

Cálculo de faltas em corrente contínua de acordo com a IEC 61660-1

- Novo formato de arquivo de projeto para otimizar e simplificar o compartilhamento de dados;
- Gestão das etapas de ajuste das correntes e tempos das proteções e capacidade de fechamento;
- Gerenciamento das curvas de intervenção de longo atraso de proteções homopolares;
- **Cálculo de correntes de curto-circuito em corrente contínua de acordo com IEC 61660-1, tanto permanentes quanto transitórias;**
- **Determinação da curva aproximada da corrente de falta de acordo com a IEC 61660-1;**
- **Análise do transitório das correntes de curto-circuito em corrente alternada, de acordo com a IEC 60909;**
- **Verificação da capacidade de fechamento das proteções tanto em CA quanto em DC de acordo com IEC 60947-2;**
- Seletividade: representação da faixa de tolerância de liberação em proteções eletrônicas;
- Seletividade: gerenciamento das etapas de ajuste na calibração dos relés de proteção;
- Documento da calibração de proteção com relatório dos parâmetros de ajuste;
- Pré-análise e seleção de proteções com possível filiação de backup;
- Atribuição múltipla de proteções com filiação de backup;
- Melhorias e utilidades;
- ELink: parâmetros adicionais para conexão com dados do usuário do Ampère;
- ELink: revisão da interface com ribbon bar de fita e melhorias na velocidade de processamento
- ELink: integração com BIM 360 e workset.

Nos últimos anos, os sistemas em corrente contínua estão experimentando uma nova juventude, em muitas áreas; o mundo automotivo é um exemplo disso e será certamente a força motriz para a renovação da rede elétrica.

Os sistemas em corrente contínua são utilizados na geração fotovoltaica e no armazenamento de energia, se consolidam na distribuição local onde possui um amplo uso nas partidas de motores (DC Bus), e começam a ser vistos também projetos de transmissão de longa distância em concorrência com as redes em alta tensão.

As redes elétricas vão ser mais complexas de gerenciar, aumentando a combinação de componentes elétricos e combinações de CA e CC. Além disso, o projeto e as verificações dos equipamentos devem ser suportados pelos cálculos e eventualmente legitimados por uma ou mais normas de referência, em particular para o estudo das correntes de falta.

Até o momento, a norma mais utilizada é a **IEC 61660-1**, e o software **Ampère Professional 2022** já está de acordo com a norma de referência.

Esta norma foi criada para fornecer um método de determinar **as correntes de falta em redes CC** utilizadas para alimentações auxiliares nas centrais e subestações; é, portanto, essencial entender os limites de uso na aplicação às redes de distribuição, tendo distâncias elevadas e um número maior de fontes de alimentação.

O **Ampère Professional 2022** foi testado com exemplos de cálculo de terceiros, com a devida verificação da confiabilidade dos resultados dentro dos limites das condições indicadas acima.

Cálculo de faltas em corrente contínua de acordo com a IEC 61660-1

O Ampère Professional 2022 adiciona mais funcionalidade ao cálculo de faltas, aperfeiçoando o estudo do transitório das correntes nos circuitos definidos em corrente contínua. Numerosos estudos tentam esclarecer e preencher as lacunas presentes sobre o assunto, na pendência de um novo referencial normativo referente à corrente contínua, como a norma **CEI EN 60909-0** que é para sistemas de corrente alternada. Tais estudos indicam que os erros médios cometidos pela norma **IEC 61660-1** para o cálculo da corrente de pico máxima estão em torno de 10% (tanto para mais quanto para menos), devido ao aumento das distâncias entre as fontes e os pontos de falta, para os coeficientes de correção (que empurram os erros para o menos), e não levando em consideração as reatâncias subtransitórias dos geradores, principalmente se forem de pequeno porte. Além disso, transitórios em direção ao estado permanente são geralmente mais rápidos do que na realidade, pois o modelo não leva em consideração o efeito das capacidades.

Modelo de cálculo

O software não utiliza os coeficientes corretivos, sujeito a possíveis desenvolvimentos futuros, fornecendo atualmente valores mais conservadores. O modelo de cálculo do *Ampère Professional* também utiliza as reatâncias subtransitórias dos geradores, melhorando as estimativas da norma em linha com os estudos fornecidos por alguns artigos. O software foi testado com exemplos de cálculos de terceiros, verificando a confiabilidade dos resultados dentro dos limites dos erros indicados acima. Para ativar o novo modelo de cálculo de corrente contínua, na janela Propriedades, guia Setup de cálculo, ative a caixa de seleção *Calcular correntes transitórias de faltas em corrente contínua (IEC 61660-1)*.

A norma estabelece um método de cálculo geralmente válido para correntes de curto-circuito. O método proposto prevê o cálculo da corrente de curto-circuito que atravessa o ponto de falta como a soma das correntes geradas por diferentes fontes. Os elementos estudados na norma que contribuem para a determinação desta corrente são:

- Retificadores trifásicos em ponte de 50 Hz;
- baterias de chumbo-ácido;
- capacitores de amortecimento;
- motores d.c. com excitação independente.

A tendência ao longo do tempo da corrente gerada pelas diferentes fontes é corretamente obtida usando as fórmulas (1), (2) e (3):

$$i_1(t) = i_p \cdot \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{\tau_1}}} \quad \text{Para } 0 \leq t \leq t_p \quad (1)$$

$$i_2(t) = i_p \cdot ((1 - p)e^{-(t-t_p)/(\tau_2)} + p) \quad (2)$$

$$p = \frac{I_K}{i_p} \quad (3)$$

Onde:

- i_p é a corrente de curto-circuito de pico;
- i_k é a corrente de curto-circuito quase estacionária (1 seg.);
- t_p é o tempo de pico;
- τ_1 é a constante de tempo de elevação;
- τ_2 é a constante de tempo de descida.

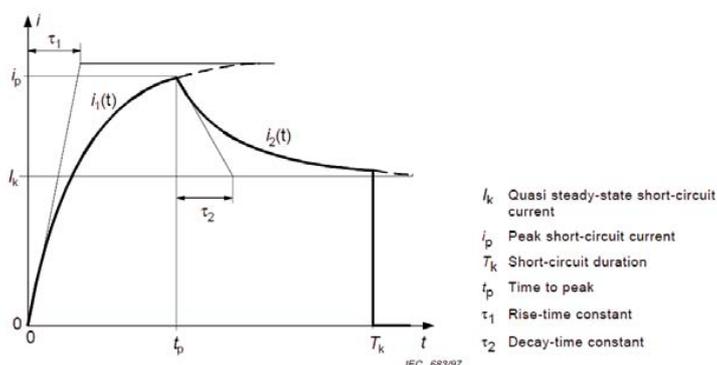
Se não for definida uma corrente máxima, $i_p = i_k$ e t_p são considerados iguais a T_K , que é o tempo de interrupção da falta. A corrente total de curto-circuito é então obtida superpondo os efeitos, somando assim todas as contribuições para a falta decorrentes das fontes envolvidas no cálculo.

Onde:

- j é a referência à fonte em questão,
- m é o número de fontes que fornecem a falta,
- $i(t)$ é a corrente total de curto-circuito
- T_k é o tempo de interrupção da falta.

A figura ao lado representa a tendência da corrente dada pelas fórmulas (1) e (2), com as quais se aproxima a contribuição para a falta de cada fonte. Continuamos descrevendo a determinação dos parâmetros para cada tipo de fonte e as considerações feitas com o software Ampère.

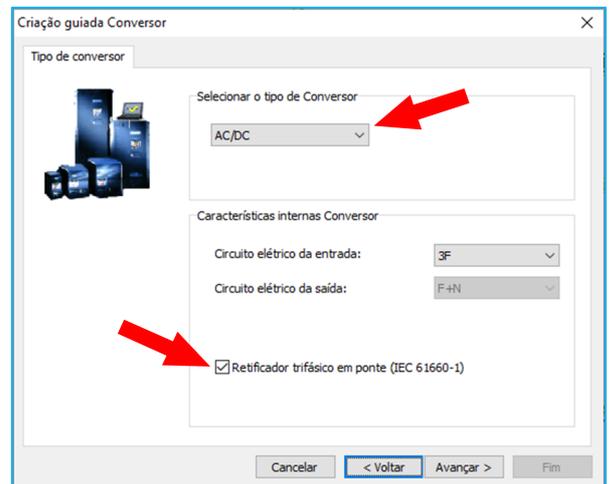
$$i(t) = \sum_{j=1}^m \left\{ \begin{array}{ll} i_{p_j} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_{1j}}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{\tau_{1j}}}} & (0 \leq t \leq t_{p_j}) \\ i_{p_j} [(1 - p_j)e^{-(t-t_{p_j})/(\tau_{2j})} + p_j] & (t_{p_j} \leq t \leq T_K) \end{array} \right.$$



Retificador trifásico em ponte

O retificador trifásico em ponte, considerado pela norma IEC 61660-1, constitui, conforme mencionado, uma fonte de falta em corrente contínua. O tipo de retificador modelado não inclui nenhum controle de limitação de corrente. Portanto, é uma máquina “nova” em relação aos tipos de usuários gerenciados pelo software, e é modelado no Ampère usando a conexão em série de dois usuários: um transformador e um conversor.

A inserção dos dois usuários é feita através do assistente wizard *Criação guiada Conversor*, partindo de um usuário trifásico 3F, sem neutro. Escolha a tipologia CA/CC, e marque a opção *Retificador trifásico em ponte (IEC 61660-1)*. Desta forma é possível descrever o comportamento corretamente do dispositivo em regime de curto-circuito. Nenhum limite é imposto à corrente que pode passar por ele, que vem calculado levando em consideração o ponto de conexão do retificador à rede. O sistema binário consiste em um transformador e o retificador usa duas tensões principais: a tensão primária/alimentação do transformador e a tensão de saída do retificador, que corresponde à tensão CC da rede. Os valores de tensão em corrente alternada entre o transformador e o retificador são impostos pelo software, como normalmente se encontra na bibliografia para o estudo deste sistema. Para outras considerações, se faz referência ao parágrafo 2.4 da norma IEC 61660-1.



O sistema binário consiste em um transformador e o retificador usa duas tensões principais: a tensão primária/alimentação do transformador e a tensão de saída do retificador, que corresponde à tensão CC da rede. Os valores de tensão em corrente alternada entre o transformador e o retificador são impostos pelo software, como normalmente se encontra na bibliografia para o estudo deste sistema. Para outras considerações, se faz referência ao parágrafo 2.4 da norma IEC 61660-1.

Bateria

As baterias de chumbo-ácido, sujeitas à consideração da norma, constituem uma fonte de falta devido a um curto-circuito em corrente contínua, a tendência da corrente ao longo do tempo segue a lei exponencial anteriormente estabelecida. O Ampère realiza os cálculos indicados se houver um usuário do tipo bateria na rede, seguindo assim o modelo apresentado para baterias chumbo-ácido. A resistência interna da bateria RB é calculada a partir do valor de curto-circuito atribuído a ela. Quanto à indutância da bateria, útil para determinar a constante de tempo de subida e o tempo de pico, o software atende ao que é sugerido pela norma, na verdade considera um valor de 0,2 μ H para cada bateria que compõe a string. Para mais considerações, consulte o parágrafo 2.5 da norma IEC 61660-1, onde em particular se verifica que 2 (constante de tempo de descida) é fixado em 100 ms.

Capacitor

A norma 61660-1 refere-se aos capacitores de amortecimento, frequentemente utilizados nas proximidades de dispositivos de retificação, descrevendo-os como elementos que constituem uma fonte de energia para a falta. A corrente de falta de estado quase permanente gerada é zero. Ampère, em consonância com as disposições da norma, permite a definição de usuários com capacitores também em corrente contínua.

Para mais considerações, consulte o parágrafo 2.6 da norma IEC 61660-1.

Motores DC

Os motores em CC com excitação independente representam uma fonte de energia para qualquer falta.

O Ampère segue e estende o modelo de cálculo de motores CC com excitação independentemente para todos os motores corrente contínua. Para as suposições feitas, consulte o capítulo Modelos de cálculo do manual de referência do software e ao parágrafo 2.7.2 da norma IEC 61660-1.

Conversores, Dínamos e Sistemas de armazenamento

O Ampère gerencia outros tipos de usuários que, em qualquer caso, podem constituir uma fonte de alimentação em caso de curto-circuito. Uma vez que não há referência na IEC 61660-1 para este tipo de dispositivo, assume-se que a corrente a falta em regime transitório é caracterizada apenas por uma fase de crescimento. A corrente então começa a partir de um valor nulo e atinge, com lei exponencial, seu valor de pico $I_p = I_k$ ao longo do tempo $t_p = 3$, onde indica a constante do tempo de subida do circuito.

Observação. Uma fonte em corrente contínua também constitui uma fonte para o curto-circuito; a contribuição para a corrente de falta gerada por este segue a dinâmica que acabamos de descrever para conversores, dínamos e sistemas de armazenamento.

Fator de correção

A norma IEC 61660-1 introduz um fator de correção a ser aplicado, para cada fonte que alimenta a falta, para a corrente de curto-circuito de pico e de estado quase estacionário.

$$I_{kcorj} = \sigma_j \cdot I_{kj}$$

$$I_{pcorj} = \sigma_j \cdot I_{pj}$$

onde j identifica a j -ésima fonte.

Esta precaução decorre do fato de que nem toda a corrente gerada por uma fonte atravessa o curto-circuito, uma parte de fato se fecha novamente por meio das impedâncias das outras fontes. Ampère oferece uma solução preventiva para o problema, configurando $\sigma_j = 1$ para cada fonte de falta, considerando que toda a contribuição gerada pela j -ésima fonte flui no curto-circuito.

Curva aproximada – Standard approximation function

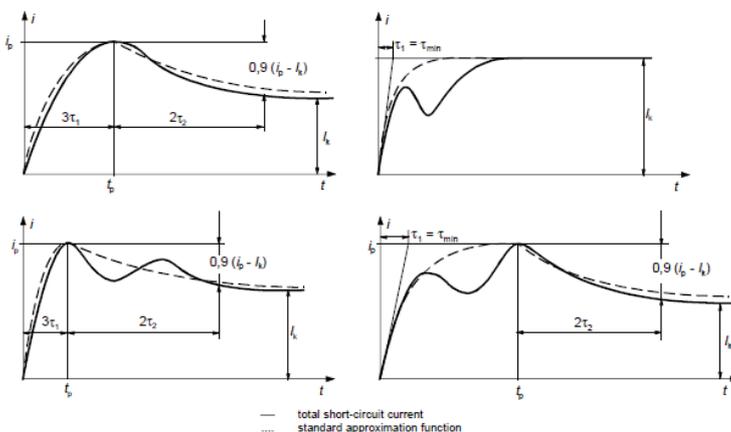
O estudo do transiente como sobreposição dos efeitos depende das constantes de tempo e dos valores máximos impostos de cada fonte, obtendo uma tendência que pode ser ondulatória com vários valores máximos antes tendem ao valor de velocidade final.

A norma propõe um método para obter uma curva que se aproxime do transitório como um todo, descrita sempre através das fórmulas (1) e (2), úteis para o cálculo de tensões eletrodinâmicas e tensões térmicas, de acordo com IEC 61660-2.

O software exibe a curva (na cor verde) e permite que você imprima os valores i_p (corrente de curto-circuito de pico), i_k (corrente de curto-circuito quase estacionária em 1 seg.), t_p (tempo de pico), τ_1 (constante de tempo de subida) e τ_2 (constante tempo de descida) seguindo as regras estabelecidas no parágrafo 3.3 da norma. Esses parâmetros são derivados graficamente a partir da curva interpolada criada pela soma de todas as contribuições das fontes para a falta (linha azul nos gráficos de Ampère).

Os quatro exemplos propostos na figura descrevem os transitórios típicos, onde a tendência real do transitório é representada pela linha contínua.

A linha tracejada representa a função aproximada. É interessante notar que nas duas figuras à direita o cálculo de τ_1 é condicionado pelo tempo de subida do primeiro pico. De fato, se o primeiro pico for maior que 50% da corrente de pico, ela comanda a parte de subida da função (ver figura 22 da norma).



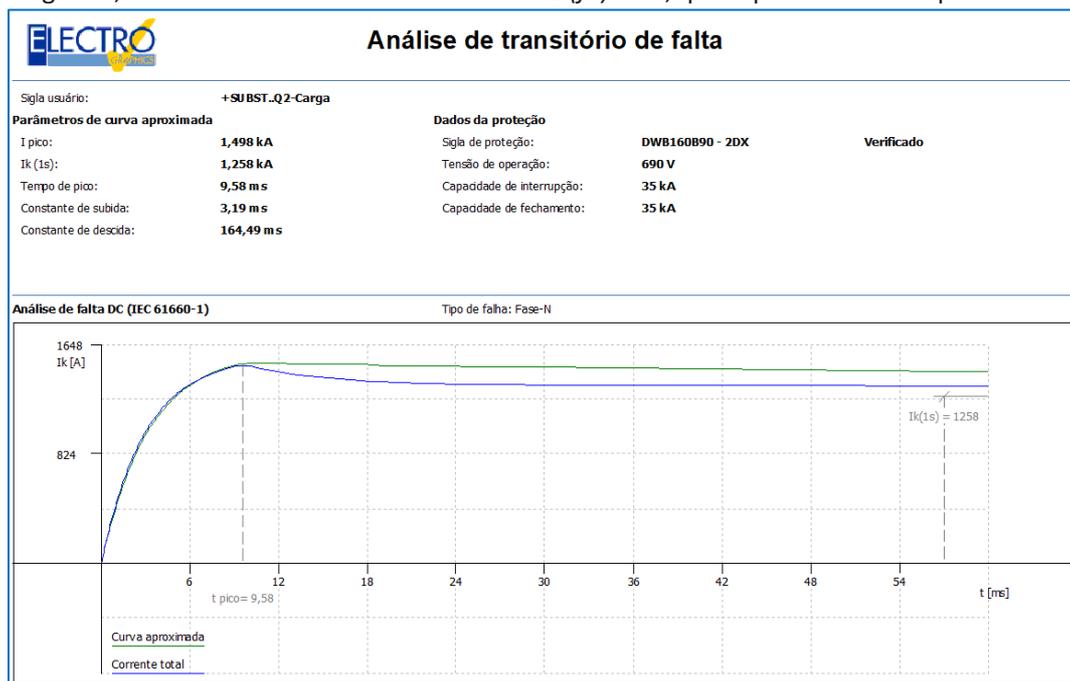
Coordenação com a norma EN 60909-0

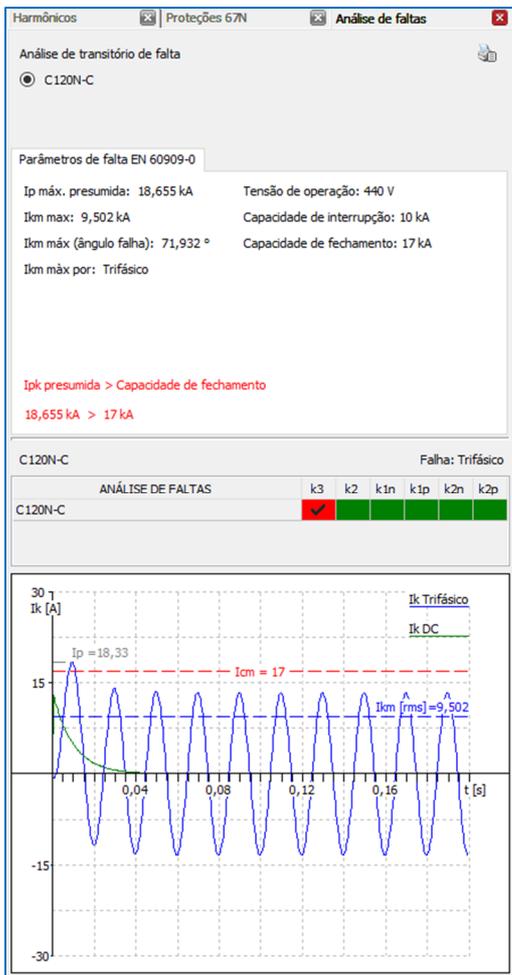
O método de cálculo em corrente contínua utilizado pelo software atua sobre os usuários de corrente contínua modificando os valores de corrente de falta monofásica associados ao regime subtransitório. Portanto, os resultados obtidos da análise do pico máximo são salvos na variável I_{km} . Lembre-se que I_{km} é a corrente de comparação com a capacidade de interrupção das proteções e, dada a sua própria natureza, tem a componente máxima a montante ou a jusante da falta.

Além disso, de acordo com a EN 60909-0, a Curva de limitação da proteção não é aplicada a ele, mesmo se a IEC 61660-1 no parágrafo 2.1 pede para levar isso em consideração para o cálculo das correntes máximas. As correntes de falta quase estacionárias, calculados em um segundo, são em vez disso salvos na variável $I_{k1}(fn)_{max}$, que representa a falta permanente.

Os resultados da análise determinam os valores das variáveis de corrente de pico $i_{p1}(fn)$, calculado como a contribuição total da corrente (soma dos componentes a montante-jusante e a jusante-montante). Como o que acontece com a EN 60909-0, as *Curvas de limitação das proteções* são aplicadas a elas.

O painel de funções avançadas *Análise de faltas* propõe os valores de corrente calculadas e através do comando *Gerenciamento de Impressão* do painel é possível obter impressões como o da figura.





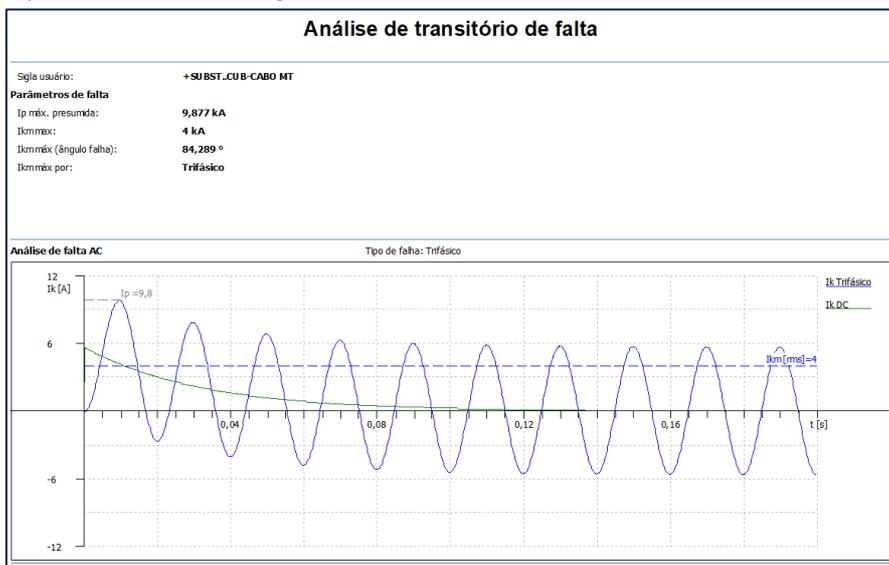
Análises de faltas

O painel de Análise de faltas é a atualização do painel Transformadores de Corrente, pois foi adicionado a análise de faltas em corrente alternada e corrente contínua.

Para os usuários em corrente alternada, o Ampère propõe a análise de transitório de falta com a verificação da capacidade de interrupção e fechamento no caso de ser atribuída uma proteção

Caso o software não encontre nenhum problema, a janela exibe a tendência da falta máxima, expondo seus parâmetros característicos; também são exibidos os dados relativos à proteção atribuída.

Além disso, é possível estudar as diferentes dinâmicas de faltas de acordo com os condutores envolvidos clicando nas células apropriadas na rede. Quando uma incoerência é encontrada, o Ampère, com o auxílio de mensagens em vermelho, sinaliza a presença do erro, especificando também qual tipo de falta constitui um problema. O painel de funções avançadas de Análise de faltas propõe os valores atuais e através do comando Gestão de impressão do painel é possível obter impressões como a da figura abaixo.



É aconselhável dar algumas notas sobre os valores fornecidos, pois há detalhes que podem escapar e confundir os valores lidos no painel Análise de faltas e as variáveis de dados do usuário. Correntes de pico: O painel de funcionalidades avançadas de Análise de faltas propõe os valores de corrente de pico sob vários aspectos. Observe que o valor calculado de *Ip max* presumido é relativo ao valor máximo entre todas as faltas, enquanto o valor de *Ip* detectado graficamente, e destacado no gráfico da transitória, é relativo ao tipo de falta selecionada. Os valores para a mesma falta também podem se diferenciar ligeiramente. O gráfico também mostra a componente assimétrica da transitória em verde, com um amortecimento exponencial caracterizado por uma constante de tempo T, específica para cada tipo de falta.

Capacidade de fechamento

O Ampère 2022 verifica se a capacidade de fechamento *Icm* de uma proteção é maior que a corrente máxima de pico presumida (com a etiqueta dedicada *Ip máxima presumida [kA]*). A verificação é aplicada apenas a proteções automáticas em baixa tensão que se referem à norma CEI EN 60947. Se a proteção não tiver um valor específico de *Icm* - capacidade de fechamento definido no arquivo de Dispositivos, o software leva em consideração o valor mínimo garantido pelo fabricante:

- Em corrente alternada como o produto da capacidade de interrupção e o fator *n* da Tabela 2 da norma (independentemente do fator de potência da corrente de falta);
- Em corrente contínua como o valor da capacidade de interrupção.

A corrente de pico é definida pela norma como presumida, portanto, não se deve considerar quaisquer efeitos de limitação das proteções. A corrente de fechamento é a corrente que realmente flui através da proteção, portanto, a corrente de pico presumida é calculada como a corrente máxima que pode ocorrer com montante-jusante ou jusante-montante. Ao lado, é exibido a Tabela 2 da norma CEI EN 60947.

Short-circuit breaking capacity kA r.m.s.	Minimum value required for <i>n</i>
$I \leq 1.5$	1.41
$1.5 < I \leq 3$	1.42
$3 < I \leq 4.5$	1.47
$4.5 < I \leq 6$	1.53
$6 < I \leq 10$	1.7
$10 < I \leq 20$	2.0
$20 < I \leq 50$	2.1
$50 < I$	2.2