



**XXII SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GSE/26
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO –VIII

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

CONSIDERAÇÃO DE ELEVADAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO NO DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS PARA BARRAMENTOS AÉREOS DE SUBESTAÇÕES

Anderson Gusmão de Lima(*) Uieres Evandro de Castro
ABB ABB

RESUMO

Nos leilões sob supervisão da ANEEL são apresentados valores referenciais para as correntes de curto-circuito nas Subestações (SEs). Já o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) define uma Base de Dados de correntes de curto-circuito, baseada em simulações do Sistema e normalmente inferiores aos valores referenciais.

O objetivo do presente informe é propor uma abordagem sobre qual corrente máxima de curto-circuito adotar no dimensionamento das estruturas dos barramentos, garantindo operação segura, sem ocasionar sobredimensionamentos, bem como analisar o impacto da consideração de determinados valores dessa elevada corrente de surto.

PALAVRAS-CHAVE

Efeitos do Curto-Circuito, Dimensionamento de Estruturas, Subestações

1.0 - INTRODUÇÃO

No dimensionamento das estruturas e fundações das subestações, devem ser sempre levados em conta todos os efeitos mecânicos atuando sobre os mesmos, ou seja, a quais esforços as estruturas estarão submetidas. Esses esforços podem ser separados em duas categorias, esforços estáticos, ou permanentes, os quais atuarão constantemente nas estruturas e fundações— *Static Tensile Force* (F_{st}), conforme [1] – e esforços dinâmicos, cuja duração é muito curta, sendo esses esforços momentâneos, porém geralmente de uma intensidade muito superior à dos esforços estáticos, podendo causar sérios danos estruturais.

Os esforços estáticos são, em sua maioria, devidos ao peso próprio dos condutores da Subestação e à tração por eles ocasionada, às massas das próprias estruturas e equipamentos a elas fixados e às cargas de vento e gelo, que, num dimensionamento seguro, deve ser considerada como permanente.

Já os esforços dinâmicos são causados pelos efeitos de curto-circuitos, que fazem com que a abrupta passagem de uma sobrecorrente aumente significativamente a força eletromagnética atuante entre os condutores das fases adjacentes da SE. Esses esforços serão diretamente proporcionais à corrente de curto-circuito e à duração do surto.

Para a determinação dos efeitos da passagem dessa corrente de curto-circuito adotam-se os procedimentos descritos nas normas IEC 60865-1/2011 [1], IEC 60909-0/2001 [2] e IEEE Std 605/2008 [3], assim como os métodos propostos pelo CIGRÉ [4].

(*) Avenida Monteiro Lobato, nº 3411 VI. São Roque – Ed. 02 - Térreo – CEP 07190-904 Guarulhos, SP – Brasil
Tel: (+55 11) 2464-4785 – Cel: (+55 11) 9-9314-8711 – Email: anderson.lima@br.abb.com

2.0 - DIMENSIONAMENTO DOS PÓRTICOS DA SUBESTAÇÃO

Para a determinação dos efeitos eletromagnéticos e mecânicos da passagem da corrente de curto-circuito são necessários diversos dados de entrada, afim de dimensionar cada SE corretamente, de acordo com as exigências características de cada uma.

2.1 Condições climáticas do local

Inicialmente, deve ser conhecido o local da realização do empreendimento e suas características climáticas. Com isso, serão definidos dados de temperatura ambiente, altitude, velocidade do vento e demais características geográficas.

2.2 Especificações elétricas

São as principais definidoras da Subestação, uma vez que dizem respeito às tensões e correntes de operação, níveis de impulso atmosférico, distâncias mínimas entre fases adjacentes e as correntes de curto-circuito. Essas especificações definirão os equipamentos e demais instalações, como os cabos condutores.

2.3 Dados construtivos

Após essas considerações, é necessário analisar qual será o arranjo físico da SE, como comprimento de vãos, altura dos barramentos e distâncias entre fases, bem como realizar uma sondagem do terreno no qual a mesma será construída, para garantir a sua estabilidade mecânica. É importante, também, definir as estruturas, se metálicas ou de concreto e suas fundações, para garantir que suportem os esforços solicitados.

Uma vez definidos todos os dados básicos, dá-se prosseguimento ao projeto, até sua conclusão, que dependerá diretamente das considerações tomadas nessa fase de definições. Ou seja, os valores aqui utilizados terão impacto direto na configuração da SE.

3.0 - HISTÓRICO DOS DIMENSIONAMENTOS DAS ESTRUTURAS DOS BARRAMENTOS

No passado, eram considerados apenas os efeitos estáticos nos condutores. Recentemente, com o aumento das cargas conectadas ao sistema e a cada vez maior demanda de energia, os níveis de curto-circuito tornaram-se muito significativos. Em [4]estuda-se largamente o assunto e o impacto dessa diferença, uma vez que os efeitos do curto-circuito afetam não somente os equipamentos das Subestações, mas também suas dimensões e estruturas, pois os esforços são geralmente, muito superiores aos estáticos. Ou seja, foi preciso ser revisto o método de definição dos condutores, das estruturas e de suas fundações.

Por ser um problema de grande impacto, os parâmetros de entrada devem ser largamente discutidos, até que se possa validar as devidas considerações a serem tomadas em cada SE, para que sejam projetadas no ponto ótimo, respeitando todos os requisitos elétricos e mecânicos, sem detrimento da viabilidade econômica.

4.0 - ESTUDO DE CASO – APRESENTAÇÃO DOS EFEITOS DO CURTO-CIRCUITO

Neste informe, serão apresentados dois estudos, cuja única distinção será nas diferentes correntes de curto-circuito adotadas. No primeiro estudo será empregada, na determinação dos esforços, a mesma corrente adotada para os equipamentos, de acordo com os Editais ANEEL. No segundo, será utilizada corrente de curto-circuito determinada nos dados da ONS.

Para realizar a análise do impacto dessa diferença, foi considerado um sistema de 145 kV com vão nivelado de 60 metros, com dois subcondutores Rail por fase, distância de 3 metros entre fases e 200 mm entre subcondutores, apresentando uma flecha máxima de 1,8 metros (3% do comprimento do vão). Foi adotada uma velocidade de vento de 30 m/s e comparadas ambas as correntes de curto-circuito com duração de 0,5 s. Não foram consideradas cargas adicionais (derivações dos barramentos) ao longo do vão nem cargas de gelo.

Para determinação dos esforços estáticos, de acordo com os dados especificados, será empregado o condutor de Rail, com características abaixo:

- 954 MCM – Cabo de alumínio com alma de aço
- Área da seção transversal total: 516,75 mm²
- Área da seção transversal condutora (alumínio): 483,32 mm²
- Diâmetro total: 29,59 mm
- Massa linear: 1,6002 kg/m
- Módulo de Young: 65500N/mm²
- Coeficiente de expansão térmico: 20,3x10⁻⁶1/K

Foi definida, também, uma cadeia de isoladores de vidro, com as seguintes características:

- Comprimento total: 2,75 m
- Massa do conjunto: 69,60 kg
- Diâmetro dos discos: 254 mm
- 12 isoladores

4.1 Definição dos esforços dinâmicos apresentados

Com o passar da corrente de curto-circuito e consequente aumento da força eletromagnética, os condutores são levados a movimentar-se bruscamente, acarretando num esforço dinâmico nas estruturas. Com o término do surto, desaparece a força que mantinha o condutor suspenso, com energia potencial acumulada, sofrendo este uma queda, oscilação e retorno ao ponto de repouso, provocando outro esforço.

Assim, os esforços dinâmicos são definidos, nos termos de [1], em três categorias:

- *Short-circuit Tensile Force* ($F_{t,d}$): representa o esforço devido à atração/repulsão dos condutores de fases distintas em curto-circuito, dependendo diretamente da corrente de curto-circuito e da distância entre condutores.
- *Pinch Force* ($F_{pi,d}$): quando houver mais de um condutor por fase, representa a força de atração atuante entre os subcondutores de mesma fase, sendo inversamente proporcional à distância entre os mesmos e levando em consideração se eles se chocam, ou não, durante o surto.
- *Drop Force* ($F_{f,d}$): força de queda, ocasionada pelo retorno à condição inicial do cabo do vão, levado a balançar pela passagem de corrente de curto-circuito, após a extinção da mesma. É dependente principalmente do peso do condutor e do ângulo de balanço; quanto mais o cabo for suspenso pelo curto-circuito, maior o esforço na queda. Conforme [1], caso o máximo ângulo de balanço do condutor não exceda 70°, esse esforço será absorvido pela elasticidade do cabo, portanto não será significativo na estrutura.

Um importante fator a ser considerado é o respeito à distância mínima entre fases durante o curto-circuito, uma vez que a flecha sofrerá duas deformações, uma térmica, pois, com o aumento de temperatura ocasionado pela passagem da alta corrente, o condutor sofrerá dilatação, e outra mecânica, pois o esforço provocará uma deformação elástica do cabo. Com a flecha agravada e o condutor em balanço, deve-se analisar o máximo deslocamento horizontal – *Maximum Horizontal Displacement* (b_h) – de cada fase, para manter o espaçamento permitido entre condutores de fases diferentes.

Como observado em [1], equação (48), a mínima distância entre fases (a) deve ser tal que, com o curto-circuito, seja respeitada a mínima distância fase-fase para o nível de tensão em questão (a_{min}) – foi adotada a distância mínima de 1,3 m, conforme a Tabela A.1 de [5]. Assim, deve ser respeitada a relação definida pela Equação (1):

$$a_{min} = a - 2 \cdot b_h \quad (1)$$

Para o caso estudado, então, o máximo deslocamento horizontal permitido é de 1,175 m.

4.2 Determinação dos esforços com base na corrente de curto-circuito de Edital ANEEL

A ANEEL define, em Editais de Leilões, correntes de curto-circuito da ordem de 31,5 ou 40 e até mesmo 63 kA, valores esses que dependem do nível de Tensão da Subestação.

Para efeito de cálculo, será considerada a corrente de 40 kA.

4.2.1 Esforços dinâmicos

Com as configurações definidas, os esforços nos barramentos são apresentados conforme a Tabela 1, a seguir.

O máximo deslocamento horizontal calculado é de 2,49 m, ou seja, a equação (1) não será respeitada. Uma solução seria o aumento da distância entre fases e, consequentemente, a área ocupada pela SE.

Uma outra solução seria diminuir a flecha de forma que, mesmo com sua expansão, as fases adjacentes não se aproximem. Porém essa solução acarretaria no aumento dos esforços estáticos proporcionalmente à diminuição das flechas, provocando aumento das estruturas e fundações que, conforme abordado na seção 4.2.3, depende diretamente deste esforço.

Tabela 1 – Esforços nos Barramentos com corrente de curto-circuito de 40 kA

Esforços		
Estáticos	F_{st}	15151 N
Dinâmicos	$F_{t,d}$	41547 N
	$F_{pi,d}$	31337 N
	$F_{f,d}$	55984 N

4.2.2 Esforços nas Estruturas

Como é definido no item 6.5.2 (Nota 2) de [1], no projeto de estruturas de sistemas trifásicos deve-se considerar os esforços de curto-circuito em apenas duas fases, enquanto a terceira fica sujeita apenas aos esforços estáticos. Desta forma, a Força Resultante (F_{res}) nas estruturas é definida por:

$$F_{res} = F_{st} + 2 \cdot \max \{F_{t,d}, F_{pi,d}, F_{f,d}\} \quad (2)$$

No caso, a resultante será de $F_{res} = 127119$ N.

4.2.3 Esforços nas Bases e Fundações

De acordo com a 2ª edição de [1], não haviam considerações a respeito dos esforços devidos ao curto-circuito no projeto das fundações, ou seja, não se definia se as mesmas deveriam ser dimensionadas para suportar os esforços dinâmicos ou não.

Entretanto, com o item 6.5.3, da 3ª edição, foi concluído o estudo que eximia o projeto das fundações da consideração dos esforços dinâmicos, dada a característica principalmente impulsiva do surto, que é absorvido pela inércia da estrutura, isto é, o esforço resultante nas bases dos pórticos é desprezível quando comparado a outros efeitos, como o próprio vento lateral nas faces das estruturas, sendo indicada sua desconsideração.

Assim, as fundações, a partir da publicação da terceira edição da norma IEC 60865-1, devem suportar apenas os esforços estáticos.

4.3 Determinação dos esforços com base na corrente de curto-circuito ONS

O Operador Nacional do Sistema Elétrico disponibiliza uma Base de Dados das correntes de curto-circuito do Sistema, com base em seus estudos elétricos do Sistema Interligado Nacional (SIN), que, conforme informado pela organização em [6], consideram a rede simulada com a sua configuração completa, com todos seus componentes operando, sendo esta a condição mais conservadora. Para este caso, será adotada a corrente de curto-circuito referente ao mesmo caso estudado na seção 4.2, com base nos estudos do ONS: 16 kA.

4.3.1 Esforços dinâmicos

Os esforços nesse cenário são apresentados na Tabela 2, abaixo.

Tabela 2 – Esforços nos Barramentos com corrente de curto-circuito de 16 kA

Esforços		
Estáticos	F_{st}	15151 N
Dinâmicos	$F_{t,d}$	12866 N
	$F_{pi,d}$	20999 N
	$F_{f,d}$	0

Nesse caso, o máximo deslocamento horizontal foi de 0,628 m, o que, diferentemente do caso anterior, viabiliza a construção com as distâncias comumente adotadas, definidas nesta seção.

4.3.2 Esforços nas Estruturas

Seguindo os preceitos da Equação (2), será obtida com esse cenário uma resultante $F_{res} = 57149 \text{ N}$.

5.0 - ESTUDO DE CASO – COMPARATIVO DOS RESULTADOS APRESENTADOS

Com a utilização da corrente de 40 kA, foi obtida uma resultante de 127119 N. Já para o curto-circuito de 16 kA, surgirá um esforço total de 57149 N, aproximadamente 45% do esforço apresentado com a utilização do surto de 40 kA. As fundações, por serem dimensionadas pelos fatores estáticos, não seriam afetadas. As colunas e vigas, entretanto, seriam totalmente distintas nesse caso, dada a discrepância entre os esforços, aumentando o custo e as dimensões das estruturas.

6.0 - CONCLUSÃO E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Pelos resultados obtidos e diferença dentre eles, é claro o impacto das elevadas correntes de curto-circuito no dimensionamento das estruturas.

As correntes de curto-circuito utilizadas pela ANEEL são importantes para equalizar as propostas apresentadas para os mesmos. Porém, a nível de Projeto Executivo a ser dimensionado e construído, deve ser definido um valor de curto-circuito adequado à situação particular da SE, conforme estudos do SIN e previsão de cargas.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEC 60865-1, "*Short-circuit currents - Calculation of effects. Part 1: Definitions and calculation method*", Geneva: IEC, 1993
- [2] IEC 60909-0, "*Short-circuit current calculation in three-phase a. c. systems. Part 0 : Calculation of currents*", Geneva: IEC, 2001
- [3] IEEE Std 605, "*IEEE Guide for Bus Design in Air Insulated Substations*", New York: IEEE, 2008
- [4] IEC TC 73/CIGRÉ SC 23 WG 11, "*The mechanical effects of short-circuit currents in open air substations (Rigid and flexible bus-bars)*", Vol. 105, Geneva: IEC, Paris: CIGRÉ, 1996
- [5] ABNT NBR 8841, "*Coordenação de isolamento fase-fase*", Rio de Janeiro: ABNT, 2010
- [6] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), <http://www.ons.org.br/home/>

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Anderson Gusmão de Lima, brasileiro, nascido em São Paulo no ano de 1988, graduado no curso de Engenharia Elétrica pela Universidade Presbiteriana Mackenzie (SP) no fim de 2011. Atualmente, é Engenheiro de Projetos Eletromecânicos de Subestações na ABB, possui artigos publicados também nas áreas de Telecomunicações, sobre modelamento de Ruídos Impulsivos em comunicação PLC e Matemática Aplicada, na área de Espaços Métricos. Para maiores detalhes, visitar <http://lattes.cnpq.br/7405806167146090>



Uieres Evandro de Castro, brasileiro, nascido em São Bernardo do Campo no ano de 1974, graduado no curso de Engenharia Elétrica pela UNICEP - São Carlos em 2002. Atualmente, é Engenheiro de Projetos Eletromecânicos de Subestações na ABB.