



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

**DESAFIOS NA SUBSTITUIÇÃO DE REATORES EM DERIVAÇÃO EM FINAL DE VIDA ÚTIL NO SISTEMA 500
KV - CHESF**

**SANTHIAGO GUEDES MONTENEGRO(1);CINTHIA SOUZA DOS SANTOS XAVIER (1)
COMPANHIA HIDRO ELETRICA DO SAO FRANCISCO (1)**

RESUMO

O presente artigo tem como objetivo mostrar os desafios encontrados durante a substituição de reatores monofásicos não manobráveis em final de vida útil da Chesf no seu sistema de 500 kV. Reatores monofásicos de 33,3 Mvar e 50 Mvar em 500 kV, em operação há mais de 40 anos. Alguns requisitos emergentes da regulamentação do setor que trouxeram impactos na especificação são discutidos, como o requisito de sobrecarga por terminal de linha em vazio por 1 hora. Adiciona-se ainda a falha em ensaio de tipo da unidade protótipo, cadeia de eventos da pandemia do COVID19 como necessidade de acompanhamento remoto dos ensaios de um fornecimento.

PALAVRAS-CHAVE

1.0 INTRODUÇÃO

Reatores em derivação ou *shunt* são equipamentos ligados entre fase e terra para compensar o efeito de correntes capacitivas nos sistemas de transmissão. São equipamentos de controle de tensão empregados para compensar efeitos capacitivos de linhas longas com tensão elevada.

Os reatores shunt apresentam similaridades com transformadores de potência em aspectos construtivos, emprega alguns componentes e acessórios iguais, além de, de modo geral, empregar os mesmos materiais, com algumas poucas exceções. Porém o funcionamento do equipamento durante a sua vida útil faz com que alguns aspectos necessitem de maior destaque, assim como ensaios não empregados em transformadores sejam necessários.

Um exemplo disso é o ensaio de vibração. Devido à característica do equipamento, a vibração mecânica da parte ativa é uma característica importante a ser checada durante o Design Review e ensaios finais, evitando falhas do equipamento por fadiga mecânica de acessórios presos ao tanque ou rompimento de cordões de solda, por exemplo. A temperatura do equipamento varia apenas com as condições ambientais e tensão do sistema, portanto, poucas horas no dia o equipamento tem “carga leve” e assim, a temperatura deve ser bem avaliada durante as etapas de projeto e ensaios finais. Durante a fase de projeto, foram determinados através de modelos computacionais a posição esperada do *hot-spot* para inserção dos sensores de fibras ópticas no enrolamento dos equipamentos protótipos. Foram inseridas 6 fibras ópticas para os ensaios de elevação de temperatura e elevação de temperatura em sobrecarga por 1 hora.

Alguns requisitos emergentes da regulamentação do setor que trouxeram impactos na especificação são discutidos, como o requisito de sobrecarga por terminal de linha em vazio por 1 hora. Embora o requisito não apresente detalhes mais específicos além da sobretensão e duração, é apresentado como essa característica do procedimento de rede foi traduzido em requisito da especificação do equipamento.

Adiciona-se ainda a falha em ensaio de tipo da unidade protótipo de um dos fornecimentos com atrasos provocados pela cadeia de eventos da pandemia do COVID-19 e necessidade de acompanhamento remoto dos ensaios de protótipo de um fornecimento. Reatores em derivação desempenham importante função para a transmissão de energia, em especial, quando são envolvidas tensões mais elevadas e linhas mais longas. Os reatores em derivação atuam para anular o efeito da reatância capacitância natural das linhas de transmissão.

A Chesf iniciou sua atuação com a geração no complexo de Paulo Afonso, na Bahia, transmitindo essa energia para as principais cidades do Nordeste. Com o advento da transmissão em 500 kV, o bloco de energia transmitida pôde ser ampliado, porém com a necessidade de controle de tensão nos terminais de linhas longas. A partir daí o emprego de reatores em derivação foi mais vastamente ampliado no sistema Chesf. Esses reatores, que entraram em operação entre meados dos anos 70 e início dos anos 80, eram em sua maioria *shell-form*, muitos dos quais ainda se encontram em operação em final de vida útil.

A substituição de reatores monofásicos 500 kV – 33,33 Mvar e 50 Mvar foi requerida em dois processos distintos. A retirada de operação das unidades existentes em final de vida útil em um dos casos, no terminal de linha da Subestação Recife II e no outro caso, na subestação de seccionadora da usina de Luiz Gonzaga terminais de linha 500 kV para as Subestações de Juazeiro da Bahia III e Sobradinho.

Na fase de planejamento da compra dos reatores da SE Recife II, reatores monofásicos de 33,33 Mvar em 500 kV, foi concebido o conceito de que os reatores novos deveriam ser tanto quanto possível, idênticos aos existentes, de modo a causar o mínimo de adaptações necessárias na subestação, fossem obras civis, adaptações eletromecânicas ou de natureza elétrica. O termo de referência de compra desses equipamentos trazia esse requisito, incluindo as dimensões físicas do equipamento existente.

Já para o caso do fornecimento dos equipamentos para a SE Luiz Gonzaga e SE Sobradinho, o fornecedor teve mais liberdade no projeto do equipamento, sendo a especificação técnica apenas de requisitos de desempenho, padrão habitual da Chesf em sua estratégia de *procurement* de equipamentos.

Um dos processos foi realizado via pregão eletrônico e outro por ata de registro de preços, onde dois fornecedores tradicionais no mercado nacional de equipamentos de grande porte foram os vencedores.

2.0 DESAFIOS PARA SUBSTITUIÇÃO DOS REATORES DE LINHA DAS SUBESTAÇÕES RECIFE II E SOBRADINHO

A instalação de novos reatores em substituição a outros equipamentos de outra época, com característica semelhantes, mas construtivamente bem diferentes é por si, um desafio. Novas construções de expansão da subestação permitem que todas as características do projeto executivo da obra sejam pensadas levando em consideração o equipamento a ser instalado. Substituições precisam remover de operação e rapidamente recompor o sistema, o que nem sempre, permite grandes obras. O que de fato ajuda é que os equipamentos substituídos são, via de regra, mais leves e menores que os substituídos.

2.1 Especificação técnica e requisitos

A especificação de equipamentos como transformadores e reatores envolve comunicar com precisão ao fornecedor qual o produto que se espera receber dele [1]. Sendo esse o tipo de equipamento de alto valor agregado, os requisitos tanto quanto possível, devem refletir as necessidades da concessionária. A regulação do setor, normas pertinentes, as experiências da concessionária, as necessidades de operação e facilidades para manutenção e outros fatores influem diretamente em requisitos objetivos.

A Chesf realizou uma reformulação em sua especificação padrão de reatores em derivação em 2019.

O requisito de linearidade, antes de 1,5 pu da tensão máxima operativa com reatância saturada não inferior a 50%, em função da evolução do sistema elétrico, pôde ser reduzida para 1,3 pu para linearidade e 40% para reatância saturada.

O requisito de elevação de temperatura que era de 55 K, passou para 65 K, considerando como novo requisito o percentual mínimo de teor de nitrogênio. A expectativa de vida útil de 36 anos foi incluída como requisito, considerando a temperatura ambiente média de 30 °C, incluindo um radiador como reserva quente. Além disso, solicita-se que os reatores suportem a sobrecarga de 1 hora sem exceder o limite de temperatura de 65 K.

Além dos aspectos da regulação vigente, a Chesf incluiu nas especificações técnicas de seus reatores alguns aspectos ligados a ganho de confiabilidade de seus equipamentos, que apesar de apresentarem um incremento no custo inicial do equipamento redunda em diminuição de indisponibilidades e menor taxa de falha. Esses aspectos são:

- Limite de vibração pico-a-pico de 60 μm na média e 100 μm no ponto de maior vibração, com medição a quente;
- Exigência de NBI das buchas uma classe de tensão acima do NBI do enrolamento;
- Padronização das bases do equipamento;
- Exigência de um radiador reserva instalado no equipamento.

Porém, a especificação também precisa ser adequada à estratégia adotada pela companhia na substituição. Alguns aspectos do equipamento existente foram mantidos, outros atualizados.

2.2 Sobrecarga

A atualização da especificação para atender aos procedimentos de rede existentes, no entanto, apresentou uma questão a ser resolvida. Com a revisão do módulo 2.3 dos procedimentos de rede do ONS, ficou estabelecido no item 7.5.2 que:

“Equipamentos localizados nos terminais de uma LT que possam ficar energizados após a manobra da LT, tais como reatores de linha, disjuntores, seccionadores, transformadores de potencial, devem suportar, no terminal em vazio, por uma hora as sobretensões à frequência industrial estabelecidas na tabela 2.”

Tensão nominal de operação	Máxima tensão sustentada fase-fase, eficaz, por 1 hora, em terminais de LT a vazio	
(kV)	(kV fase-fase eficaz)	(pu) ⁽¹⁾
138	152	1,10
230	253	1,10
345	398	1,15
440	506	1,15
500	600	1,20
525	600	1,15
765	800	1,046

Fonte: ONS (2017)

Os reatores por sua vez, não apenas enfrentam problemas de suportabilidade dielétrica ao serem submetidos a uma sobretensão. A sobretensão deve ser vista como uma sobrecarga para o equipamento. Tendo em vista que os reatores devem ser dimensionados do ponto de vista das temperaturas máximas possíveis de serem atingidas para a tensão máxima operativa, isso significaria que do ponto de vista de temperaturas, os reatores do sistema 500 kV deveria ser dimensionado para uma tensão de 550 kV e portanto, a sobrecarga seria da ordem de 1,21 pu por 1 hora, dado que:

$$Q_{rmax} = \left(\frac{U_{sobrecarga}}{U_{nominal}} \right)^2 Q_{nominal}$$

Por exemplo, um reator com tensão nominal 500 kV, potência reativa monofásica de 33,33 Mvar operará por uma hora com 48 Mvar ou ainda, um reator de 50 Mvar de potência monofásica na tensão de 500 kV operará com 72 Mvar por uma hora.

Dessa forma, considerando ainda que o procedimento de rede não limita a frequência que essa sobrecarga pode vir a ocorrer (a exemplo da sobrecarga em transformadores da rede básica), a Chesf entendeu que o mais sensato era incluir esse perfil de sobrecarga na especificação do equipamento restringindo a temperatura limite a ser atingida no ponto mais quente à classe de temperatura do isolamento do enrolamento. Em outras palavras, para o material termo-estabilizado, a elevação de temperatura foi limitada a 80 K após 1 hora de sobrecarga.

Os resultados apresentados nas tabelas abaixo mostram os resultados obtidos para os ensaios de elevação de temperatura à potência nominal e em regime de sobrecarga.

2.3 Expectativa de vida útil

A regulamentação do setor elétrico requer que a expectativa de vida útil do reator seja superior a 36 anos. Para o reator esse item é crítico. Um dos fornecimentos apresentou problemas no atendimento a esse requisito. De fato, o ensaio de elevação de temperatura precisou ser repetido com a adição de um radiador extra.

O equipamento foi fornecido conforme os requisitos da NBR-5356-7 no que tange à expectativa de vida útil. Considerando o final de vida útil o GP 200 (17,12 anos a 110°C), para o papel termoestabilizado, e a taxa de envelhecimento relativo de:

$$V = e^{\left(\frac{15000}{110+273} - \frac{15000}{\theta_h+27} \right)}$$

Calcula-se o valor de temperatura absoluta do ponto mais quente a 30°C (média anual considerada), de modo que V seja aproximadamente 0,47. Portanto, para atendimento ao requisito, a elevação do ponto mais quente não pode ultrapassar 72,8 K.

2.4 Vibração

Reatores em derivação tem como uma de suas características peculiares em relação aos transformadores níveis de vibração mais altos. Essa vibração, se não for adequadamente limitada, pode resultar em danos a acessórios presos ao equipamento, rompimento de soldas do tanque, envelhecimento prematuro do equipamento etc. Núcleo rígido, montagem do enrolamento com frequência de ressonância alta e verificação das condições de trabalho são imprescindíveis [4]

A NBR 5356-6 traz o ensaio de vibração como ensaio de rotina, recomenda a sua realização na temperatura de operação, embora abra a possibilidade de sua execução a frio. Esse requisito foi questionado durante a revisão das especificações, mas a experiência da Chesf com essa medição mostra que o ensaio a frio não reproduz as mesmas condições e portanto, resultados, que as medições feitas a temperatura de operação.

Para o reator de 60 Mvar, durante a inspeção a quente foi identificado um problema no atendimento ao limite de vibração a quente. O ensaio a frio não identificou o problema.

A investigação do problema rejeitou as hipóteses iniciais aperto inadequado da parte ativa e fluxo magnético disperso alto, indicando, porém, que a ressonância do tanque estava muito próxima do dobro da frequência fundamental da rede (120 Hz), uma vez que o fenômeno da magnetostrição ocorre nessa faixa de frequência.

A solução apresentada pelo fabricante foi adicionar reforços ao tanque de modo a mudar a frequência de ressonância do tanque. Após o retrabalho dos tanques dos equipamentos, a unidade protótipo foi reapresentada para ensaios, dessa vez com acompanhamento realizado remotamente. As medições apresentaram resultados satisfatórios até onde foi possível inspecionar remotamente.

2.5 Elevação de temperatura

O equipamento de 40 Mvar apresentou problema no ensaio de elevação de temperatura no quesito expectativa de vida útil. Para o projeto do equipamento foi realizado o projeto térmico através de *Computer Fluid Dynamics* (CFD), onde foi determinado os locais de aplicação dos sensores ópticos para a unidade protótipo, além do fator de ponto mais quente e temperaturas esperadas. O ensaio foi realizado na maneira tradicional, através da medição da resistência a quente e acompanhado em paralelo as leituras dos sensores ópticos e temperatura ambiente.

O resultado obtido pela medição com os sensores ópticos aprovava o ensaio, mas o resultado determinado pela resistência a quente indicou elevação de temperatura do ponto mais quente de 78,8 K, portanto, considerando a temperatura média ambiente de 30 °C, a expectativa de vida útil foi de 19,4 anos, inferior aos 36 anos regulatórios. Portanto, o projeto do equipamento foi reprovado,

embora a elevação do ponto mais quente estivesse dentro do permitido para o material termo-estabilizado, cujo limite por norma é 80 K.

Foi adicionado um radiador ao conjunto existente e realizado o ensaio novamente. Os resultados dessa feita foram satisfatórios, com elevação de temperatura do ponto mais quente de 71,5 K e expectativa de vida útil de 41,8 anos.

2.6 Inspeção remota de equipamentos

Uma das dificuldades encontradas foi a dificuldade de inspeções presenciais durante o ano de 2020 e parte do ano de 2021. A inspeção da unidade protótipo precisaram ser realizadas da maneira remota, através de aplicativos de reuniões e câmeras portáteis. Todos os ensaios de tipo e rotina foram realizados nessa modalidade. Algumas impressões dignas de nota sobre a experiência dos ensaios remotos:

- I. Os ensaios transcorrem naturalmente em um ritmo mais lento ou o inspetor não pode ter acesso a todas as informações que teria in-loco;
- II. O inspetor apenas tem acesso ao que o operador do ensaio está disposto a mostrar.

Para a inspeção com acompanhamento remoto, o operador do ensaio recebeu um equipamento com microfone, fones de ouvido e câmera adaptados a um capacete.

Após algumas semanas da liberação, o fabricante manifestou seu desejo de troca dos radiadores do fornecimento em caráter preventivo. Segundo o fornecedor do reator, os radiadores tinham grande probabilidade de apresentar vazamento no campo.

Após a substituição dos radiadores originalmente aprovados pelo indicado pelo fabricante do equipamento, quatro unidades do equipamento foram convocadas para ensaios, duas delas apresentando vazamentos por trinca em soldas durante o ensaio de vibração a quente. Novamente, o modo de falha apresentado pelo fabricante foi a ressonância, dessa vez de algumas aletas do radiador com a frequência de vibração do equipamento. As investigações ainda se encaminham para conclusão durante a finalização deste artigo, sem solução definitiva e convincente apresentada pelo fornecedor. Os demais ensaios não apresentaram desvios, sendo esse o grande problema encontrado.

2.7 Intercambialidade – Dimensional e montagem

Reatores de potência monofásicos 50 Mvar em 550/V3 kV de fabricação Mitsubishi ou similar

Os reatores foram adquiridos em modalidade de Registro de preços para instalação em conexão de linha ou de barra em instalações específicas e reserva, a depender da necessidade no período de validade da Ata de registro de preços.

Nos documentos da contratação estão definidos o tamanho dos bays onde serão instalados, porém sem utilização de rodas, com estruturas de suporte em vigas para operar apoiado sob duas vigas de concreto, todas as informações da base e fundações civis instaladas foram disponibilizadas para adaptação pelo fornecedor, embora, as adaptações de conexão aos barramentos não estão previstas em contrato, sendo de responsabilidade da Chesf.

O projeto do equipamento de 60 Mvar foi alvo de uma estratégia onde o fornecedor teve mais liberdade para propor dimensões, ficando a seu encargo, as adaptações necessárias em campo.

Reatores de potência monofásicos 33,33 Mvar em 550/V3 kV de fabricação Mitsubishi ou similar

Os reatores foram adquiridos para aplicação específica em conexão de linha ou de barra.

Nos documentos da contratação estão definidos o tamanho dos bays onde serão instalados, no entanto, diferentemente do processo de Registro de preços anterior, foi requerida a condição de montagem sob o sistema de bases e rodas do equipamento antigo, assim como as conexões aos barramentos idênticas às das unidades existentes, tipo plug and play aonde aplicável. De forma que, a altura das buchas manteve altura semelhante ao equipamento antigo, bem como localização do painel de controle.

Para esse processo todas as adaptações de conexão e suas adaptações são de responsabilidade do fornecedor.

Até o fechamento desse artigo os reatores não haviam sido instalados. Na oportunidade de apresentação do trabalho será possível mostrar quais requisitos de contratação foram mais viáveis do ponto de vista operacional e econômico dentro do cronograma de substituição das unidades, gerando definições futuras mais assertivas

3.0 Conclusões

A substituição de equipamentos em final de vida útil em transmissoras mais tradicionais no sistema elétrico nacional ganha relevância, dado o grande número de equipamentos instalados no final dos anos 70 e anos 80 ainda em operação no sistema elétrico nacional.

À transmissora cabe estudar qual será a maneira que mais se adeque ao seu perfil para escolher como deve ser feita as substituições. Retrofits completos, envolvendo troca de sistemas de comando e controle, grandes adaptações em obras civis e barramentos de subestações podem ser a maneira mais assertiva de fazer essas substituições, porém a contratação dessa maneira é um processo mais moroso, requer grande esforço na composição de processos de contratação, além de maior tempo de indisponibilidade do ativo a ser substituído para o sistema. Substituições onde se contrate apenas a troca do equipamento pode levar a problemas na adaptação de equipamentos novos, com regras de projetos mais enxutas em locais onde antes operavam dimensionalmente maiores.

Ambos os fornecimentos foram feitos por fornecedores tradicionais do mercado de equipamentos elétricos.

Cada fabricante apresentou uma dificuldade específica. Enquanto um dos fornecedores apresentou problemas sérios para atendimento aos requisitos de vibração e foi bastante assertivo em seu modelo térmico, ou outro fornecedor apresentou-se muito bem adaptado ao requisito de vibração, obtendo valor máximo de vibração pico-a-pico na ordem de 20 μm e média na ordem de 10 μm , porém com problemas relativos ao seu modelo térmico.

Um dos fornecedores alegou que o baixo grau de vibração requerido fez com que seu modelo para cálculo não funcionasse adequadamente, devido ao grande número de reforços necessários no tanque.

Para o outro caso, não foi encontrada uma causa exata de os modelos térmicos terem predito temperaturas menores que as encontradas.

A pandemia acelerou o emprego em escala de ferramentas de conferência on-line nas empresas em geral e certamente trouxe algumas experiências em direção a tornar mais comum o uso dessas ferramentas para diminuir deslocamentos de representantes de clientes finais durante os ensaios de fábrica. Porém esse tipo de prática traz grande nebulosidade em caso de falhas.

4.0 Bibliografia

- [1] MONTENEGRO, S.G et al - **Atualização da especificação de transformadores de potência da Chesf: diretrizes seguidas e resultados obtidos**. XXIII SNPTEE, Foz do Iguaçu – PR, 2017
- [2] INHAS, J.; YAMAZAKI, L.E.; MENDES, J.C. – **Reatores derivação – Vibração em tanques relacionadas com ruído e solicitações mecânicas**. XX SNPTEE, Recife-PE, 2009
- [3] TAMEZ, G. et al. – **Vibration analysis of a shunt reactor**. Conference IEEE Mexico, 2010
- [4] SANTANA, R.F et al. Problemas de vibração e ruído em reatores de 60,5 Mvar – 550 kV /raiz(3), XIII SNPTEE, Florianópolis, 1995

DADOS BIOGRÁFICOS



Santhiago Guedes Montenegro - Se graduou em Engenharia Elétrica em 2006 pela Universidade Federal de Campina Grande e concluiu o mestrado em Engenharia de Produção em 2009 pela Universidade Federal da Paraíba. Em 2010 ingressou na Chesf na Divisão de Garantia de Qualidade do Material, atuando com o acompanhamento de ensaios de recebimento de equipamentos de alta tensão até 2014, quando mudou para o Departamento de Engenharia de Subestações, atuando principalmente com a especificação e aprovação de projetos de transformadores de potência e reatores derivação. É membro regular do CE A2 do Cigré desde 2015 e CE B3 desde 2019.

(2) CINTHIA SOUZA DOS SANTOS XAVIER
Cynthia Souza dos Santos Xavier – Graduada em Engenharia Elétrica – Eletrotécnica em 1995 pela Universidade Federal de Pernambuco, conclusão do mestrado em Sistemas de Potência em 2014 pela Universidade Federal de Campina Grande. Trabalhou na área corporativa de voz e dados da Telemar-OI, vindo a ingressar em 2003 na Chesf na área de projeto de Subestações elétricas e equipamentos elétricos, em especial transformadores de potência e reatores, atualmente trabalha no Departamento de Engenharia de Aplicação de Projetos, atuando em todas as etapas dos projetos executivos de subestações elétricas até implantação. Atualmente é membro regular do CE B3 e secretária.