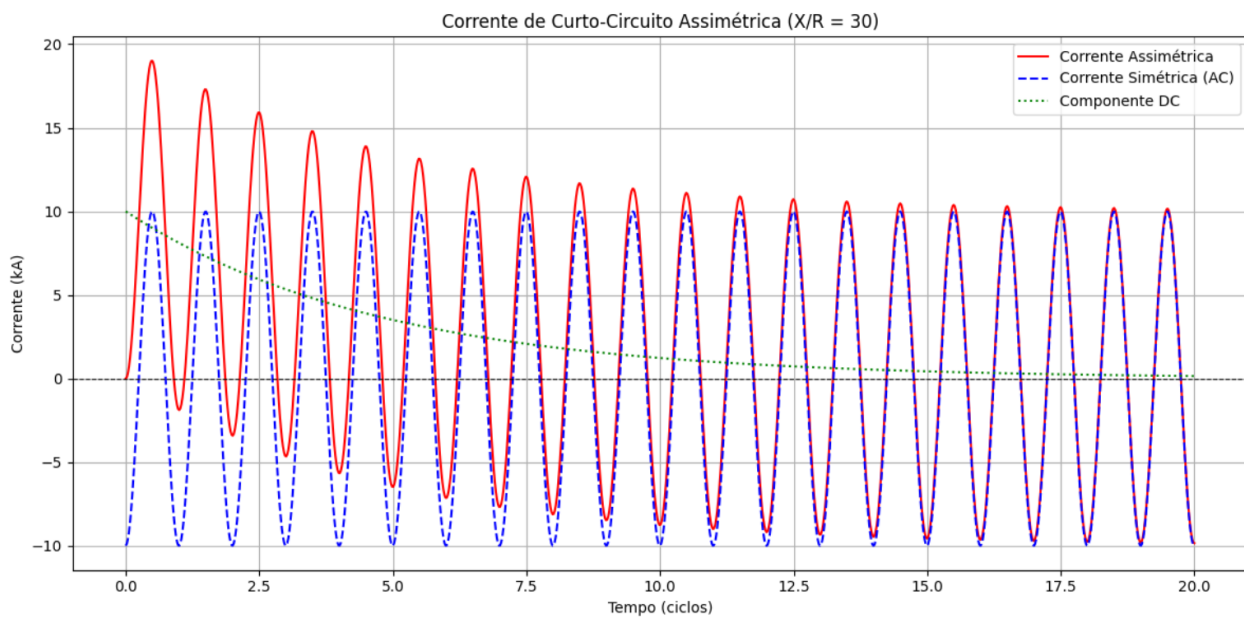


figura 2. Comportamento da corrente de curto-circuito assimétrica

Quando ocorre um curto-circuito, a corrente DC transitória é introduzida na corrente total. Essa componente transitória surge devido ao instante exato em que a falha ocorre na onda de corrente AC. Se a falha ocorre quando a diferença do ângulo de fase da tensão e o ângulo de fase do circuito é máxima, a corrente DC será mais elevada. A taxa de decaimento dessa corrente DC é determinada pela constante de tempo do sistema ( $\tau$ ), que é proporcional à relação  $(X/R)$ :

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{X}{\omega R} \quad (5)$$

Uma alta relação  $(X/R)$  significa que a constante de tempo é maior, e, portanto, o decaimento da corrente DC será mais lento, prolongando a presença de uma alta corrente de curto-circuito assimétrica.

No caso de uma corrente de curto-circuito assimétrica, a componente contínua é significativa, especialmente no instante inicial do curto-circuito, o que resulta em uma corrente de valor elevado no início da falta. Com o tempo, essa componente contínua se dissipa, e a corrente se estabiliza em uma forma de onda simétrica senoidal. Como vimos, o grau de assimetria depende de fatores como o ponto do ciclo da tensão em que o curto-circuito ocorre e a relação  $(X/R)$  do sistema.

### === Causas da Corrente de Curto-Circuito Assimétrica

A corrente de curto-circuito assimétrica ocorre por diversos fatores. Estes fatores estão relacionados às características do sistema elétrico e ao instante em que ocorre o curto. Vamos explorar um pouco cada um destes fatores a seguir.

#### ==== Relação stem:[X/R] do Sistema

A relação stem:[X/R] determina a magnitude e a persistência da componente assimétrica DC. Em sistemas com uma relação stem:[X/R] elevada, a reatância indutiva stem:[X] é muito maior que a resistência stem:[R], o que faz com que a componente DC inicial persista por mais ciclos. Isso é comum em redes de média tensão próximas a subestações, onde a presença de equipamentos indutivos é significativa.

#### ==== Ângulo de Fase Inicial da Corrente no Momento do Curto-Circuito

A corrente de curto-circuito assimétrica ocorre tipicamente quando a falha se inicia em um ponto do ciclo da tensão onde a forma de onda não atravessa o zero. Quando o curto ocorre em um ponto do ciclo onde a tensão é máxima, a componente DC é maximizada, resultando em um pico inicial elevado na corrente.

#### ==== Localização do Curto-Circuito

A localização do curto-circuito na rede elétrica influencia diretamente a relação stem:[X/R] e, consequentemente, a magnitude da corrente assimétrica.

Próximo à fonte: circuitos próximos a subestações ou geradores têm alta reatância e baixa resistência, resultando em alta assimetria.

Pontos distantes da fonte: Em áreas mais afastadas da subestação, a resistência da linha tende a aumentar em relação à reatância, reduzindo a assimetria da corrente.

#### ==== Condições de Operação do Sistema

As condições de operação da rede elétrica, como topologia, carga conectada e características dos transformadores, também afetam o comportamento das correntes de curto-circuito:

Sistema leve (baixa carga): Níveis de corrente menores resultam em maior proporção de reatância sobre resistência, aumentando a assimetria.

Sistema pesado (alta carga): Com correntes mais elevadas, a resistência relativa aumenta, reduzindo o efeito assimétrico.

Sistemas com diferentes fontes de energia interconectadas apresentam topologias complexas, que influenciam as características das correntes de curto-circuito. A presença de geração distribuída, como pequenas usinas solares ou eólicas, afeta a relação stem:[X/R], dependendo da impedância interna de cada fonte. Essas fontes frequentemente possuem maiores resistências relativas em comparação aos geradores síncronos tradicionais, o que pode reduzir a assimetria da corrente de curto-circuito.

Circuitos em regiões industriais com cargas fortemente indutivas conectadas, como: motores de indução de grande porte, fornos de indução, transformadores, reatores, etc., possuem um maior valor de stem:[X], o que eleva o valor de stem:[X/R] e consequentemente o efeito assimétrico da corrente de curto-circuito.

Os transformadores desempenham uma influência significativa na modificação da relação  $\text{stem:}[X/R]$  em diferentes partes do sistema. Transformadores próximos ao ponto de curto-circuito aumentam a reatância equivalente devido às suas características de impedância, especialmente em configurações com altas relações de transformação. Quando o curto ocorre no lado de alta tensão, a predominância de reatância  $\text{stem:}[X]$  é maior, aumentando a assimetria da corrente.

==== Fator de assimetria

O fator de assimetria é uma medida que descreve o grau de deformação da forma de onda da corrente de curto-circuito devido à presença da componente assimétrica DC transitória.

A equação que define o fator de assimetria de pico é expressa como:

$$F_{\text{pico}} = \sqrt{2} \cdot \left( 1 + e^{\frac{-2\pi}{X/R} \cdot t} \right) \quad (6)$$

Onde:

\*  $\text{stem:}[F_{\text{pico}}]$ : É o fator de assimetria de pico.

\*  $\text{stem:}[t]$ : É o tempo, expresso em \_ciclos\_.

\*  $\text{stem:}[X/R]$ : Relação entre reatância  $\text{stem:}[X]$  e resistência  $\text{stem:}[R]$  da rede elétrica no ponto de curto-circuito.

Essa equação reflete a magnitude do fator de assimetria inicial, que combina componentes simétricas e assimétricas da corrente de curto-circuito, e como ela decai exponencialmente em função da razão  $\text{stem:}[X/R]$  e do tempo  $\text{stem:}[t]$ .

O fator de assimetria de pico para meio ciclo para vários valores de  $X/R$  é mostrado no gráfico na <<fig3, figura 3>>.



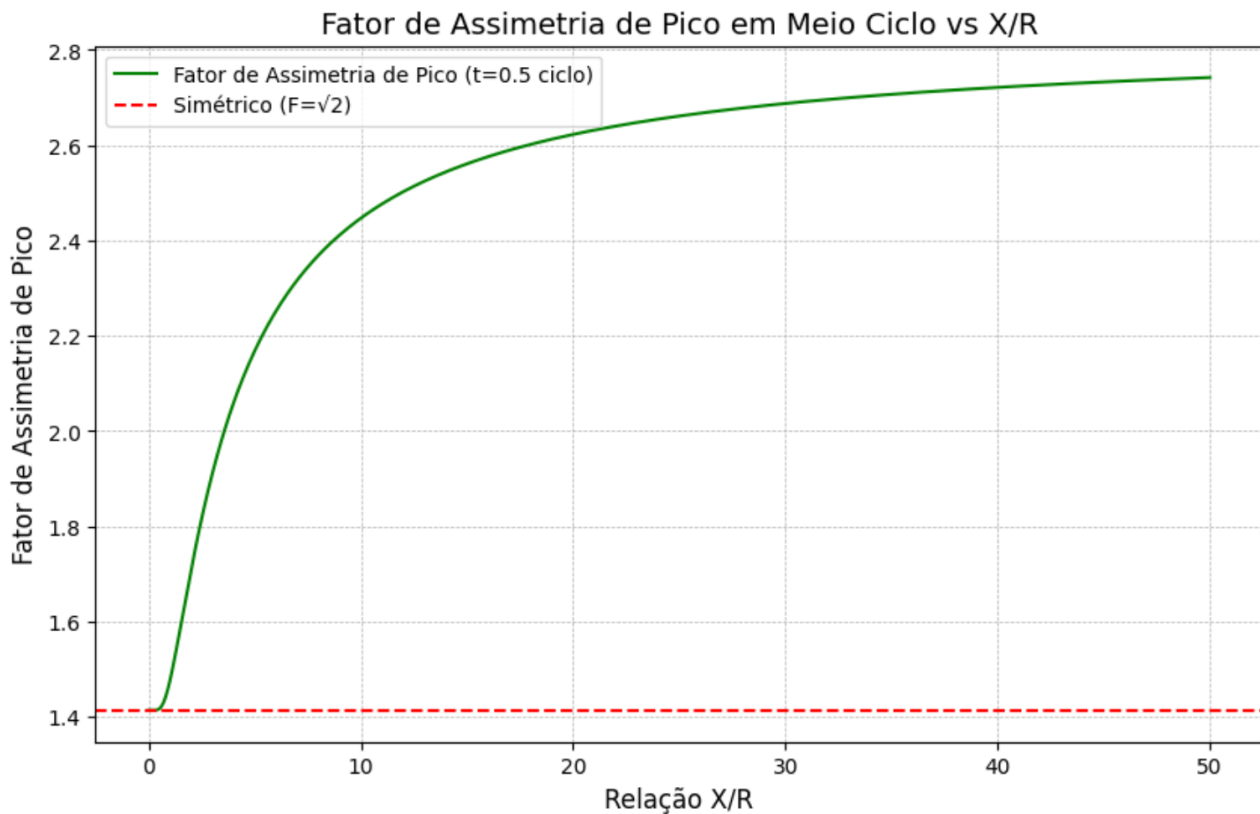


figura 3. Fator de assimetria de pico para valores de X/R

== Efeitos térmicos das correntes de curto-circuito nos conjuntos de aterramento de proteção temporário  
Os efeitos térmicos das correntes de curto-circuito decorrem do calor gerado pela circulação de correntes elevadas e à resistência elétrica dos materiais condutores, conhecido como efeito Joule. Essa dissipação de energia térmica pode causar danos consideráveis aos conjuntos de aterramento de proteção temporário.

A equação que representa a energia dissipada em forma de calor durante um curto-circuito é dada por:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (7)$$

Onde:

- stem:[Q]: É a energia dissipada em forma de calor (Joules,  $( J )$ ).
- stem:[I]: Corrente elétrica que atravessa o condutor (Amperes,  $( A )$ ).
- stem:[R]: Resistência elétrica do condutor (Ohms,  $( \Omega )$ ).
- stem:[t]: Duração do curto-circuito (segundos,  $( s )$ ).

Vemos portanto que:

\* Quanto maior a corrente, maior será a energia dissipada, já que o termo  $( I^2 )$  é quadrático.

\* A resistência dos componentes do aterramento converte energia elétrica em energia térmica devido ao efeito Joule.

\* Um curto de longa duração pode causar uma dissipação significativa de calor, aumentando os danos ao conjunto.

Esta equação é fundamental para a análise térmica durante condições de curto-circuito.

Os efeitos térmicos de um curto-circuito nos conjuntos de aterramento se manifestam da seguinte forma:

\* Fusão de condutores: A elevação rápida e intensa da temperatura pode levar à fusão dos condutores, principalmente nos pontos de maior resistência, como em conexões comprometidas ou pontos com elevada resistência de contato.

\* Danos a coberturas protetoras: O calor extremo pode degradar ou queimar material de proteção do cabo de aterramento expondo o condutor e aumentando o risco de falhas subsequentes.

\* Expansão térmica: A dilatação térmica dos materiais pode causar deformações permanentes nos grampos, terminais, conectores e outros componentes metálicos do conjunto.

=== A Equação de Onderdonk

A Equação de Onderdonk nos permite estimar a elevação de temperatura em condutores durante condições de sobrecorrente, principalmente em curtos-circuitos. Ela é especialmente utilizada para determinar a capacidade de corrente que um condutor pode suportar sem sofrer deformações ou fusão devido ao calor gerado pela corrente.

$$33 \left( \frac{I}{A} \right)^2 S = \log \left( \frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right) \quad (8)$$

$$I = A \left( \frac{\log \left( \frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right)}{33S} \right)^{1/2} \quad (9)$$

Onde:

\* stem:[I] é a corrente máxima que um condutor pode suportar, em \_amperes\_;

\* stem:[A] é a área do condutor, em \_circular mils\_;

\* stem:[S] é o tempo de corrente aplicada, em \_segundos\_;

\* stem:[T\_m] é o ponto de fusão do cobre, em \_graus Celsius\_;

\* stem:[T\_a] é a temperatura ambiente, em \_graus Celsius\_.

Esta equação tem como base a relação entre o calor gerado pelo efeito Joule e a resistência térmica do condutor, determinando a corrente máxima que pode passar por ele sem risco de fusão.

Embora eficaz, a Equação de Onderdonk tem limitações, especialmente por não considerar dissipação de calor ao ambiente ou variações nos materiais do condutor. Portanto, sua aplicação é geralmente restrita a condições específicas de curto-circuito e é mais precisa para durações de tempo muito curtas.

Na prática, a Equação de Onderdonk é usada no dimensionamento de condutores em sistemas onde ocorrem curtos-circuitos. Ela permite dimensionar a espessura e os materiais dos condutores para que possam suportar as sobrecorrentes, garantindo que a infraestrutura elétrica suporte eventos transitórios sem danos permanentes.

==== Utilização da equação de Onderdonk para cálculo das correntes máximas para um condutor de  $\sqrt{34\text{mm}^2}$

A seguir apresentamos os valores de correntes máximos obtidos com a equação de Onderdonk para um condutor de  $\sqrt{34\text{mm}^2}$

*tabela 1. Valores de corrente máxima para um condutor de  $34\text{mm}^2$  calculados por meio da equação de Onderdonk*

Tempo (s)	Corrente (A)
0,167	36.488
0,333	25.801
0,500	21.066
0,667	18.244
0,833	16.318
1,000	14.896

== Efeitos mecânicos das correntes de curto-circuito nos conjuntos de aterramento de proteção temporário  
Os sistemas elétricos estão sujeitos a diferentes tipos de esforços mecânicos durante sua operação, e um dos mais críticos ocorre durante eventos de curto-circuito. Nesses casos, o aumento abrupto da corrente gera intensas forças eletromagnéticas que podem comprometer a integridade dos condutores e das estruturas adjacentes ao local do curto-circuito.

=== Forças eletromagnéticas

As forças eletromagnéticas resultam da interação entre correntes elétricas e campos magnéticos. Essas forças podem causar deformações significativas em condutores, especialmente durante curtos-circuitos,

quando as correntes atingem valores extremamente altos.

Quando uma corrente percorre um condutor, ela gera um campo magnético ao seu redor. Durante um curto-circuito, o aumento súbito da corrente amplifica esse campo magnético, gerando forças proporcionais à interação com outros condutores ou com o próprio campo gerado.

Podemos dividir as forças eletromagnéticas que atuam no curto-circuito em três principais categorias: **força radial**, **força longitudinal** e **força transversal**. Cada uma delas possui características específicas e diferentes impactos no comportamento dos condutores.

#### ==== Força Radial

A força radial atua perpendicularmente à superfície do condutor e está diretamente associada ao campo magnético gerado ao redor do próprio condutor. Durante um curto-circuito, a corrente elevada cria um campo magnético intenso, que induz pressões mecânicas radiais.

A força radial tem como efeitos:

- Compressão da seção transversal do condutor.
- Potencial deformação do condutor, especialmente em materiais mais flexíveis ou em situações onde o condutor está sob altas temperaturas, o que pode enfraquecer sua estrutura.
- Modificações na resistência elétrica devido à alteração na geometria do condutor.

A pressão radial  $(p_r)$  gerada pela corrente pode ser aproximada pela equação:

$$p_r = \frac{\mu_0 \cdot I^2}{4\pi^2 \cdot r^2} \quad (10)$$

Onde:

- $(\mu_0)$  é a permeabilidade do vácuo  $(4\pi \times 10^{-7})$  H/m).
- $(I)$  é a corrente no condutor (A).
- $(r)$  é o raio do condutor (m).

#### ==== Força Longitudinal

A força longitudinal atua ao longo do eixo do condutor e está relacionada ao aumento da corrente de curto-circuito que causa aceleração ou compressão ao longo do comprimento do condutor.

A força longitudinal tem como efeitos:

- Tensão mecânica que pode alongar ou encurtar o condutor, causando uma deformação elástica ou

plástica.

- Sobrecarga em suportes e pontos de ancoragem, o que pode levar a falhas estruturais.
- Movimentos oscilatórios no plano longitudinal, que podem causar fadiga mecânica ao longo do tempo.

A força longitudinal  $(F_L)$  é proporcional à corrente que atravessa o condutor e à densidade do campo magnético, podendo ser descrita como:

$$F_L = I \cdot \frac{\partial L}{\partial t} \quad (11)$$

Onde  $(\frac{\partial L}{\partial t})$  representa a variação do comprimento induzida pela força.

==== Força Transversal

A força transversal é a mais significativa e age entre condutores adjacentes, no plano que conecta seus centros. Surge devido à interação magnética entre os campos gerados por correntes elevadas em condutores paralelos ou próximos.

A força transversal tem como efeitos:

- Deslocamento lateral dos condutores, que pode resultar em curtos-circuitos adicionais se os condutores entrarem em contato físico.
- Danos às estruturas de suporte, como espaçadores, isoladores e fixadores, devido à movimentação brusca dos condutores.
- Vibração intensa, levando a desgastes e fadiga ao longo do tempo.

A força transversal  $(F_T)$  entre dois condutores paralelos é calculada como:

$$F_T = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot L}{2\pi \cdot d} \quad (12)$$

Onde:

- $(I_1)$  e  $(I_2)$  são as correntes nos dois condutores.
- $(L)$  é o comprimento do condutor afetado pela força (m).
- $(d)$  é a distância entre os eixos dos condutores (m).

#### ==== Frequência Natural de Oscilação de um Condutor Flexível

A frequência natural de oscilação de um condutor flexível é uma característica mecânica essencial para a análise de comportamento dinâmico em sistemas elétricos, especialmente durante eventos de curto-circuito. Esta frequência é determinada pelas propriedades físicas e estruturais do condutor e influencia diretamente a resposta a forças transitórias.

A frequência natural de oscilação é a frequência em que um sistema tende a vibrar quando perturbado, sem amortecimento significativo. No caso de condutores flexíveis, ela depende de fatores como:

\* **Comprimento do condutor**: Condutores mais longos apresentam frequências naturais mais baixas.

\* **Tensão mecânica**: Condutores mais tensionados têm maior rigidez e, portanto, maior frequência natural.

\* **Massa linear**: Condutores mais pesados reduzem a frequência natural devido à maior inércia.

A frequência natural de oscilação de um condutor flexível pode ser aproximada por:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{T}{m'}} \quad (13)$$

Onde:

\*  $f_n$  é a frequência natural, em Hertz (Hz).

\*  $T$  é a tensão mecânica no condutor, em Newtons (N).

\*  $m'$  é a massa por unidade de comprimento do condutor, em quilograma por metro (kg/m).

Para condutores suspensos entre dois pontos fixos, considera-se:

$$f_n = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{m'}} \quad (14)$$

Com:

\*  $L$  sendo o comprimento do vão, em metros (m).

Durante um curto-circuito, as forças eletromagnéticas variam dinamicamente devido à corrente alternada e seus componentes transitórios. Se essas forças oscilam com uma frequência próxima à frequência natural

do condutor, ocorre **ressonância mecânica**, amplificando os deslocamentos do condutor.

Estas oscilações resultam nos seguintes riscos associados:

\* **Oscilações Ampliadas**: Movimentos exagerados podem levar ao contato entre condutores ou estruturas próximas.

\* **Fadiga Mecânica**: A repetição de vibrações pode causar falhas nos materiais.

\* **Sobrecarga Estrutural**: Alguns componentes podem sofrer uma sobrecarga estrutural e danificar.

#### ==== Tensão de Flexão nos Condutores

A tensão de flexão nos condutores é um parâmetro que descreve o estresse mecânico ao qual o material é submetido devido às forças aplicadas. A equação geral para calcular a tensão de flexão é dada por:

$$\sigma_m = V_\sigma \cdot V_r \cdot \beta \cdot \frac{F_m \cdot L}{8 \cdot Z} \quad (15)$$

Onde:

\*  $\sigma_m$ : Tensão de flexão no condutor (Pa).

\*  $V_\sigma$ : Fator de correção relacionado às condições de carga.

\*  $V_r$ : Fator de correção relacionado ao material do condutor.

\*  $\beta$ : Fator de suporte, que leva em conta o tipo de suporte e condições de fixação.

\*  $F_m$ : Força máxima aplicada no condutor (N).

\*  $L$ : Comprimento do condutor entre suportes (m).

\*  $Z$ : Módulo de seção transversal do condutor (m<sup>3</sup>).

A explicação dos termos é a seguinte:

\* Fatores de Correção  $V_\sigma$  e  $V_r$ : Consideram irregularidades na distribuição de forças ou variações nas propriedades do material.

\* Fator de Suporte  $\beta$ : Ajusta os cálculos para diferentes condições de suporte, como fixação rígida ou articulações móveis.

\* Força no Condutor  $F_m$ : Representa a força aplicada devido a cargas externas, como forças eletro-

magnéticas ou vento.

\* Comprimento do Condutor  $(L)$ : Afeta diretamente a magnitude da tensão, com maiores comprimentos resultando em maiores tensões de flexão.

\* Módulo de Seção  $(Z)$ : Define a resistência do condutor à flexão, dependente da geometria e material.

#### ==== Relação Entre as Forças

Embora essas forças sejam analisadas separadamente, elas atuam simultaneamente durante um evento de curto-circuito, exigindo uma abordagem integrada para compreender os esforços resultantes no sistema. Um condutor submetido a uma força transversal significativa também sofre dos efeitos combinados de compressão radial e tensão longitudinal.

Os condutores flexíveis, amplamente utilizados nos conjuntos de aterramento de proteção temporário, são mais suscetíveis aos impactos de forças resultantes devido à sua menor rigidez mecânica. Isso pode levar a:

- \* Deslocamentos laterais significativos devido à maior força transversal inicial, resultante da interação com outros condutores próximos;
- \* Aumento da amplitude das vibrações mecânicas, causado pela componente oscilatória da corrente e forças resultantes;
- \* Possibilidade de contato físico entre condutores, componentes da estrutura ou outros objetos próximos.

A avaliação adequada dessas forças é essencial para garantir a confiabilidade e a segurança dos conjuntos de aterramento de proteção temporário, especialmente em circuitos com alta relação  $X/R$ . O não controle das forças pode levar a falhas que vão desde deformações permanentes até o rompimentos ou quebra de componentes dos conjuntos.

#### == Implicações da corrente de curto-circuito simétrica

A corrente de curto-circuito simétrica possui um comportamento mais previsível sendo mais facilmente dimensionada e controlada, quando comparada com a corrente de curto-circuito assimétrica.

A corrente de curto-circuito simétrica produz no aterramento de proteção temporário os seguintes efeitos:

- \* Esforços térmicos e mecânicos menores: Como não há componente DC, o valor de pico inicial da corrente é menor do que na corrente de curto-circuito assimétrica. Consequentemente, os esforços térmicos e mecânicos nos equipamentos são menores e mais facilmente dimensionados.
- \* Por implicarem menos esforços térmicos e mecânicos os conjuntos de aterramento de proteção temporário projetados para suportar correntes simétricas podem ser dimensionados para ter menor robustez quando comparados com os necessários para correntes assimétricas.

#### == Implicações da corrente de curto-circuito assimétrica

A corrente de curto-circuito assimétrica ocorre devido à presença de uma componente DC no início da falha. Essa componente, somada à corrente alternada (AC), provoca um valor de pico inicial significativamente maior, que decai ao longo do tempo até alcançar um estado estável (forma simétrica).



A presença da componente DC e seu decaimento ao longo do tempo exigem análises mais detalhadas e métodos específicos para calcular os valores máximos de corrente.

A corrente de curto-circuito assimétrica produz no aterramento de proteção temporário os seguintes efeitos:

\* Esforços térmicos e mecânicos elevados: O valor de pico inicial elevado da corrente gera maiores exigências térmicas e mecânicas em condutores, conexões e grampos. Os conjuntos de aterramento de proteção temporário precisam suportar esses picos, aumentando os requisitos de robustez.

\* Sobredimensionamento Necessário:

O aterramento de proteção deve ser projetado para suportar as condições mais críticas, o que implica o uso de materiais mais resistentes e de maior seção transversal.

### **3. Conclusão**

O artigo analisou de forma detalhada os efeitos das correntes de curto-circuito nos conjuntos de aterramento de proteção temporária, destacando sua importância como dispositivos essenciais para a segurança nas operações de manutenção em redes elétricas desenergizadas. Através da exploração de conceitos técnicos, foram apresentados os principais desafios associados ao uso desses equipamentos, incluindo as forças térmicas e eletrodinâmicas geradas durante falhas elétricas.

Os conjuntos de aterramento de proteção temporária são cruciais para garantir um ambiente seguro para os trabalhadores, oferecendo um caminho de baixa impedância para correntes de falha e minimizando os riscos de choques elétricos e acidentes graves. Contudo, sua eficácia depende de uma série de fatores, como a qualidade dos materiais empregados, a conformidade com normas técnicas e os procedimentos adequados de instalação. Além disso, o artigo destacou a importância de considerar as características das correntes de curto-circuito no dimensionamento dos equipamentos, garantindo que eles suportem as solicitações térmicas e mecânicas sem comprometer a segurança.

Ao fornecer diretrizes práticas e baseadas em normas internacionais, o texto buscou não apenas ampliar o conhecimento técnico dos profissionais do setor elétrico, mas também promover uma cultura de segurança mais robusta. A correta aplicação dos conceitos discutidos é fundamental para reduzir os riscos de falhas operacionais, evitar danos aos equipamentos e assegurar a proteção dos trabalhadores.

Por fim, o artigo reforça a necessidade de contínuo aprimoramento técnico e atualização das práticas empregadas no setor elétrico, de modo a acompanhar as crescentes demandas de segurança e eficiência. A disseminação de conhecimentos técnicos sólidos e a implementação de boas práticas são pilares para a evolução do setor e para a garantia de condições de trabalho seguras e sustentáveis.

### **4. Referências bibliográficas**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM F855-23: Standard Specification for Temporary Protective Grounds to Be Used on De-energized Electric Power Lines and Equipment. West Conshohocken: ASTM International, 2023.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60865-1: Short-circuit currents – Calculation of effects – Part 1: Definitions and calculation methods. Geneva: IEC, 2011.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60909: Short-circuit currents in three-phase AC systems – Calculation of currents. Geneva: IEC, 2016.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61230: Live Working – Portable Equipment for Earthing or Earthing and Short-Circuiting. Geneva: IEC, 2020.

GRINNELL, Surya Santoso; MCGRAW-HILL EDUCATION. Standard Handbook for Electrical Engineers. 17th ed. New York: McGraw-Hill, 2018.