



GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

METODOLOGIA UNIFICADA PARA CÁLCULO DOS ESFORÇOS ELETROMECÂNICOS DE BARRAMENTOS FLEXÍVEIS EM SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS DE TRANSMISSÃO

ILTON DE LIMA JUNIOR (1); CLAUDIO HENRIQUE RUIZ (1); RAPHAEL AUGUSTO DE SOUZA BENEDITO (2).

ENSISTE ENGENHARIA DE SISTEMAS ELETRICOS LTDA (1); UTFPR - UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ (2).

RESUMO

Os esforços de barramentos flexíveis em subestações ocorrem devido à tração, peso, incidência de vento e/ou curto-circuito. Os métodos para determinação destes esforços constam em normas técnicas e outras referências bibliográficas. Ao analisá-las, nota-se carência de orientação sobre a forma de aplicação em um dimensionamento completo. Por isto, o objetivo principal é o desenvolvimento de uma metodologia unificada para dimensionamento completo dos esforços, além da implementação de um programa computacional equipado com esta metodologia. Apresentam-se algumas simulações de cálculos, utilizando o programa, e validação da metodologia proposta através de comparações com resultados de exemplos constantes em normas técnicas e outras referências.

PALAVRAS-CHAVE

Barramento Flexível, Curto-circuito, Esticamento, Projeto Eletromecânico, Subestação.

1.0 - INTRODUÇÃO

Grandes sistemas de transmissão de energia elétrica necessitam de muitas Subestações Elétricas (SEs) para prover a interligação, proteção, controle e supervisão. Para construção de uma SE, um dos projetos necessários é o de requisitos para estruturas, o qual necessita do dimensionamento dos esforços eletromecânicos em barramentos flexíveis. A função deste projeto é fornecer informações necessárias e suficientes para que projetistas estruturais, engenheiros civis, possam dimensionar as estruturas suportes de ancoragem e respectivas fundações.

Os esforços podem assumir valores estáticos e dinâmicos. Os estáticos são originários do esticamento dos condutores e efeito gravitacional. Os dinâmicos são causados pelo curto-circuito, mas também dependem dos valores estáticos. Os métodos de cálculo de esticamento são consolidados para projetos de Linhas de Transmissão (LTs), e dois entre os mais completos constam em Kiessling *et. al* (2). Para o cálculo dos efeitos do vento, existem duas normas brasileiras de referência cujos métodos conseguem envolver a maior parte das situações usuais: NBR 5422 (3) e NBR 6123 (4). Os efeitos do curto-circuito são determinados através do método presente na norma IEC 60865-1 (5), cujo roteiro de equações e condições é especialmente extenso.

1.1 - Os Problemas

Para as LTs, as características das cadeias de isoladores são menos determinantes nos resultados de tração, permitindo que a consideração de suas massas possa ser simplificada, distribuindo estas ao longo do vão, incrementando a densidade linear aparente do condutor. Já para os vãos de SEs, por serem mais curtos, esta simplificação pode influenciar os resultados de forma relevante, sendo cauto que se considere as cadeias como cargas concentradas nas extremidades do barramento (2). Esta particularidade, somada à ocorrência de vãos desnivelados, estabelece uma configuração pouco abordada pela bibliografia de referência disponível atualmente.

Os métodos de cálculo para os efeitos do vento, são adequados para as determinações das forças de arrasto, aplicadas transversalmente no centro do subcondutor e de cada cadeia de isoladores. Entretanto, não há orientações para determinação da tração, que evidentemente recebe incremento devido à ação do vento.

Apresentados os diversos métodos aplicáveis, verifica-se a carência de referências que orientem como combiná-los em uma metodologia para dimensionamento completo dos esforços de barramentos flexíveis.

1.2 - As Propostas de Solução

As carências citadas, a respeito de uma metodologia unificada e uma ferramenta para uso profissional, motivam o presente trabalho, cujo objetivo geral é a implementação de um programa computacional equipado com todas as etapas para o dimensionamento completo dos esforços.

É desejável que esta ferramenta seja autossuficiente, confiável e eficiente. Para isto, deve possibilitar o cálculo dos esforços de diversos barramentos em uma única execução do programa, com garantia de atendimento às normas técnicas aplicáveis, sem a necessidade de utilização de outras ferramentas ou consultas a catálogos de fabricantes de cabos durante o dimensionamento.

Portanto, o presente trabalho contribui não apenas com o entendimento sobre as formas de aplicação dos diferentes métodos existentes, mas também com as possíveis adaptações, combinações e interconexões entre estes. Adicionalmente, possui aplicação prática através de um programa computacional.

Na seção 2.0, apresenta-se a revisão teórica e bibliográfica realizada. A metodologia proposta e o algoritmo computacional constam na seção 3.0. Na seção 4.0, são apresentados resultados de simulações de dimensionamento, que auxiliam nas validações da metodologia proposta. Na quinta e última seção, as conclusões.

2.0 - REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, apresenta-se a revisão teórica e bibliográfica sobre os métodos de cálculo de esticamento, efeitos do vento e curto-circuito que embasaram este trabalho.

2.1 - O Cálculo de Esticamento

Em Kiessling *et. al.* (2), apresentam-se dois métodos para cálculo de esticamento. O primeiro é aplicável à barramentos desnivelados sem cadeia de isoladores, ou longos suficientes para que o efeito destas possa ser desprezado. O segundo considera as cadeias como cargas concentradas, entretanto, não se aplica à vãos desnivelados.

2.1.1 - Vãos Desnívelados Sem Cadeias de Isoladores

O método apresentado nesta e na próxima subseção constam na seção 14.2 em Kiessling *et. al.* (2).

Um barramento desnivelado, sem cadeias de isoladores e formado por apenas um subcondutor, é conceitualmente ilustrado na Figura 1, possuindo comprimento horizontal real X , esticado entre os pontos de ancoragem “A” e “B”, com desnível relativo h . Os suportes recebem os esforços S_A e S_B , que podem ser divididos em componentes verticais (V_A e V_B) e horizontal (H). O vértice P não se apresenta central ao vão, mas deslocado em direção ao suporte mais baixo. Projetando a curva, a partir do ponto “B”, ao encontro com o nível do suporte mais alto (ponto “B’”), determina-se o vão nivelado equivalente, cujo comprimento horizontal X_e apresenta-se através de X' com X . A catenária do vão nivelado equivalente possui o mesmo vértice do vão real e a distância entre “P” e a linha imaginária que conecta “A” e “B’” é denominada flecha do vão nivelado equivalente (f_e).

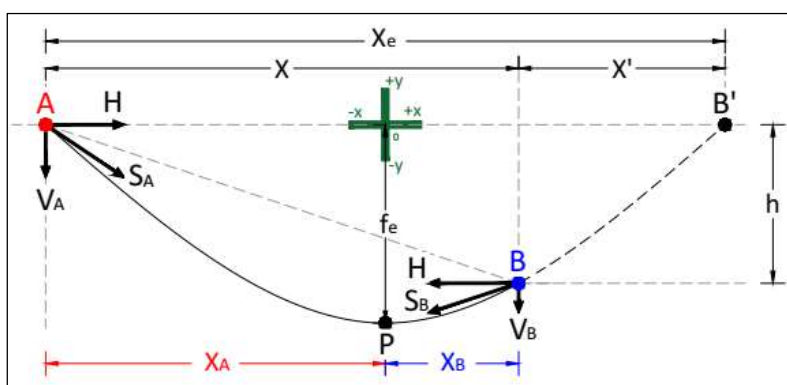


FIGURA 1 – Barramento desnivelado sem cadeias de isoladores.
Adaptado de Kiessling *et. al.* (2).

A partir de um valor arbitrário de H , pode-se f_e através da equação (1):

$$f_e = \frac{H}{m_s \cdot g} \left[\cosh \left(\frac{m_s \cdot g \cdot X_e}{2 \cdot H} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

na qual, m_s é a densidade linear do subcondutor e g a aceleração da gravidade. Assim, tem-se os valores de flecha e tração do barramento, que se apresentam simultâneos em um arbitrado estado inicial.

Para obter a tabela de esticamento, é necessário aplicar a equação de mudança de estado (5), variando a temperatura (T) dentro de uma amostragem discreta entre as temperaturas máxima e mínima de operação contínua do barramento. Entretanto, a cada mudança de estado, deve-se recalcular X_e , por meio das equações (2), (3) e (4):

$$L = \sqrt{h^2 + \left[\frac{2 \cdot H}{m_s \cdot g} \cdot \sinh \left(\frac{m_s \cdot g \cdot X}{2 \cdot H} \right) \right]^2}; \quad (2)$$

$$X_A = \frac{H}{m_s \cdot g} \ln \left\{ \frac{H}{m_s \cdot g \cdot (L - h)} \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{-m_s \cdot g \cdot X}{H} \right) \right] \right\}; \quad (3)$$

$$X_e = 2 \cdot |X_A|; \quad (4)$$

$$H_2^2 \cdot \left[H_2 - H_1 + \frac{E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12} \cdot (X_e \cdot m_{s1} \cdot g)^2}{24 \cdot H_1^2} + E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12} \cdot \varepsilon_t \cdot (T_2 - T_1) \right] = \frac{E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12} \cdot (X_e \cdot m_{s2} \cdot g)^2}{24} \quad (5)$$

Na equação (2), L representa o comprimento real do condutor, ao longo da catenária, e X_A , na equação (3), a distância horizontal entre o vértice "P" e o ponto de ancoragem "A". Os índices "1" e "2", atribuídos às variáveis m_s , H e T correspondem aos diferentes estados do barramento. Atribuindo valores conhecidos às variáveis do estado "1" e a duas do estado "2", determina-se o valor da terceira variável do estado "2".

A cada mudança de estado, é possível calcular as componentes transversais verticais (V_A e V_B), aplicadas nos pontos de ancoragem das estruturas suportes "A" e "B", respectivamente por meio das equações (6) e (7):

$$V_A = -H \cdot \sinh \left(\frac{m_s \cdot g \cdot X_A}{H} \right); \quad (6)$$

$$V_B = H \cdot \sinh \left(\frac{m_s \cdot g \cdot (X + X_A)}{H} \right). \quad (7)$$

2.1.2- Vãos Nivelados Com Cadeias de Isoladores

Um barramento de apenas um subcondutor é conceitualmente representado na Figura 2, com comprimento horizontal X , esticado entre dois pontos de ancoragens nivelados, com cadeias de isoladores, cada uma com comprimento L_k .

Os suportes de ancoragem recebem o esforço através de componentes horizontal (H) e vertical (V), por subcondutor, ambas iguais para os dois suportes. O vértice "P" da catenária se apresenta central ao vão. A flecha total está representada em duas componentes, f_1 e f_2 , sendo a primeira relacionada às cadeias de isoladores e a segunda ao condutor.

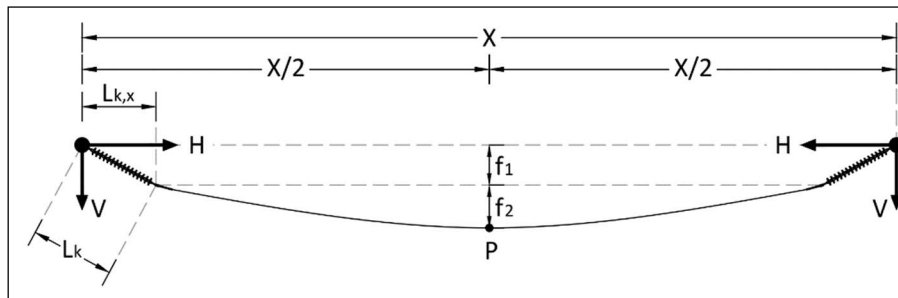


FIGURA 2 – Barramento nivelado com cadeias de isoladores.
Adaptado de Kiessling *et. al* (2).

A componente V se resume à metade do peso do barramento por subcondutor, devido aos suportes serem nivelados, e pode ser calculada pela equação (8):

$$V = \frac{1}{2} \cdot [m_s \cdot g \cdot (X - 2 \cdot L_{k,x}) + G_k] \approx \frac{1}{2} \cdot [m_s \cdot g \cdot (X - 2 \cdot L_k) + G_k] \quad (8)$$

onde, $L_{k,x}$ é a projeção horizontal de L_k e G_k é o peso de uma cadeia de isoladores.

A soma de f_1 e f_2 resulta na flecha total (f_t), que pode ser calculada através da equação (9), assumindo $L_{k,x} \approx L_k$.

$$f_t = \frac{1}{2 \cdot H} \cdot \left(\frac{m_s \cdot g \cdot X^2}{4} + m_s \cdot g \cdot L_k^2 + G_k \cdot L_k \right). \quad (9)$$

Uma outra equação de mudança de estado se apresenta para este tipo de vão:

$$\frac{H_2^2}{E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12}} \left[H_2 - H_1 + E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12} \cdot \varepsilon_t \cdot (T_1 - T_2) + \frac{E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12}}{H_1^2} \cdot \left(\frac{(m_{s1} \cdot g)^2 \cdot X^2}{24} + \frac{G_{k1} \cdot m_{s1} \cdot g \cdot L_k}{2} + \frac{G_{k1}^2 \cdot L_k}{3 \cdot X} \right) \right] = \frac{E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12}}{E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12}} \cdot \left(\frac{(m_{s2} \cdot g)^2 \cdot X^2}{24} + \frac{G_{k2} \cdot m_{s2} \cdot g \cdot L_k}{2} + \frac{G_{k2}^2 \cdot L_k}{3 \cdot X} \right). \quad (10)$$

2.2 - Efeitos do Vento

As normas NBR 6123 (4) e NBR 5422 (3) aplicam-se ao cálculo dos efeitos do vento. Cada qual possui particularidades perante a outra, mas ambas apresentam roteiros semelhantes. Entretanto, existem algumas diferenças conceituais incorporadas às etapas, principalmente relacionadas aos fatores de correção da velocidade básica de vento. Como exemplos, podem ser destacados: fator topográfico, presente apenas na primeira e temperatura coincidente, exclusividade da segunda.

O objetivo do cálculo é a determinação da força de arrasto, causada pela incidência de vento no barramento. As variáveis que influenciam o resultado são, principalmente: velocidade do vento, características do terreno, como topografia e rugosidade, características do objeto, como formato e altura de instalação e, baseado em conceitos probabilísticos, o grau de segurança e importância social das instalações.

A norma NBR 6123 (4) apresenta a equação (11) para fios e cabos, e equação (12) para barras prismáticas com seção circular. Assim, pode-se calcular a força de arrasto de vento sobre o subcondutor (F_{a-s}) e sobre uma cadeia de isoladores (F_{a-k}):

$$F_{a-s} = C_{a-s} \cdot q \cdot L \cdot d_s; \quad (11)$$

$$F_{a-k} = C_{a-k} \cdot q \cdot K \cdot L_k \cdot d_k \quad (12)$$

nas quais, C_{a-s} e C_{a-k} são coeficientes de arrasto, d_s e d_k são os diâmetros externos de subcondutores e cadeia de isoladores, q é a pressão de vento e K o fator de redução.

2.3 - Efeitos do Curto-Circuito

O método de cálculo de referência, para determinação dos esforços de curto-circuito, constitui o escopo principal da norma IEC 60865-1 (5), que aborda também os efeitos térmicos relacionados ao fenômeno elétrico. Esta norma se baseia em estudos realizados pelo CIGRÉ (*Conseil International Des Grands Réseaux Électriques*), principalmente na brochura 214 (8).

Devido à grande quantidade, as equações não são aqui apresentadas, exceto a equação (13), sobre a qual é proposta uma adaptação para o método unificado, na seção seguinte.

$$f_{es} = \frac{n_s \cdot m_s \cdot g \cdot X}{8 \cdot F_{st}} \quad (13)$$

na qual, f_{es} é a flecha estática, F_{st} a tração estática e n_s o número de subcondutores. Pois, os esforços de curto-circuito dependem das condições estáticas anteriores à ocorrência da falta.

Os três esforços dinâmicos a serem calculados são de tração, aplicados ao ponto de ancoragem do barramento. O primeiro, denominado esforço de aperto ($F_{pi,d}$), ou de *pinch*, ocorre no período sub-transitório da corrente de curto-circuito, e decorre da atração ou repulsão entre os subcondutores, causada pelos campos magnéticos induzidos. Estes campos, no período transitório e após, também causam interação entre as fases, originando o esforço ($F_{t,d}$), que permanece e evolui até a eliminação da falta, causando também o deslocamento do barramento. Quando cessa a passagem da corrente de falta o campo magnético se dispersa, fazendo com que o barramento volte para ação exclusiva da força peso. O retorno à posição de inicial causa do terceiro esforço ($F_{f,d}$), que ocorre após a eliminação do curto-circuito (9).

Segundo a norma, os três valores de tração se aplicam ao dimensionamento das estruturas suportes. Entretanto, no estudo de origem do CIGRÉ (8), constam ensaios práticos sugerindo que o esforço de aperto não seja relevante para as estruturas, devido ao alto valor de inércia destas. Assim, este esforço poderia ser utilizado para dimensionamento apenas dos elementos do próprio barramento, e desconsiderados para os suportes.

3.0 - A METODOLOGIA UNIFICADA PROPOSTA

A metodologia unificada proposta para equipar o programa computacional é resultado de combinações, adaptações e interconexões sobre os métodos de referência, conforme ilustrado na Figura 3.

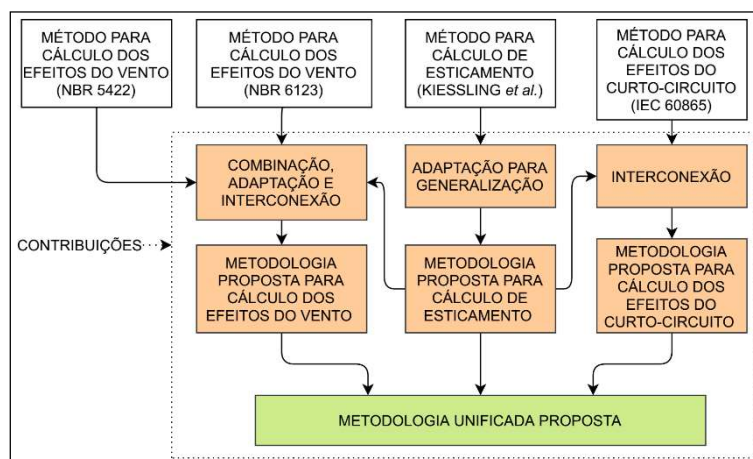


FIGURA 3 - Etapas para desenvolvimento da metodologia unificada.

Para o cálculo de esticamento é necessária uma adaptação, para generalizar a abrangência também à situação de barramento desnivelado com cadeias de isoladores, não contemplada na bibliografia de referência.

Os efeitos do vento, conforme referências, se resumem à força resultante de arrasto, aplicada transversalmente no ponto central do barramento. Como o barramento é flexível, não é correto apenas considerar que este esforço seja dividido entre os suportes, e aplicado transversalmente também ao ponto de ancoragem. A resultante transversal provoca incremento da tração, o que não é explicado nas normas. Por isto, uma adaptação, seguida da interconexão com o cálculo de esticamento, é apresentada na subseção 3.1.1. Adicionalmente, um entendimento constante na norma NBR 5422 (3) é combinado ao roteiro principal da norma NBR 6123 (4), suprimindo uma carência desta última quanto à temperatura de incidência mais relevante do vento.

Sobre o cálculo dos efeitos do curto-circuito, não se verifica necessidade de complementação, pois o método constante na norma de referência é abrangente e detalhado. Entretanto, é possível agregar precisão por meio da interconexão com o cálculo de esticamento, conforme apresentado na subseção 3.1.2.

3.1.1 - Metodologia Proposta para Cálculo de Esticamento

Analisando os roteiros de cálculo apresentados nas subseções 2.1.1 e 2.1.2, nota-se que o primeiro dispõe de método para consideração dos desníveis entres os suportes, enquanto o segundo soluciona a modelagem das cadeias de isoladores como cargas concentradas. O primeiro é utilizado como base da metodologia proposta, e o segundo como referência para as adaptações.

O roteiro para determinação do esticamento de vãos nivelados e com cadeias de isoladores se inicia com o cálculo de flecha, a partir de um valor arbitrário da componente horizontal da tração (H). Entretanto, quando se tem um arranjo físico pré-definido, a informação de entrada disponível é a flecha máxima (f_{max}), para a qual as distâncias elétricas entre os diferentes níveis de barramentos são atendidas. Assim, faz sentido que se reorganize a equação (10), obtendo:

$$H = \frac{1}{2 \cdot f_{max}} \cdot \left(\frac{m_s \cdot g \cdot X^2}{4} + m_s \cdot g \cdot L_k^2 + G_k \cdot L_k \right). \quad (14)$$

Neste ponto, interrompe-se o roteiro original para uma complementação, baseada em três equações do outro roteiro, que considera o desnível.

Por meio da equação (2) determina-se L e, aplicando as equações (3) e (4), X_e . Substituindo X por X_e nas equações (9) e (10), evoluem para:

$$f_t = \frac{1}{2.H} \cdot \left(\frac{m_s \cdot g \cdot X_e^2}{4} + m_s \cdot g \cdot L_k^2 + G_k \cdot L_k \right); \quad (15)$$

$$\frac{H_2^2}{E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12}} \left[H_2 - H_1 + E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12} \cdot \varepsilon_t \cdot (T_1 - T_2) + \frac{E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12}}{H_1^2} \cdot \left(\frac{(m_{s1} \cdot g)^2 \cdot X_e^2}{24} + \frac{G_{k1} \cdot m_{s1} \cdot g \cdot L_k}{2} + \frac{G_{k1}^2 \cdot L_k}{3 \cdot X_e} \right) \right] = \quad (16)$$

$$\frac{E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12}}{24} \cdot \left(\frac{(m_{s2} \cdot g)^2 \cdot X_e^2}{24} + \frac{G_{k2} \cdot m_{s2} \cdot g \cdot L_k}{2} + \frac{G_{k2}^2 \cdot L_k}{3 \cdot X_e} \right).$$

Aplicando a equação (15) se obtém f_t idêntico a f_{max} , caso o desnível entre os suportes seja nulo, ou seja, esta etapa é necessária para a situação de barramento desnivelado, mas não influencia os resultados caso seja nivelado. Determinadas as variáveis do estado inicial de temperatura máxima, aplica-se repetidamente a equação (16) para obtenção dos valores de flecha e tração dos demais estados de temperatura.

Através das equações (6) e (7), é possível calcular dos esforços verticais aplicados aos suportes mais alto e mais baixo do barramento, respectivamente, porém, sem contabilizar a massa das cadeias de isoladores. Inversamente, por meio da equação (8), calculam-se os esforços considerando as cadeias, porém, se aplica apenas aos vãos nivelados. Por isto, realiza-se uma adaptação do primeiro método. Considerando a massa das cadeias distribuídas ao longo do subcondutor, aplicando a equação (17), as equações (6) e (7) evoluem para (18) e (19).

$$m_{skd} = m_s + \frac{2 \cdot m_k}{X \cdot n_s}; \quad (17)$$

$$V_A = -H \cdot \sinh \left(\frac{m_{skd} \cdot g \cdot X_A}{H} \right); \quad (18)$$

$$V_B = H \cdot \sinh \left(\frac{m_{skd} \cdot g \cdot (X + X_A)}{H} \right) \quad (19)$$

sendo, m_{skd} a densidade linear do subcondutor mais massa das cadeias de isoladores ($2 \cdot m_k$) distribuídas uniformemente ao longo de X . Determinados os esforços por subcondutor, é interessante que se apresente os esforços por fase. Assim, calculam-se a tração estática sem vento (T_{sv}) e os esforços verticais por fase (P_A e P_B), multiplicando H , V_A e V_B por n_s .

3.1.2 - Metodologia Proposta para Cálculo dos Efeitos do Vento

Desenvolve-se a seguir uma complementação da metodologia, estabelecendo uma relação entre as forças de arrasto de vento e o peso dos elementos do barramento. Combinam-se as forças supracitadas em uma única resultante, obtendo uma densidade linear equivalente para o subcondutor (m_{sv}) e peso equivalente de uma cadeia de isoladores (G_{kv}), ambos com a carga de vento incorporada.

Sustentado pela norma aplicável, pode-se considerar que o vento sopra na direção horizontal e em apenas um sentido por instante. Assim, é possível somar vetorialmente os pesos e densidades lineares com as respectivas forças de arrasto de vento conforme equações (20) e (21).

$$m_{sv} = \sqrt{m_s^2 + \left(\frac{F_{a-s} \cdot n_{sv}}{g \cdot n_s} \right)^2}; \quad (20)$$

$$G_{kv} = \sqrt{G_k^2 + \left(\frac{F_{a-k}}{n_s} \right)^2} \quad (21)$$

onde, n_{sv} é o número de subcondutores, por fase, que recebe carga de vento.

Em relação à temperatura do barramento, que se deve considerar para aplicação da carga de vento, existem diferentes critérios de projeto possíveis de se adotar. Opta-se por utilizar o entendimento constante na norma NBR 5422 (3), o qual sugere que a velocidade de vento de projeto ocorre na temperatura coincidente com a média das mínimas diárias. Este valor de temperatura deve ser atribuído à variável T_2 na equação de mudança de estado (16). Obtendo H_2 , basta multiplicar por n_s para obter a tração estática com vento (T_{cv}) por fase.

Por fim, necessita-se determinar o esforço transversal total, devido ao vento, aplicado pelo barramento em cada ponto de ancoragem da estrutura suporte ($F_{a,b}$):

$$F_{a,b} = \frac{F_{a-s} \cdot n_{sv}}{2} + F_{a-k} \quad (22)$$

3.1.3- Metodologia Proposta para Cálculo dos Efeitos do Curto-Circuito

Como citado anteriormente, o método da IEC 60865-1 (5) é abrangente e detalhado. Por isto, apenas uma oportunidade de refinamento é identificada. A norma supracitada calcula f_{es} de forma simplificada, por meio da equação (13). Entretanto, valores mais precisos de flechas e trações estáticas podem utilizados. Substituindo as variáveis f_{es} e F_{st} , do método original, por f_t e T_{sv} , do cálculo de esticamento, incrementa-se precisão ao dimensionamento dos esforços de curto-circuito.

Os esforços devido ao curto-circuito costumam ser os mais determinantes para o dimensionamento das estruturas suportes, por serem maiores. Visto que as simplificações da referência são conservadoras, quando se modifica, adicionando precisão, se reduz o superdimensionamento dos esforços e das estruturas suportes. Adicionalmente, é importante considerar que os maiores esforços de tração com curto-circuito podem ocorrer durante tração estática máxima ou flecha estática máxima. Como tração e flecha estáticas são inversamente proporcionais, necessita-se realizar o cálculo de curto-circuito para as duas situações extremas, considerando válidos os maiores esforços obtidos.

4.0 – DIMENSIONAMENTOS E VALIDAÇÕES

Esta seção se dedica às simulações de dimensionamento, utilizando um programa computacional implementado, e às validações da metodologia proposta.

4.1 Simulações de Dimensionamentos

Selecionam-se sete vãos de barramentos, conforme Tabela 1. Considera-se a SE localizada em terreno plano com obstáculos baixos, em local cuja velocidade básica de vento é de 43 m/s e a temperatura coincidente é de 13 °C. Os barramentos são constituídos por subcondutores nus, de alumínio com alma de aço (CAA), dois por fase para 138 kV e 230 kV e quatro para 525 kV. Para os de 138 kV, a bitola é de 477 MCM (*Hawk*), para os de 230 kV é de 1113 MCM (*Bluejay*) e 954 MCM (*Rail*) para os de 525 kV. Os espaçamentos entre subcondutores são de 200 mm, 350 mm e 457 mm, respectivamente para os três níveis de tensão.

TABELA 1 - Vãos para as Simulações de Dimensionamento

Características	Vãos - nomenclaturas						
	F11	F12	F21	F22	F23	F51	F52
Tensão (kV)	138	138	230	230	230	525	525
X (m)	16,0	46,5	18,0	54,1	54,1	60,0	144,5
m_k (kg)	60	60	100	100	100	420	420
L_k (m)	2,0	2,0	2,9	2,9	2,9	5,3	5,3
a (m)	3,0	3,0	4,0	4,0	4,0	7,5	8,7
I_k'' (kA)	40	40	50	50	50	63	63
n_{esp}	1	2	1	3	3	3	8
h (m)	0	0	0	0	11	0	0

Nota: Sendo, I_k'' a corrente simétrica de curto-circuito. As unidades constam entre parênteses.

O fator de assimetria para as correntes de curto-circuito é de 2,6 e o tempo de atuação da proteção de 0,3 s. A flecha máxima percentual de premissa é de 3,5%, referente à temperatura de 90 °C. A temperatura mínima de operação é de -5 °C. Todas as situações são simuladas em uma única execução do programa, que retorna os resultados de cada dimensionamento. O resumo é apresentado na Tabela 2.

TABELA 2 - Resultados das Simulações de Dimensionamento

Vão	P_A (kgf)	P_B (kgf)	T_{sv} (kgf)	T_{cv} (kgf)	$F_{a,b}$ (kgf)	$F_{t,d}$ (kgf)	$F_{f,d}$ (kgf)	$F_{pi,d}$ (kgf)
F11	77	77	269	358	52	1425	1188	2735
F12	106	106	489	784	100	3904	3631	2598
F21	134	134	630	783	83	1933	2386	7812
F22	202	202	1158	1601	170	5621	7521	8166
F23	581	-125	845	1719	200	4540	7521	7487
F51	616	616	2462	3180	331	4919	7724	24735
F52	885	885	5057	7690	801	7989	0	33128

Nota: As unidades contam entre parênteses.

4.2 - Validações da Metodologia Proposta

O objetivo desta seção é validar a metodologia de cálculo proposta e sua implementação, a partir da comparação de resultados com outras referências. Validam-se as etapas de esticamento, efeitos do vento e do curto-circuito.

4.2.1 - Validação da Metodologia de Cálculo de Esticamento

Em Kiessling *et. al* (2), apresenta-se um exemplo de cálculo de esticamento, constante na página 553. Nesse, determina-se a tração de um barramento à 40°C, a partir de características conhecidas à 10°C, utilizando o método da subseção 2.1. A tração à 40°C é calculada pela referência é de 6005 N, com flecha de 1,74 m. Já na simulação utilizando o programa implementado, calcula-se tração de 6005,2 N e flecha de 1,736 m. Visto a compatibilidade entre os resultados, considera-se validada a metodologia quanto ao cálculo de esticamento.

4.2.2 - Validação da Metodologia de Cálculo dos Efeitos do Vento

A norma NBR 6123 (4) não apresenta nenhum exemplo de cálculo aplicável à condutores tracionados, por isto, utiliza-se um dimensionamento presente em Silva (6). Nesse, na página 119, constam dimensionamentos diversos sobre um determinado barramento. A Tabela 3 apresenta os resultados de tração com vento (T_{cv}) extraídos da referência e obtidos por meio do programa, com as respectivas diferenças percentuais. São realizadas duas comparações, referentes aos comprimentos de vão de 60 e 140 metros.

TABELA 3 - Validação da metodologia de Cálculo dos Efeitos do Vento

Esforços (kgf)	Referência		Programa em MATLAB		Diferença	
	60 m	140 m	60 m	140 m	60 m	140 m
T_{cv}	2779	5505	2726	5551	1,91%	0,84%

Visto a compatibilidade entre os resultados da referência com os obtidos por meio do programa, considera-se validada a metodologia quanto ao cálculo dos efeitos do vento.

4.2.3 - Validação da Metodologia de Cálculo dos Efeitos do Curto-Circuito

O método de cálculo da norma IEEE 60865-1 (5) possui exemplos no relatório técnico (10). O exemplo 5, nesse último, apresenta o cálculo dos esforços de curto-circuito de um barramento flexível, com tensão de 380 kV, adequado para validação da metodologia implementada no programa.

A TABELA 4 apresenta os resultados extraídos do exemplo de referência, e obtidos por meio do programa, com as respectivas diferenças percentuais. A estas diferenças, atribui-se o arredondamento utilizado na referência, com apenas duas casas decimais a cada resultado parcial, contra as 15 casas decimais utilizadas pelo MATLAB.

TABELA 4 - Validação da metodologia de Cálculo dos Efeitos do Curto-Circuito

Esforços (kN)	IEC 60865-2		Programa em MATLAB		Diferença	
	20 °C	60 °C	20 °C	60 °C	20 °C	60 °C
$F_{t,d}$	36,30	32,90	36,18	32,87	0,33%	0,09%
$F_{f,d}$	66,70	68,80	66,72	68,66	0,03%	0,20%
$F_{pi,d}$	39,90	36,20	39,80	36,16	0,25%	0,11%

Visto a compatibilidade entre os resultados da referência com os obtidos por meio do programa, considera-se validada a metodologia quanto ao cálculo dos efeitos de curto-circuito.

5.0 - CONCLUSÕES

O projeto eletromecânico de requisitos para estruturas abordado nesta pesquisa se refere aos barramentos flexíveis, constituído por desenhos, diagramas de esforços e memoriais de cálculo. Os esforços estáticos e dinâmicos ocorrem devido ao esticamento dos condutores, efeito gravitacional, incidência de vento e ocorrência de curto-circuito.

Identificam-se carências relacionadas à unificação dos métodos de cálculo aplicáveis para dimensionamento dos esforços. Com objetivo de solucionar estes problemas, uma metodologia unificada é proposta e implementada em um programa computacional, em MATLAB.

A validação é realizada por meio de comparações com resultados de outras referências, apresentando compatibilidades aceitáveis. Ou seja, para as situações abrangidas pelos métodos existentes em normas e livros, a metodologia unificada proposta apresenta resultados convergentes, destacando-se com a vantagem da unificação. Para as não abrangidas, como é o caso do vão "F23" na subseção 4.1, a falta de referências dificulta a validação, mas os resultados apresentados servirão para comparações em trabalhos futuros correlacionados.

Portanto, o presente trabalho possui como principal contribuição o desenvolvimento de uma metodologia unificada, que possui aplicação prática através do programa computacional. A ferramenta implementada apresenta potencial comercial e, inclusive, já vem sendo utilizada profissionalmente. Adicionalmente, esta pesquisa ajuda a preencher uma lacuna identificada na bibliografia atual, e condensa diversas informações a respeito do dimensionamento dos esforços de barramentos flexíveis, podendo servir também como um guia profissional para os engenheiros da área.

Como sugestão para trabalhos futuros, destaca-se a possível inclusão de otimização baseada em lógicas multivaloradas, levando em consideração aspectos técnicos e econômicos, que auxiliem o projetista na identificação dos critérios de projetos mais adequados à cada situação específica de barramento.

BIBLIOGRAFIA

- (1) R. F. da SILVA, "Avaliação de Esforços Dinâmicos em Função da Variação de Parâmetros Envolvidos no Cálculo para Estruturas de Subestações," Eng. Elétrica e Comput. Atividades Relac. com o Set. Científico e Tecnológico, vol. 2, pp. 96–107, 2020, (Online). Available: <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>.
- (2) F. KIESSLING, P. NEFZGER, J. F. NOLASCO, and U. KAINZ, Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction, 1st ed. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
- (3) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, "ABNT NBR 5422 :1985 - Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica," Associação Brasileira de Normas Técnicas. p. 58, 1985.
- (4) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, "ABNT NBR 6123:1988 - Forças devidas ao vento em edificações," Associação Brasileira de Normas Técnicas. p. 66, 1988.
- (5) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, "IEC 60865-1: Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 1: Definitions and calculation methods." p. 12, 2011.
- (6) R. F. da SILVA, "Análise de Metodologia de Cálculo de Esforços Estáticos e Dinâmicos para Dimensionamento de Estruturas de Subestações Isoladas a Ar com Barramentos Flexíveis," Universidade Federal de Itajubá, 2018.
- (7) P. R. LABEGALINI, J. A. LABEGALINI, R. D. FUCHS, and M. T. de ALMEIDA, Projetos Mecânicos Das Linhas Aéreas de Transmissão, 2nd ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.

- (8) I. C. O. L. E. S. CIGRÉ, "The Mechanical Effects Of Short-Circuit Currents in Open Air Substations (Part II)," vol. Brochure 2, no. Working Group 23.03. p. 207, 2002.
- (9) V. J. SUDARSHAN AND G. S. PUNEKAR, "Short circuit force in an AIS with special reference to L-L and L-L-L faults," 2018 20th Natl. Power Syst. Conf., pp. 1–4, 2018.
- (10) INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION, "IEC 60865-2: Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 2: Examples of Calculation," Geneva, 2015.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Tecnológica Federal (UTFPR) e ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia (PPGSE), onde se desenvolveu o mestrado que originou o presente trabalho.

À empresa Ensiste Engenharia, pelo suporte e incentivo para estreitamento da relação entre academia e indústria.

DADOS BIOGRÁFICOS



Ilton De Lima Junior possui graduação (2011) em Engenharia Industrial Elétrica com ênfase em Eletrotécnica, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, e mestrado (2021) em Engenharia Elétrica, pelo Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia (PPGSE) da UTFPR de Curitiba. Atua como engenheiro projetista eletromecânico de subestações na empresa Ensiste Engenharia de Sistemas Elétricos.

(2) CLAUDIO HENRIQUE RUIZ

Graduação em Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrotécnica, pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). MBA em Gerenciamento de Projetos pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Master Internacional em BIM Management pela ZIGURAT - Global Institute of Technology. Sócio-Diretor de Engenharia (Subestações, Estudos Sistemáticos e Linhas de Transmissão) na empresa ENSISTE Engenharia de Sistemas Elétricos.

(3) RAPHAEL AUGUSTO DE SOUZA BENEDITO

Raphael Augusto de S. Benedito possui Graduação em Eng. Elétrica Eletrotécnica pela UNESP de Ilha Solteira (2005), Mestrado (2007) e Doutorado (2011) em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade de São Paulo - USP. Atualmente é Professor de ensino superior pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR e Professor Permanente do Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia - PPGSE, ambos do Campus Curitiba. Tem experiência em pesquisa na área de Sistemas Elétricos de Potência, atuando nos seguintes temas: operação em tempo-real, análise de estabilidade, controle automático de geração; geração de energia; estimação de estados.