



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

BR/GSE/25  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO –VIII**

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

**IMPACTO NO PROJETO DAS SUBESTAÇÕES DA REDE BÁSICA DAS NOVAS CONDIÇÕES DE SOBRECARGA IMPOSTAS AOS TRANSFORMADORES PELOS PROCEDIMENTOS DE REDE DO ONS**

**Fabio Nepomuceno Fraga (\*)**  
**Chesf**

**Luciana Conde Martins de Albuquerque**  
**Chesf**

**RESUMO**

O presente trabalho apresentará uma avaliação do impacto provocado pelas novas condições de sobrecarga em transformadores, determinadas no Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS, no projeto de subestações da rede básica do Sistema Interligado Nacional avaliando as condições necessárias para os demais equipamentos e barramentos suportarem as novas solicitações impostas.

**PALAVRAS-CHAVE**

Subestações, Projetos, Sobrecarga, Procedimentos de Rede

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Após o início da vigência da revisão 2.0 do Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS que estabelece os requisitos mínimos para transformadores, subestações e seus equipamentos, a partir de 11 de novembro de 2011, novas condições de operação em sobrecarga foram estabelecidas para as unidades transformadoras a serem instaladas no Sistema Interligado Nacional (SIN).

O item 7.1.4 (Condições Operativas), do submódulo 2.3, apresenta os seguintes requisitos para as unidades transformadoras de potência:

*“ 7.1.4.2 As unidades transformadoras devem ser especificadas para operar desde sua entrada em operação com:*

- a) Carregamento não inferior a 120% da potência nominal por período de 4 horas do seu ciclo diário de carga para a expectativa de perda de vida útil normal estabelecida nas normas técnicas de carregamento de transformadores. A sobrecarga de até 20% deve ser alcançada para qualquer condição de carregamento do transformador no seu ciclo diário de carga;*
- b) Carregamento não inferior a 140% da potência nominal por período de 30 minutos do seu ciclo diário de carga para a expectativa de perda de vida útil normal estabelecida nas normas técnicas de carregamento de transformadores. A sobrecarga de até 40% deve ser alcançada para qualquer condição de carregamento do transformador no seu ciclo diário de carga. “*

Estas novas condições de sobrecarga impostas aos transformadores em seu regime diário de operação fez surgir a necessidade de uma reavaliação completa das condições de projeto de suas conexões e nos barramentos das subestações. A avaliação necessária foi imposta tanto ao projeto eletromecânico da subestação quanto as características nominais de especificação dos equipamentos que compõem o circuito de corrente das conexões dos transformadores. Os disjuntores, chaves seccionadoras e transformadores de corrente da conexão do transformador também ficaram submetidos ao regime de sobrecarga.

(\*) Rua Delmiro Gouveia, N° 333, Ed. André Falcão - DEPS - Bloco D - Sala 218 - Bongi - CEP: 50761-901 - Recife - PE - Brasil - Tel.: (+55 81) 3229-3042 - Fax: (+55 81)3229-3269 - Email: fabionf@chesf.gov.br

## 2.0 - AVALIAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DAS CÉLULAS DE CONEXÃO DOS TRANSFORMADORES

A avaliação dos equipamentos das células de conexão dos transformadores foi necessária uma vez que tanto o arranjo eletromecânico da subestação quando as características nominais de especificação dos equipamentos que compõem o circuito de corrente das conexões dos transformadores ficam submetidos ao regime de sobrecarga imposto ao transformador.

A inexistência de normas que especifique ciclos de sobrecarga desta magnitude para os equipamentos da conexão do transformador provocou a necessidade de especificação de equipamentos com corrente nominais maiores e em algumas situações, fora dos valores padronizados normalmente empregados. Estas características provocaram maiores custos e dificuldades na aquisição destes equipamentos sobretudo nos transformadores de corrente que mesmo com fatores térmicos de 1,2 não suportariam o regime de 40% de sobrecarga do transformador.

## 3.0 - IMPACTO NO PROJETO ELETROMECÂNICO DA SUBESTAÇÃO

O projeto eletromecânico da célula de conexão dos transformadores bem como o dimensionamento dos barramentos principais das subestações necessitaram ser reavaliado com o objetivo de garantir que os cabos e conectores suportassem as condições diárias de corrente. Estas reavaliações foram desenvolvidas observando os seguintes pontos:

- Regime de sobrecarga diária de 4 horas com 20% de sobrecarga seguido de mais 0,5 horas com 40% de sobrecarga no transformador;
- Capacidade de condução dos cabos utilizados nas conexões;
- Avaliação das flechas dos cabos durante a operação com correntes de sobrecarga dos transformadores;
- Esforços estáticos nos pórticos e suportes da subestação face utilização de cabos mais pesados e com flechas maiores;
- Esforços dinâmicos nos pórticos face às novas condições estáticas de esforços e flechas durante a sobrecarga;

Para subsidiar as reavaliações necessárias estudos de fluxo de carga nos barramentos e estudos de esforços estáticos e dinâmicos nas estruturas da subestação foram desenvolvidos para as diversas condições de funcionamento da instalação e comparadas com as condições padrão da Chesf para subestações que não exigem esta condição de sobrecarga.

Com a avaliação das novas condições de projeto um novo padrão de projeto eletromecânico foi desenvolvido com emprego de cabos de alumínio com liga termorresistente e com um padrão estrutural adequado as novas solicitações elétricas e mecânicas ao longo do ciclo diário de operação da subestação. No item 4 apresentaremos um estudo de caso onde uma comparação entre um projeto com o regime de sobrecarga e outro sem o regime de sobrecarga dos transformadores.

## 4.0 - ESTUDO DE CASO: SUBESTAÇÃO 230-69 KV COM TRANSFORMADORES DE 150 MVA

Neste item apresentaremos um estudo de caso aplicado a subestação 230-69 kV de Nossa Senhora do Socorro localizada no estado de Sergipe na Região Metropolitana de Aracaju. A referida subestação foi ganha pela Chesf no Leilão ANEEL 006/2011 e tem indicado para seu horizonte final a instalação de quatro transformadores 230-69 kV de 150 MVA com o novo regime de sobrecarga. Para exemplificar apresentaremos um estudo onde a subestação será projetada para atender a sobrecarga comparando com a condição onde a mesma não tivesse a necessidade de atender aos requisitos de sobrecarga dos transformadores.

Tomando como premissa o critério de atendimento "n-1" teríamos que a carga da subestação em seu horizonte final seria de 450 MVA, considerando a possibilidade de sobrecarga nos transformadores passaríamos a ter uma carga máxima de 630 MVA. A seguir apresentaremos os estudos desenvolvidos na fase de projeto básico.

### 4.1 Estudos de fluxo de carga no barramento

Os estudos de fluxo de carga nos barramentos têm por objetivo identificar as maiores solicitações impostas aos barramentos das subestações. Para novos empreendimentos estes estudos visam subsidiar o dimensionamento dos cabos que serão aplicados no barramento, informando a expectativa de carregamento máximo do mesmo no horizonte final de planejamento da subestação. As figuras a seguir apresentam as condições mais críticas de carregamento dos barramentos de 230 e 69 kV da subestação de Nossa Senhora do Socorro considerando as condições limite de sobrecarga dos transformadores.

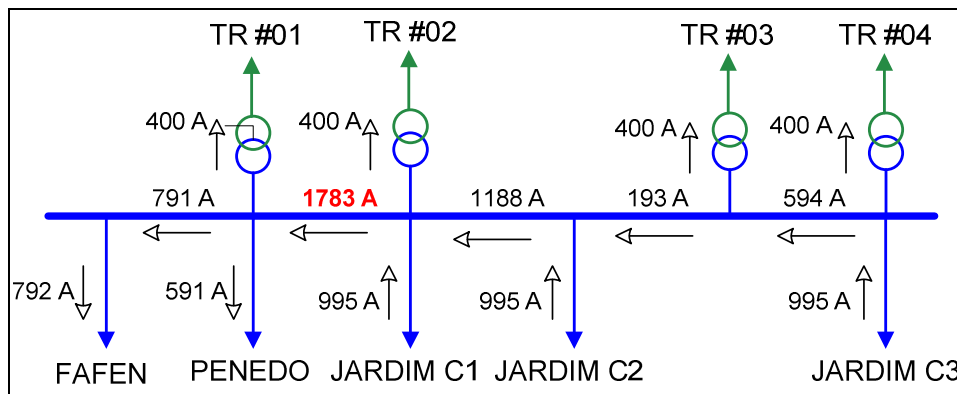


FIGURA 1 - Distribuição de corrente, em Ampère, para o setor de 230 kV, durante contingência externa a subestação, para cenário de esgotamento da SE Nossa Senhora do Socorro

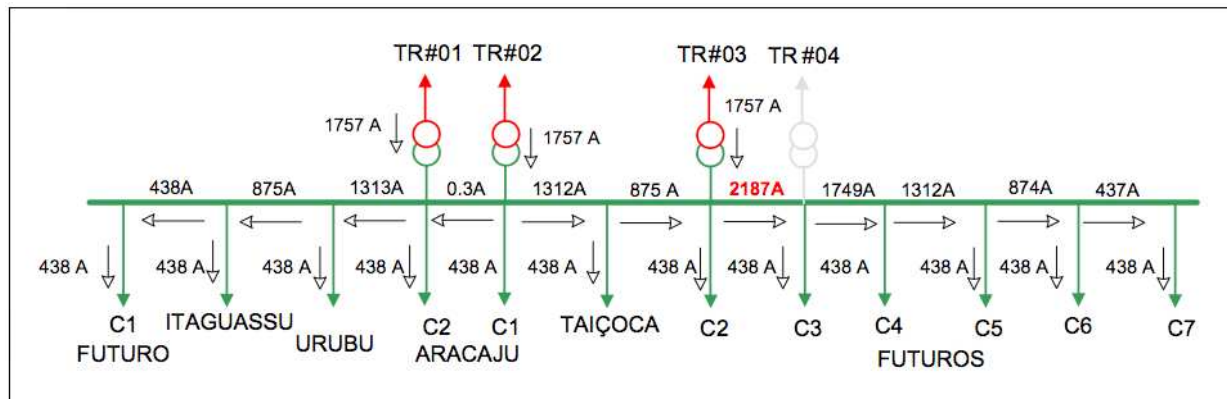


FIGURA 2 - Distribuição de corrente, em Ampère, para o setor de 69 kV, durante contingência do Transformador 230-69 kV considerando a SE Nossa Senhora do Socorro esgotada

Observando-se as figuras 1 e 2 podemos concluir que para os transformadores com sobrecarga temos:

- A máxima corrente que o barramento 230 kV da subestação de Nossa Senhora do Socorro estará submetido, para os cenários considerados, é da ordem de 1783 A;
- A máxima corrente que o barramento 69 kV da subestação de Nossa Senhora do Socorro estará submetido, para os cenários considerados, é da ordem de 2187 A;

Estudo similar foi realizado considerando que os transformadores não tinham condições de sobrecarga e para estas situações chegamos a correntes de 1280 A para o barramento de 230 kV e de 1563 A para o barramento de 69 kV. Para as correntes nas conexões dos transformadores temos:

- A máxima corrente na conexão de 230 kV dos transformadores é de 527,2 A na condição de 40% de sobrecarga e de 376,5 A sem sobrecarga (na perda de um dos transformadores);
- A máxima corrente na conexão de 69 kV dos transformadores é de 1757 A na condição de 40% de sobrecarga e de 1256 A sem sobrecarga (na perda de um dos transformadores);

#### 4.2 Determinação dos cabos condutores

Com a determinação das correntes nos estudos apresentados no item 4.1 foram determinadas as bitolas mínimas para os cabos dos barramentos principais e conexões dos transformadores. Os seguintes critérios foram observados:

- Corrente de curto-circuito do setor de aplicação do cabo;
- Ampacidade;
- Efeito Corona;

Para atendimento aos critérios de curto-circuito e efeito corona o cabo de menor bitola que atende é o cabo CA 636 MCM – Orchid. Partindo desta bitola determinamos os cabos indicados na Tabela 1 a seguir.

TABELA 1 – Cabos mínimos determinados

Setor	Item	Condição	Cabo Escolhido	Tecnologia
230 kV	Barramento Principal	Sem sobrecarga	2xCA 636 MCM Orchid	Al 1350
230 kV	Conexão do transformador	Sem sobrecarga	1xCA 636 MCM Orchid	Al 1350
230 kV	Barramento Principal	Com sobrecarga	2xCA 954 MCM Magnolia	Al 1350
230 kV	Conexão do transformador	Com sobrecarga	1xCA 636 MCM Orchid	Al 1350
69 kV	Barramento Principal	Sem sobrecarga	2xCA 700 MCM Verbena	Al 1350
69 kV	Conexão do transformador	Sem sobrecarga	2xCA 636 MCM Orchid	Al 1350
69 kV	Barramento Principal	Com sobrecarga	2xCA 1192,5 MCM Hawthorn	Al 1350
69 kV	Conexão do transformador	Com sobrecarga	2xCA 954 MCM Magnolia	Al 1350
69/230 kV	Barramento Principal	Indiferente	2xCA 636 MCM T-Orchid	Termorresistente
230 kV	Conexão do transformador	Indiferente	1xCA 636 MCM T-Orchid	Termorresistente
69 kV	Conexão do transformador	Indiferente	2xCA 636 MCM T-Orchid	Termorresistente

Analisando os dados apresentados na Tabela 1 verificamos que a opção de adoção de cabos com liga de alumínio termorresistente apresenta-se como a solução mais vantajosa uma vez que utiliza bitola menor, mais leve e unifica o mesmo cabo em todos os setores da subestação. A utilização cabo termorresistente deve ser avaliada também segundo parâmetros mecânicos uma vez que operam em temperaturas superiores produzindo esforços diferentes ou flechas maiores para um mesmo esforço.

#### 4.3 Avaliação dos esforços mecânicos e flechas

No desenvolvimento do projeto de uma subestação a determinação dos esforços aos quais as estruturas dos barramentos estão submetidos e as flechas máximas admissíveis nos diversos vãos da subestação são fundamentais para a otimização do projeto eletromecânico. A Figura 3 mostra um vão típico de um barramento de uma subestação. A avaliação realizada consistiu em controlar a flecha (conforme indicada a Figura 3 entre os pórticos A e B) e verificar quais esforços “F” resultavam nos pórticos da subestação.

A Chesf adota como critério de projeto que, na máxima temperatura de operação do cabo, a flecha seja limitada a três por cento do comprimento do vão. Este critério foi mantido nas análises realizadas com o objetivo de evitar flechas maiores que provocariam esforços dinâmicos maiores e também evitaria a necessidade de modificação das alturas padronizadas para os barramentos na Chesf garantindo assim o atendimento as distâncias mínimas de segurança necessárias.

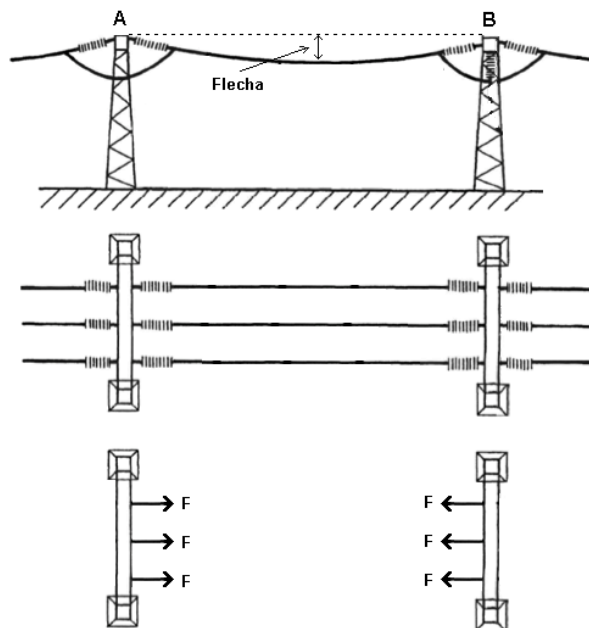


FIGURA 3 – Vão típico de um barramento – flechas e esforços

Para o dimensionamento mecânico do barramento dois esforços devem ser determinados. Os esforços estáticos, que são estabelecidos pelo lançamento e esticamento dos cabos, são calculados levando em conta o peso próprio dos condutores, temperatura de operação e a ação do vento. Os esforços dinâmico, que são produzidos durante a ocorrência de curto-circuito e sua determinação esta baseada nos procedimentos descritos na IEC 60865-1. A subestação de Nossa Senhora do Socorro apresenta 40 kA de curto-circuito no setor de 230 kV e 31,5 kA no setor de 69 kV.

As Figuras 4 e 5 apresentam as configurações dos vãos dos barramentos de 230 e 69 kV utilizados para as simulações de esforços estáticos e dinâmicos na subestação de Nossa Senhora do Socorro.

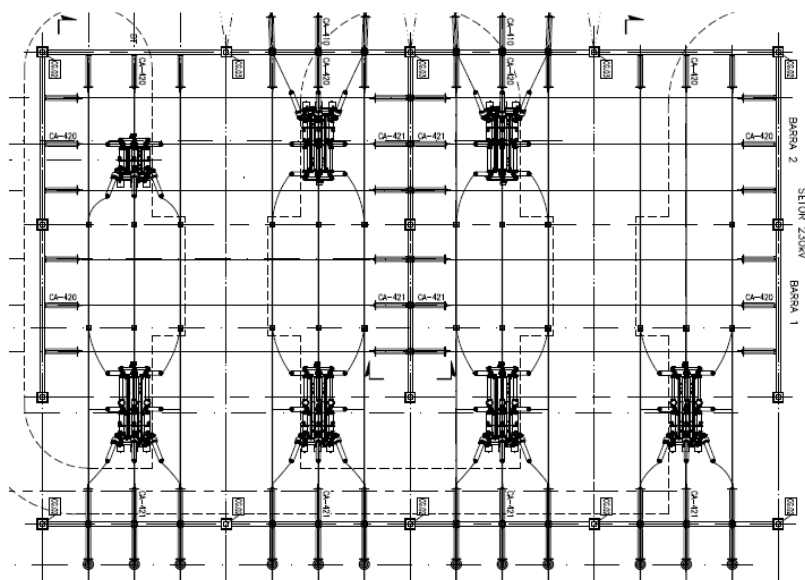


FIGURA 4 – Vão do barramento 230 kV da subestação de Nossa Senhora do Socorro

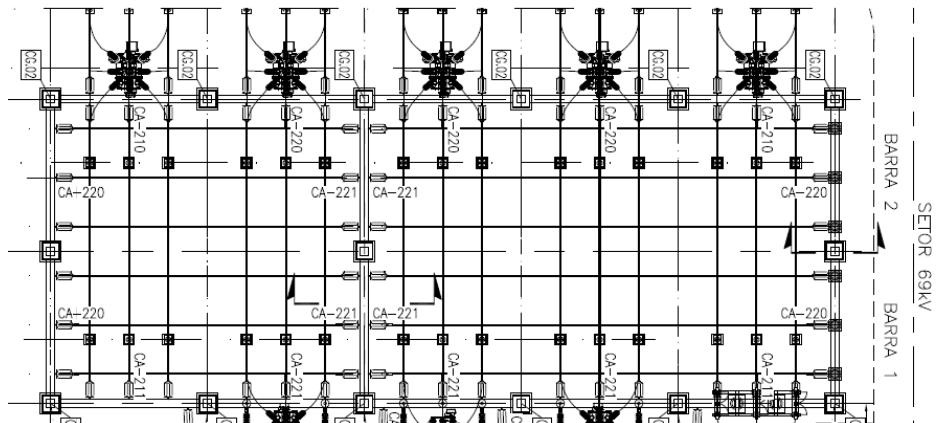


FIGURA 5 – Vão do barramento 69 kV da subestação de Nossa Senhora do Socorro

A Tabela 2 apresenta o resultado das simulações realizadas para os vãos dos barramentos principais de 230 e 69 kV. Foram simulados os vãos com as possíveis configurações de cabos considerando os transformadores da subestação com ou sem sobrecarga. Foi tomado como referência os esforços da condição sem sobrecarga (2x636 MCM – Orchid para a barra de 230 kV e 2x700 MCM – Verbena para a barra de 69 kV).

Podemos observar que a aplicação de sobrecarga não provocou grandes variações nos esforços dinâmicos aos quais as estruturas dos barramentos estão submetidas. Entretanto, caso a escolha para a barra de 230 kV fosse a configuração com 2x954 MCM - Magnolia poderíamos ter variações de 7,63% obrigando uma nova simulação dinâmica das estruturas da subestação para verificação dos fatores de segurança do projeto. As maiores variações ocorreram nos esforços estáticos provocando a necessidade de reavaliação das estruturas da subestação.

TABELA 2 – Esforços por fase nos barramentos principais

Vão	Condutor	Flecha Máxima	Esforço		Variação	
			Estático	Dinâmico	Estático	Dinâmico
Barra 230 kV 32 m	2x636 MCM - Orchid	3% a 75°C	450 kgf	3173 kgf	-	-
	2x954 MCM - Magnolia	3% a 75°C	600 kgf	3415 kgf	33,33%	7,63%
	2x636 MCM - T-Orchid	3% a 85°C	435 kgf	3173 kgf	-4%	0%
Barra 69 kV 16 m	2x700 MCM - Verbena	3% a 75°C	230 kgf	2620 kgf	-	-
	2x1192,5 MCM - Hawthorn	3% a 75°C	370 kgf	2667 kgf	59,83%	1,79%
	2x636 MCM - T-Orchid	3% a 115°C	270 kgf	2606 kgf	16,63%	-0,53%

## 5.0 - CONCLUSÃO

Durante o desenvolvimento do trabalho constatamos que a utilização dos transformadores com o novo regime de sobrecarga apresenta maior impacto nos esforços estáticos podendo ter variações superiores a 59% e obrigando um novo dimensionamento das estruturas dos pórticos da subestação. Assim como no critério da ampacidade, os cabos com liga de alumínio termorresistente apresentaram-se como a melhor solução produzindo um menor impacto no projeto mecânico e sendo desta forma a solução a ser adotada para a subestação. Outro ponto observado é que as correntes nominais, no setor de 69 kV, de chaves seccionadoras e transformadores de corrente tiveram que ser adequadas aos valores máximos de corrente das conexões.

Todos estes fatores e dificuldades apresentados e as diversas análises necessárias, em um ambiente extremamente competitivo como se apresentam os leilões de transmissão da ANEEL, mostram que a mudança nas condições de operação em sobrecarga de unidades transformadoras não traz apenas impacto na especificação dos transformadores, mas em todo o projeto da instalação tornando-se também um grande desafio para o projeto e construção de instalações no sistema interligado nacional e contribuindo para um maior custo e risco do empreendimento impactando na expectativa de retorno do investimento.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ONS - Submódulo 2.3 - Requisitos mínimos para transformadores e para subestações e seus equipamentos – rev. 2.0 – vigência a partir de 11/11/2011;
- (2) Fraga, F. N.; Nascimento, B. A.; Veloso, R.L.S. "Cabos Termorresistentes: Uma Alternativa para Otimização e Modernização de Barramentos de Subestações", XX SNPTEE, Recife, PE, 2009;
- (3) Chesf, Projeto Básico – Relatório Técnico RT-04-07-03/2012: ANÁLISE EM REGIME PERMANENTE E DINÂMICO, 03/2012;
- (4) Fraga, F. N.; Nascimento, B. A.; Veloso, R.L.S.; Melo, R.O.; Godoy, A.V. "Thermal-resistant aluminium-alloy conductor: an alternative for bus uprating of substations", CIGRE Session 43, Paris, França, 2010;
- (5) International Electrotechnical Commission. IEC 60865-1: Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 1 - Definitions and calculation methods, 1993;
- (6) International Electrotechnical Commission. IEC 60865-2: Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 2 - Examples of calculation, 1994.