



**XXIII SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GTM//10  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO – XIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES –  
GTM**

**ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DE UM TRANSFORMADOR DEFASADOR: REQUISITOS A SEREM  
CONSIDERADOS**

**Janaína Gomes da Costa (\*)  
CEMIG GT**

**Adina Martins Pena  
CEMIG GT**

**RESUMO**

Com o crescente aumento da demanda de energia elétrica surge a necessidade de ampliação do sistema elétrico com a implantação de novas linhas de transmissão ou aumento da eficiência do sistema elétrico existente para reduzir as perdas, aumentar a confiabilidade e atender os consumidores com fornecimento de energia dentro dos critérios exigidos pela ANEEL e pelo ONS. Para aumentar a eficiência do sistema elétrico de transmissão existem algumas alternativas técnicas que cumprem com esta tarefa, sendo que uma delas é a utilização dos transformadores defasadores.

Ainda existem poucos transformadores de potência defasadores instalados no sistema elétrico brasileiro. A especificação deste equipamento tem alguns pontos importantes que precisam ser definidos pela transmissora, ou seja, o tipo construtivo, os requisitos elétricos solicitados tais como sobretensões, sobrecarga, suportabilidade a curto-circuito, impedância, perdas em vazio e em carga, nível ruído.

Atualmente existe a dificuldade na definição de características básicas para fabricação motivada pela fase inicial desta aplicação em sistemas de potência com conseqüente inexistência de normalização brasileira aplicável a este equipamento.

**PALAVRAS-CHAVE**

Transformador defasador, especificação, requisitos técnicos.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Os transformadores defasadores são equipamentos que atualmente figuram como uma das alternativas no sistema elétrico nacional utilizadas para otimizar o fluxo de potência entre subsistemas através do direcionamento do fluxo de potência em linhas de transmissão da região de interesse. A sua função básica é alterar o ângulo de fase entre a tensão de entrada e a tensão de saída de uma linha de transmissão, permitindo assim controlar a potência ativa que flui pela linha.

Durante os estudos de expansão do sistema de transmissão da região do Alto Paranaíba localizada no estado de Minas Gerais, a EPE analisou alternativas para o crescimento da carga e a previsão de entrada de novos consumidores na região no horizonte de curto prazo (2011/2012) considerando o abaixamento a partir da rede básica no 138kV.

A partir do diagnóstico levantado, a EPE analisou alternativas de expansão do sistema, considerando-se uma nova fonte de injeção a partir da Rede Básica, via nova subestação, ou através de inserção de reforços de Rede Básica

Fronteira em instalações existentes, para atendimento à região de Patrocínio/Patos de Minas a partir de 2014, bem como reforços via sistema de distribuição da CEMIG D, em 138 kV.

Foram analisadas 7 alternativas, as quais todas apresentaram do ponto de vista técnico desempenho satisfatório. Dentre elas a que melhor atenderia às necessidade em regime permanente, quanto em emergências bem como custos globais inferiores as demais alternativas, foi a que contemplava a instalação de um transformador defasador, conforme figura 1 [1].

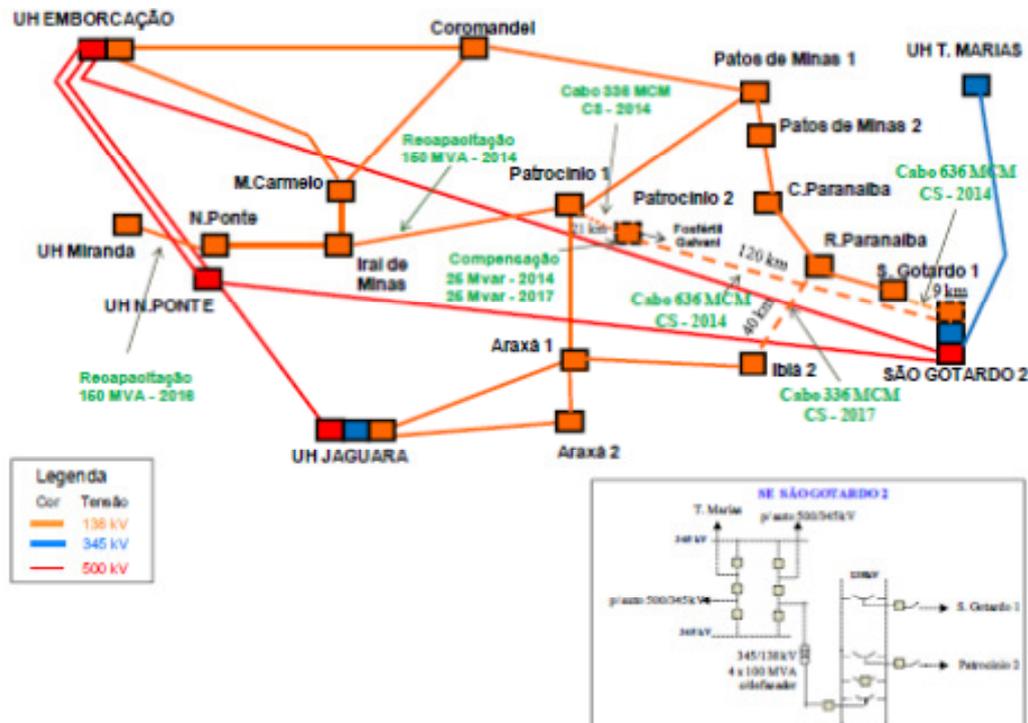


FIGURA 1 – SE São Gotardo 2 - Instalação da transformação 345/138 kV [1]

Em função desta necessidade a Aneel incluiu no leilão 05/2012 lote E a licitação para implantação deste empreendimento, no qual a Transmissora Aliança de Energia Elétrica foi vencedora. A Cemig GT foi responsável neste empreendimento pela Engenharia do Proprietário.

## 2.0 - REQUISITOS TÉCNICOS DISPONÍVEIS NA FASE DO LEILÃO

Durante a fase de leilão a Aneel, em seus editais, e o ONS, através dos procedimentos de rede estabelecem requisitos funcionais relativos à capacidade operativa.

No anexo 6E do leilão 05/2012 [2], estavam previstos os seguintes requisitos mínimos:

- Potência nominal trifásica de 300 MVA;
- Capacidade para suportar as sobrecargas do autotransformador em série 345/138-13,8 kV de potência trifásica de 300 MVA;
- Relação de tensão 138/138 kV;
- Faixa de variação  $\pm 20$  graus;
- Comutador sob carga com pelo menos  $\pm 16$  tapes com um tape central (total de 33 tapes). Cada variação de tape não deve provocar uma variação de tensão superior a 5% da tensão nominal;
- O valor da impedância entre o enrolamento primário do autotransformador em série 345/138-13,8 kV e o secundário do transformador defasador 138/138 kV deve ser no máximo de 14% na base nominal (300 MVA);
- O valor das perdas máximas deve ser igual ou inferior a 0,3% da potência nominal na operação primário-secundário;

Uma vez que este tipo de transformador não é usualmente aplicado no SIN o procedimento de rede, submódulo 2.3 Requisitos Mínimos para Transformadores e para Subestações e seus Equipamentos [3], ainda não prevê requisitos específicos para esta aplicação.

A ABNT NBR 5356 Transformadores de potência e respectivas partes, aplica-se a auto/transformadores trifásicos e monofásicos, excetuando-se transformadores especiais.

A transmissora, por sua vez, é responsável pela garantia de operação estabelecida pelo ONS bem com a realização da manutenção do equipamento durante toda a sua vida útil. Diante do exposto aumenta a responsabilidade da transmissora no estabelecimento de requisitos particulares a esta aplicação.

### 3.0 - TRANSFORMADOR DEFASADOR EM CONDIÇÕES DE CARGA – DIAGRAMA FASORIAL

Um transformador defasador em carga considerando a sua impedância interna, apresenta o diagrama fasorial mostrado na figura 2 [4].

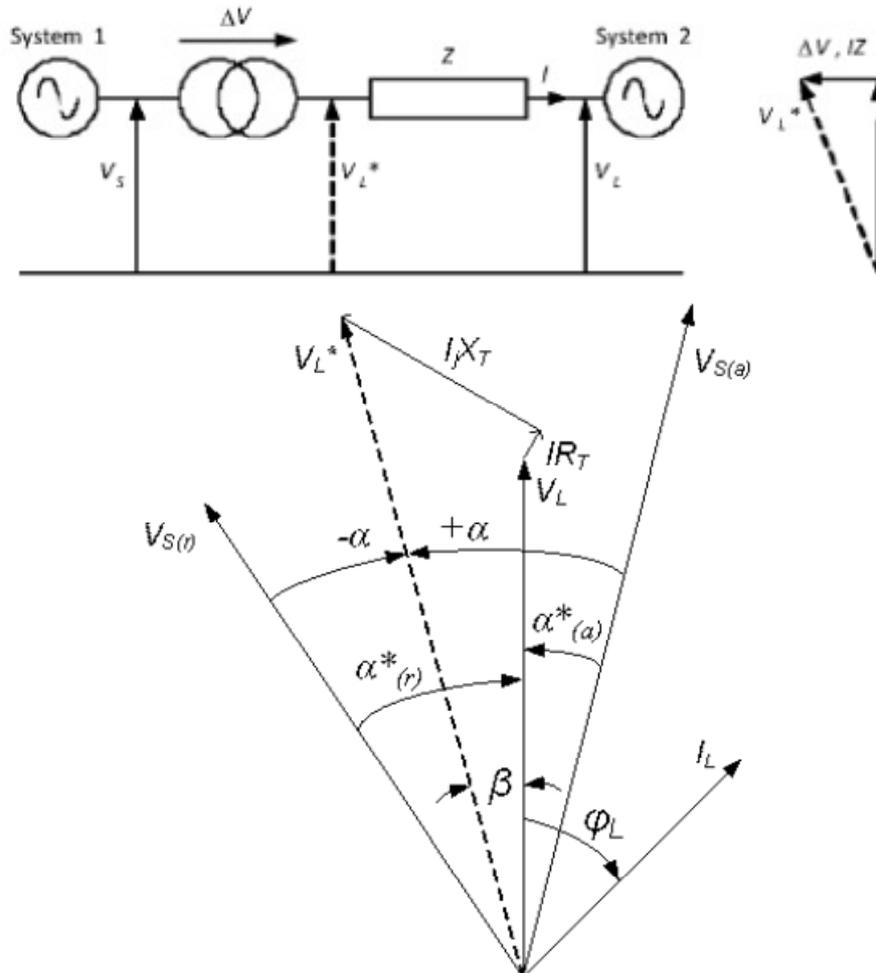


FIGURA 2 – Diagrama fasorial para operação sob carga [4]

Onde:

- $V_L^*$  é a tensão no lado da carga (a vazio)
- $V_L$  é a tensão no lado da carga (em carga)
- $V_{S(a)}$  é a tensão no lado da fonte (avanzado)
- $V_{S(r)}$  é a tensão no lado da fonte (atrasado)
- $I_L$  é a corrente de carga
- $\cos \varphi_L$  é o fator de potência da carga
- $Z_T$  é a impedância do transformador
- $\beta$  é o ângulo do transformador em carga
- $\alpha$  é o ângulo de defasamento
- + avançado
- atrasado

O transformador defasador adiciona  $\pm\alpha$  à tensão, ou seja:

$$V_S |_{\varphi_L} = V_S |_{\varphi_L \pm \alpha}$$

Para tanto, é necessário que o transformador defasador forneça o deslocamento:

$$\alpha_{(a)}^* = \alpha - \beta : \text{transformador defasador em carga com ângulo avançado}$$

$$\alpha_{(r)}^* = -(\alpha + \beta) : \text{transformador defasador em carga com ângulo atrasado}$$

Do diagrama apresentado, pode-se perceber a que variação da corrente da carga implica em variação de tensão no transformador defasador.

#### 4.0 - TIPOS DE TRANSFORMADORES DEFASADORES

O conceito básico para se obter um defasamento da tensão de saída em relação à tensão de entrada está em ligar os enrolamentos de forma adequada a obter o defasamento desejado.

Do ponto de vista de circuitos magnéticos, e da forma de apresentação da tensão da saída podemos classificar o transformador defasador em [5]:

- Direto – defasadores com um circuito magnético (um núcleo);
- Indireto – defasadores com dois circuitos magnéticos (dois núcleos);
- Assimétricos – defasadores que fornecem uma tensão de saída com um ângulo de fase e amplitude alterada em relação à tensão de entrada;
- Simétricos – defasadores que fornecem uma tensão de saída com um ângulo de fase alterado em relação à tensão de entrada, mas com a mesma amplitude.

##### 4.1.1. Defasadores com um circuito magnético (um núcleo)

Possuem um projeto menos complexo em relação ao indireto, uma vez que é necessário menor número de conexões dos enrolamentos (figuras 3, 4, 5 e 6), entretanto apresentam algumas desvantagens, tais como [4]:

- Necessidade do comutador sob carga e o enrolamento de tapes serem conectadas diretamente no enrolamento principal deixando-os diretamente expostos às sobretensões do sistema.
- A impedância de curto-circuito deste tipo construtivo é baixa em posições de tape próximas do ângulo de defasamento  $0^\circ$ , desta forma as correntes de curto-circuito podem ser muito altas, devendo levar-se em conta esta consideração na escolha dos comutadores e no cálculo das forças de curto-circuito nos enrolamentos.

A tensão por tape e corrente são determinados pelo ângulo requerido e dados nominais do defasador, e estes não podem ser ajustados com o objetivo de obter condições ótimas de chaveamento. Se um destes parâmetros excede seu limite, pode inviabilizar este tipo construtivo.

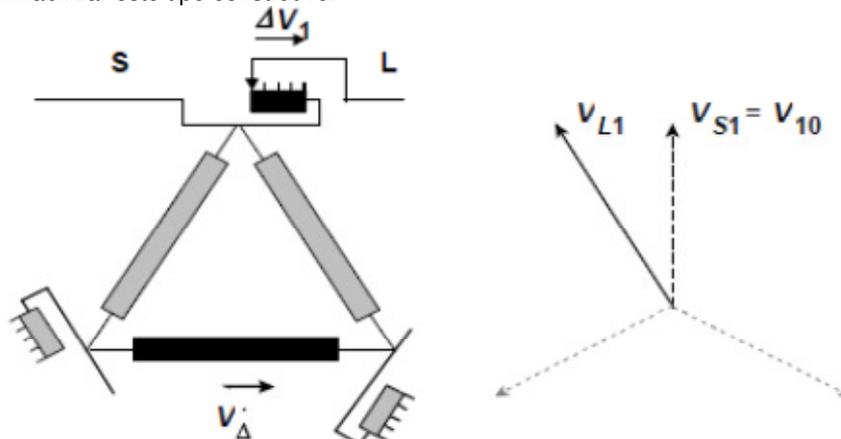


FIGURA 3 – Transformador defasador assimétrico direto [4]

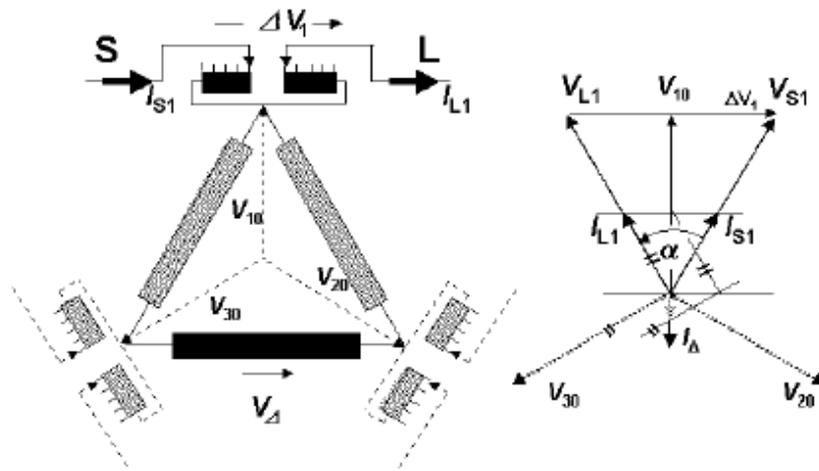


FIGURA 4 – Transformador defasador simétrico direto [4]

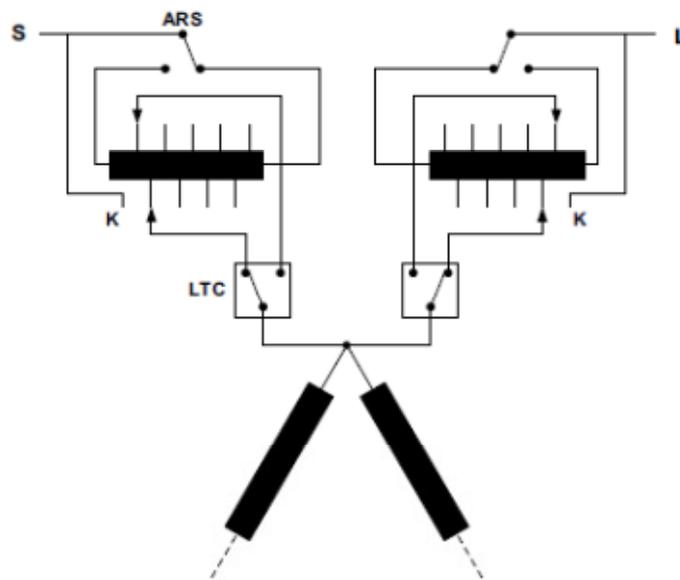


FIGURA 5 – Transformador defasador direto com comutador bifásico por fase [4]

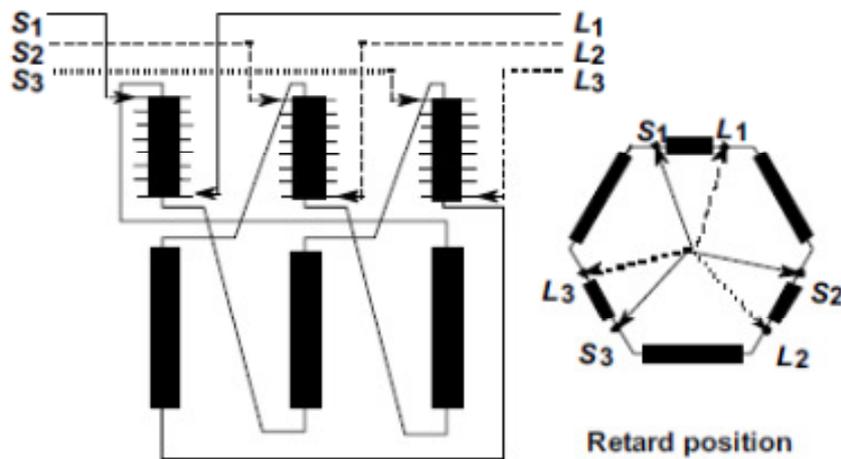


FIGURA 6 – Transformador defasador direto ligação hexagonal [4]

#### 4.1.2. Defasadores com dois circuitos magnéticos (dois núcleos)

Esta configuração consiste de um conjunto magnético série e um conjunto magnético de excitação (Figuras 7). Para menores potências e tensões pode ser construído em um único tanque, já para potências e tensões elevadas torna-se necessário a utilização de dois tanques.

A vantagem deste tipo construtivo é a flexibilidade na escolha do degrau de tensão e a corrente do enrolamento de tapes permitindo uma otimização do comutador sob carga. Esta vantagem é considerável uma vez que os limites de potência e ângulo de defasamento do transformador defasador são limitados pelo comutador sob carga. O nível de isolamento do comutador sob carga é independente da tensão do sistema permitindo níveis de isolamento reduzidos.

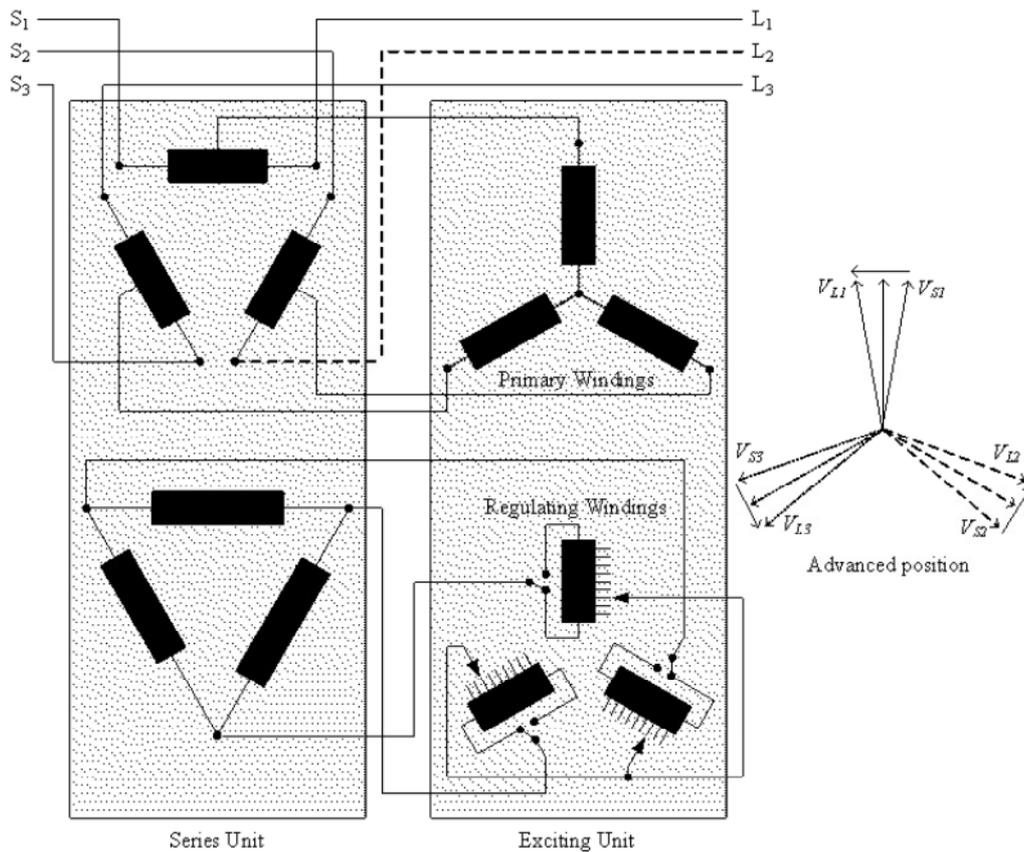


FIGURA 7 – Transformador defasador indireto simétrico [4]

#### 5.0 - REQUISITOS TÉCNICOS

Conforme exposto nos item acima, alguns requisitos são importantes na definição da especificação básica de um transformador defasador, tais como:

- Tipo do transformador defasador;  
Diante do exposto nos itens 4.1.1 e 4.1.2 a definição do tipo do transformador defasador envolve além das limitações do comutador, questões que estão associadas aos requisitos de desempenho e confiabilidade, tais como sobretensões e níveis de curto-circuito. Desta forma apesar dos limitantes construtivos, a transmissora deve indicar, caso seja desejável, o tipo indireto, com um ou dois tanques. Deve ser levado em consideração que a utilização de dois tanques está na maioria vezes associada a limitações de transporte.
- Configuração da solução;  
Uma vez que conforme o tipo de ligação do comutador do transformador está associado ao fornecimento de uma tensão de saída com um ângulo de fase e amplitude alterada em relação à tensão de entrada, torna-se importante a definição configuração da solução a ser adotada. Em muitos casos o transformador defasador está conectado em série com um transformador regulador, e precisa realizar o controle de fluxo de potência nos dois sentidos, gerando implicações na definição do tipo do defasador, ou seja, assimétrico ou simétrico.

- Potência passante, ângulo de defasamento e suportabilidade a curto circuito;  
É importante a definição da potência passante e os limites máximo e mínimo do ângulo de defasamento, bem como a suportabilidade a curto circuito uma vez que estes dados são determinantes para a definição dos comutadores sob carga bem como no projeto da parte ativa (tipo direto ou indireto). Caso não previamente estabelecido pela transmissora, são determinantes para a escolha do tipo do defasador por parte do fabricante.
- Nível de ruído;  
O nível máximo de ruído aceitável precisam ser definidas uma vez que estes dados são determinantes para o dimensionamento do núcleo do equipamento.
- Tensões transferidas entre as unidades;  
A avaliação das tensões transferidas entre as unidades requer especial atenção sendo importante a solicitação na especificação de uma revisão do projeto (*design review*) para avaliação.
- Impedâncias, perdas em vazio e em carga;  
Considerando que a impedância, perdas em vazio e em carga variam conforme o ângulo de defasamento, a correlação entre estes dados e o ângulo de defasamento precisam ser definidos levando em consideração na definição dos valores solicitados.
- Sobrecarga e sobretensões;  
As sobrecargas e sobretensões impactam no sistema de refrigeração. Sobrecargas impactam no dimensionamento dos enrolamentos e sobretensões no dimensionamento dos núcleos.

## 6.0 - TRANSFORMADOR DEFASADOR SE SÃO GOTARDO 2

O transformador defasador aplicado na SE São Gotardo foi implementado conforme a configuração mostrada na figura 8.

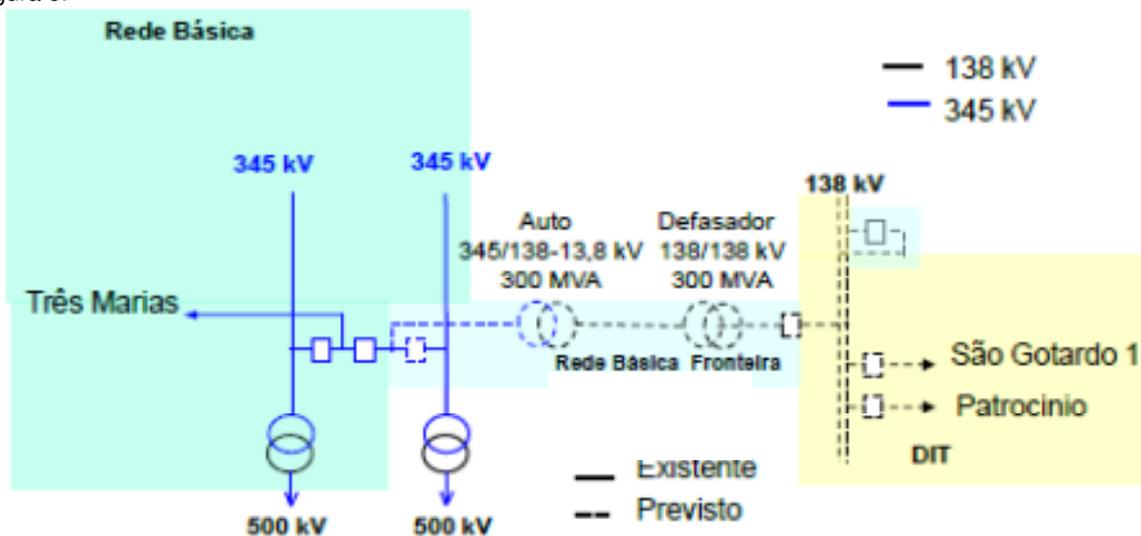


FIGURA 8 – SE São Gotardo 2 – configuração do transformador defasador

Um autotransformador abaixador com comutador sobre carga regulando a tensão no 138kV e em série o transformador defasador, tipo indireto assimétrico. Neste caso houve a necessidade de implementação de um controle automático de tensão do barramento de saída. O fato de o transformador defasador ser assimétrico leva a necessidade de o autotransformador abaixador ajustar o módulo de tensão. Ou seja, quando há a necessidade de alterar o ângulo de fase através do transformador defasador, o autotransformador tem que alterar sua relação de transformação alterando a posição dos seus taps.

Dois requisitos estabelecidos no edital deste empreendimento merecem uma reavaliação da real necessidade de estabelecimento de limites em futuras aplicações do transformador defasador, sendo:

- Necessidade de limitação do valor máximo de impedância do conjunto transformador defasador e autotransformador em 14% o que pode tornar críticas as condições para o projeto das máquinas.
- Necessidade de previsão de sobrecarga conforme transformadores convencionais (1,2 pu durante 4 horas e 1,4 pu durante 30 minutos), uma vez que um dos objetivos transformador defasador é otimizar o fluxo de potência na linha.

## 7.0 - CONCLUSÃO

Transformadores defasadores podem ser especificados e construídos em diferentes formas, as quais apresentam vantagens e desvantagens, e precisam ser cuidadosamente definidas uma vez que impactam no desempenho e operação. Apesar de aparentemente possuir características de um transformador convencional, o transformador defasador apresenta particularidades que precisam ser definidas claramente na fase de leilão por parte do agente e na especificação detalhada pela transmissora.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ESTUDOS DE EXPANSÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO - Reforço Estrutural ao Sistema de Transmissão da Região do Alto Paranaíba – Minas Gerais - Relatório R1 - EPE-DEE-RE-004/2011-r0 - Janeiro de 2011.
- (2) ANEXO 6E - LOTE E - SE SÃO GOTARDO 2 - 345/138 KV – Características e Requisitos Técnicos Básicos das Instalações de Transmissão - EDITAL DE LEILÃO NO 05/2012-ANEEL – 2012.
- (3) Submódulo 2.3 - Requisitos mínimos para transformadores e para subestações e seus equipamentos – revisão 2.0 – Novembro de 2011.
- (4) IEC 62032 Ed.2, Guide for the Application, Specification, and Testing of Phase-Shifting Transformers (IEEE Std C57.135), Junho de 2012.
- (5) VERBOOMEN, J., HERTEM D.V., SCHAVEMAKER P.H., KLING, BELMANS, R., “Phase Shifting Transformer: Principles and Applications”, Proceedings of International Conference on Future Power Systems, Amsterdam, The Netherland, 16-18 November, 2005.

## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

janaina.costa@cemig.com.br

Janaina Gomes da Costa, natural de Belo Horizonte - MG, é Engenheira de Projetos do Sistema de Transmissão, com mestrado em Engenharia Elétrica pela PUC-MG (2003) e graduação em Engenharia Elétrica pela PUC-MG (2000). Atua na gerência de Expansão da Transmissão da Cemig GT.

adina@cemig.com.br

Adinã Martins Pena, natural de João Monlevade – MG é Engenheiro de Planejamento Elétrico, com pós-graduação na UFSC (2007) e graduação na PUC Minas em Engenharia Elétrica (1999). Atua na CEMIG GT, Companhia Energética de Minas Gerais – Geração e Transmissão, desde 1987 e na Gerência de Planejamento Elétrico, desde 2004.