

# Reator de Núcleo Saturado aplicado à Rede de distribuição de Média Tensão Autores

**Tema:** Redes de Distribuição

**Autores:** Gustavo Travassos Aguiar da Silva, José Antonio de Souza Brito, Moira Bastos Prates

**Co-Autores:** José Carlos de Oliveira, Paulo Henrique Oliveira Rezende, João Areis Ferreira Barbosa, Isaque Nogueira Gondim

**Empresa:** Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia - Neoenergia Coelba

---

## Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um Reator de Núcleo Saturado aplicado em redes de distribuição de média tensão, com o objetivo de mitigar problemas de qualidade da energia em clientes industriais.

O aumento gradual da complexidade da rede elétrica atualmente é evidente, principalmente com a modernização da rede e a inserção de fontes de geração distribuída. Para redes com longa extensão e baixa densidade de carga, a complexidade é ainda maior, uma vez que se nota maior ocorrência de variações de tensão que afetam clientes industriais. Eventos relacionados a sobretensões passaram a se tornar mais frequentes, o que motivou o desenvolvimento de reatores de núcleo saturado para redes de distribuição como alternativa para estabilizar instantaneamente a tensão entregue aos clientes. Este trabalho apresenta o estudo caso para aplicação do reator saturado, que abrange as simulações de transitórios eletromagnéticos para estimativa dos benefícios esperados, bem como o processo de desenvolvimento, construção e testes para validação do desempenho de um novo equipamento a ser aplicado em redes de distribuição. O alimentador é atendido por sistema de baixo nível de curto-circuito possui tensão nominal de 34,5kV e atende a clientes industriais, residenciais, irrigantes e acessantes com geração distribuída. A regulação de tensão desse sistema representa um grande desafio com a utilização dos recursos atualmente disponíveis no mercado o que motivou esse desenvolvimento por meio do programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da Neoenergia, regulado pela ANEEL.

## 1. Introdução

As redes distribuição de Energia Elétrica da Bahia passaram por diversas transformações ao longo do tempo, precisando se expandir para atender, principalmente, ao programa de universalização do acesso e uso da Energia Elétrica, o Luz Para Todos e, mais recentemente, integrando de forma acelerada as fontes de geração distribuída à rede. Com o passar do tempo, algumas redes da Neoenergia passaram a ter características peculiares com longa extensão e baixa densidade de clientes, trazendo alguns desafios adicionais para garantia da qualidade do produto através de investimentos prudentes que aplicam os critérios de menor custo global.

No estado da Bahia, destaca-se uma região que possui 4 alimentadores em nível de 34,5 kV que totalizam uma extensão de 5.583km em uma região distante da fonte, ou seja, com baixo nível de curto-circuito e que atende a aproximadamente 50 mil consumidores. O maior alimentador dessa rede possui 2.016 km, incluindo todas as suas derivações, e atende a um cliente industrial que possui processos de maior sensibilidade às variações de tensão de curta duração, conhecidas como VTCDs. Visando promover um melhor atendimento a seus clientes, a Neoenergia buscou alternativas para atenuar a intensidade dessas VTCDs e o desenvolvimento do reator de núcleo saturado (RNS) se apresentou como alternativa tecnicamente e economicamente viável.

As primeiras alternativas para aprimorar a regulação de tensão em uma determinada rede são a adição de capacitores shunt ou a adição de reguladores de tensão (DUGAN, 2004). No entanto, estas alternativas não são válidas para o caso. Os capacitores *shunt* não se aplicam devido às características capacitivas das redes de 34,5 kV. Os reguladores de tensão já se provaram ineficazes, uma vez que não suportam as elevadas tensões do alimentador devido a esse efeito capacitivo somado a contribuição da geração distribuída e ao efeito em cascata da conexão de reguladores em série.

Após uma vasta pesquisa sobre as possibilidades para regulação de tensão e, tendo em vista que os equipamentos reguladores de tensão convencionais aplicados não apresentaram bom desempenho e acabaram sendo danificados, consultas foram realizadas para diversos fornecedores nacionais e internacionais com o objetivo de encontrar alguma solução que fosse aplicável para o caso. Os reatores de núcleo saturado, embora já tenham sido utilizados em sistemas de transmissão compondo os primeiros compensadores estáticos aplicados a sistemas de potência, são equipamentos que não se encontram disponíveis para aplicação de forma distribuída em redes de 34,5kV. A Neoenergia Brasília, no ano de 2007 havia desenvolvido um protótipo de RNS, através de um projeto de P&D, que se mostrava como alternativa interessante para evitar efeitos de sobretensões transitórias sem prejudicar a regulação de tensão nos momentos de carga pesada. O equipamento se apresentou como melhor alternativa viável devido ao melhor custo benefício, simplicidade e robustez, o que levou a tomada de decisão de continuidade desse projeto visando a sua inserção ao mercado.

## 2. Desenvolvimento

### 2.1 Descrição do Problema

Utilizando a metodologia exposta em (DUGAN, 2004), é possível descrever detalhadamente cada etapa da avaliação de Qualidade da Energia Elétrica que propicia o melhor entendimento das questões existentes na rede deste estudo de caso. Os problemas de Qualidade de Energia Elétrica podem ter diversas causas, portanto diferentes soluções podem ser implementadas como forma de melhorar a qualidade. Apesar da gama de possibilidades, torna-se útil observar as etapas gerais associadas à investigação destes problemas. A Figura 2 apresenta, de maneira generalista, algumas etapas que se fazem frequentemente necessárias em uma análise de qualidade de energia (QEE).

## AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

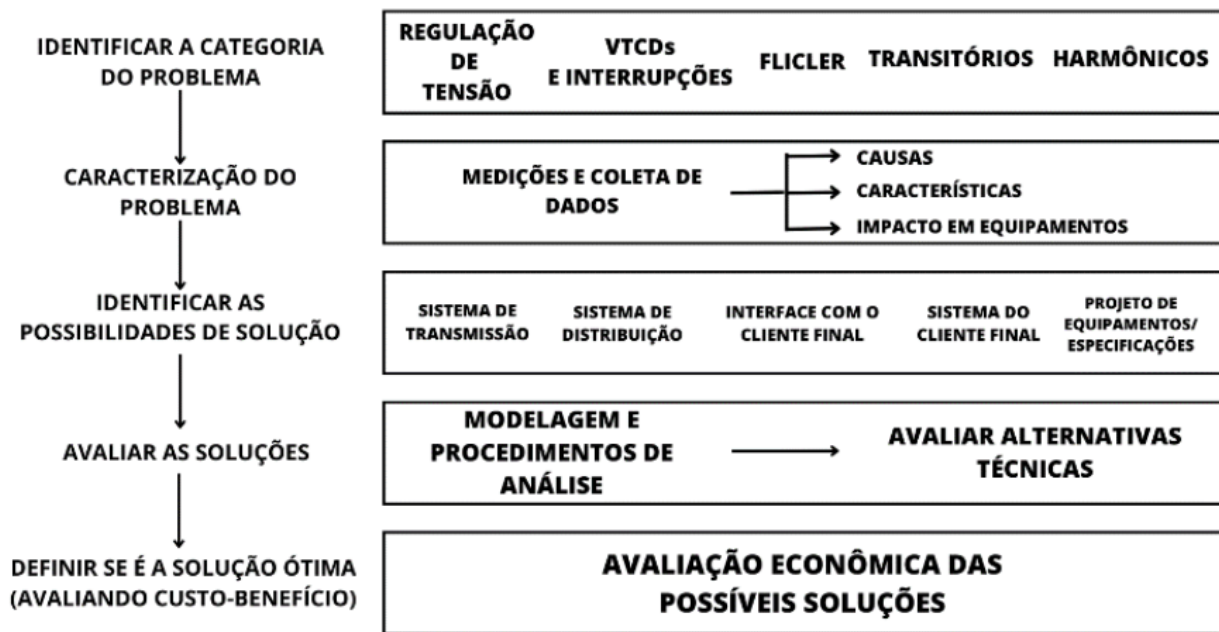


Figura 1 – Etapas básicas para realização de análise de Qualidade da Energia Elétrica.

O estágio inicial da análise consistiu na identificação da categoria do problema, que, conforme mencionado anteriormente, trata-se da dificuldade da regulação de tensão de um alimentador de distribuição exposto na Figura 3. A partir da reclamação de um cliente industrial localizando neste alimentador, foi possível caracterizar o problema através de medições e coleta de dados da rede. O principal distúrbio identificado através dos dados coletados foram elevações de tensão superiores a 20%, conforme apresentado na Figura 2, que acontecem após um afundamento de tensão. Estas grandes elevações de tensão impedem o cliente de retornar sua operação após o afundamento, fazendo com que este tenha interrupção de sua linha produtiva, causando diversos prejuízos, além de ter que operar por um longo período utilizando geradores próprios.

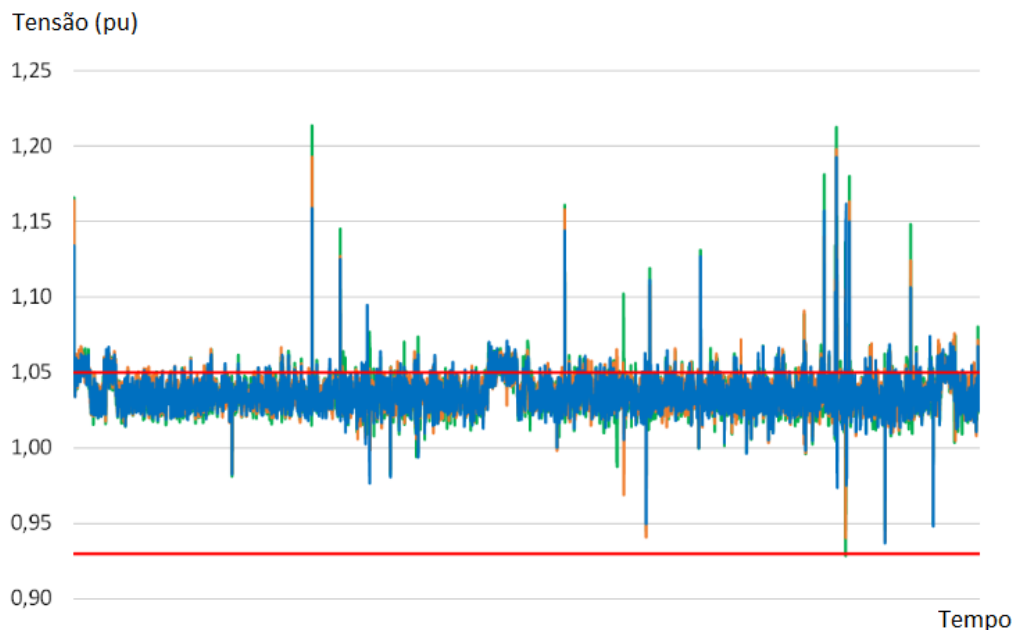


Figura 2 – Sobretensões observadas no ponto de conexão do cliente em um determinado período. Tendo em vista os resultados observado nas medições, fez-se necessário realizar um estudo mais profundo do problema enfrentado pelo cliente industrial e para isso, o primeiro passo adotado foi a modelagem da rede no *software* de transitórios eletromagnéticos, o *Alternative Transients Program* (ATP), para simulação de diversas condições operativas, possibilitando reproduzir o comportamento da rede de forma muito similar aos registros realizados através dos equipamentos de medição da distribuidora, evidenciadas na Figura/2. A partir disso, foram estudadas as possíveis alternativas para regulação de tensão na região.



Figura 3 – Alimentador onde o cliente industrial está localizado.

## 2.2 Princípio de Funcionamento do Reator de Núcleo Saturado

O Reator de Núcleo Saturado (RNS) é um dispositivo eletromagnético com características físicas e aspecto construtivo muito similares aos transformadores de potência (BARBOSA JÚNIOR, 2013), mas com características de funcionamento distintas, visto que o RNS possui a característica de trabalhar na zona não linear da curva de operação de equipamentos eletromagnéticos, como é observado na Figura 4. Através da curva de saturação, é possível observar que a corrente drenada pelo reator será muito pequena quando este não estiver operando na região linear, mas na região saturada a corrente irá aumentar muito sem que ocorram grandes incrementos na tensão (CHAVES, 2016). Esta pequena variação de tensão na região saturada é a característica que irá mitigar as sobretensões observadas pelo cliente. Dessa forma, o equipamento terá três possibilidades de operação:

- **Quando em condição de tensão nominal na barra:** O reator deverá operar na região linear da curva de saturação, implicando no consumo reduzido de corrente.
- **Quando em condição de sobretensão:** Reator entra em zona de saturação, ocasionando um aumento significativo no consumo de corrente e, conseqüentemente, redução da tensão para os níveis desejados.
- **Operando como Compensador Estático:** Se associado com capacitores, o RNS será capaz de compensar e atenuar a intensidade de possíveis afundamentos momentâneos de tensão.

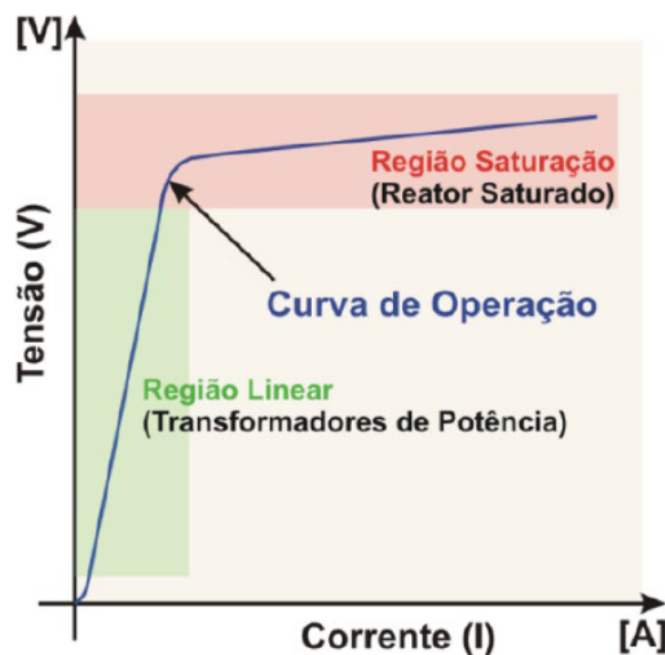


Figura 4 – Curva de Saturação e regiões de operação do material magnético do núcleo do RNS (BARBOSA JÚNIOR, 2013) .

Apesar dos benefícios para regulação de tensão, este equipamento pode ocasionar alguns efeitos indesejados, já que por ser uma carga não-linear, introduz harmônicos na rede (BARBOSA JÚNIOR, 2013). Para contornar este efeito, existem topologias de RNS estruturadas visando a atenuação de harmônicos. Neste caso, a topologia escolhida para o desenvolvimento do projeto foi a *twin-trippler*, cujo arranjo construtivo pode ser observado na Figura 5. Dessa forma, será possível garantir que os harmônicos introduzidos na rede por conta da solução serão atenuados.

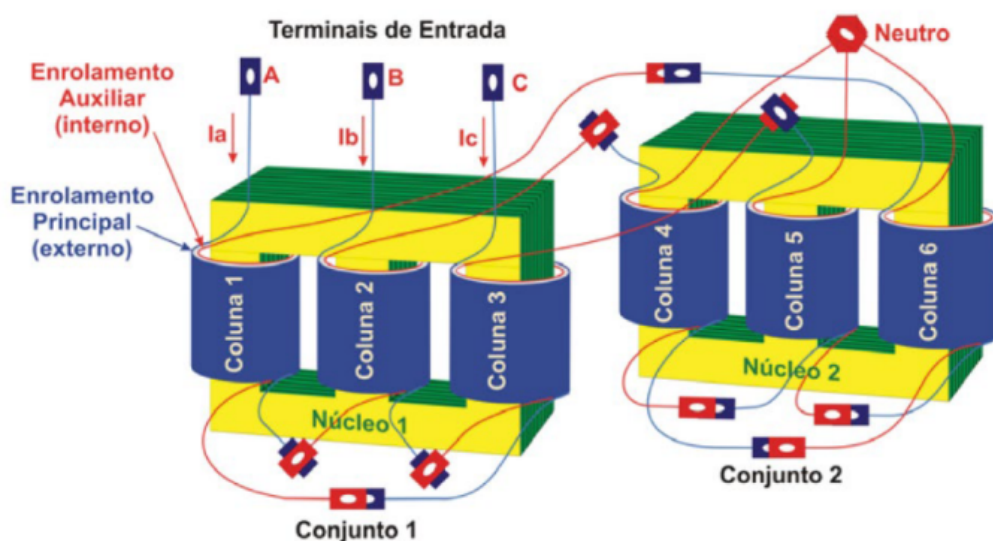


Figura 5 – Arranjo Construtivo twin-trippler.

As aplicações conhecidas dos Reatores de Núcleo Saturado (BLAKE, 1924) são, em sua maioria, realizadas para sistemas de transmissão. No entanto, entendeu-se que, para este caso, a utilização desta tecnologia no sistema de distribuição traria ganhos para a qualidade do fornecimento aos consumidores.

### 2.3 Prova de Conceito

Para validar o funcionamento do Reator de Núcleo Saturado na rede de distribuição e realizar a prova de conceito para o projeto, foram realizadas simulações computacionais. Os resultados destas simulações nas diferentes condições de carregamento demonstraram uma boa correlação com as medições, oferecendo assim as condições necessárias para a compreensão do comportamento da rede elétrica.

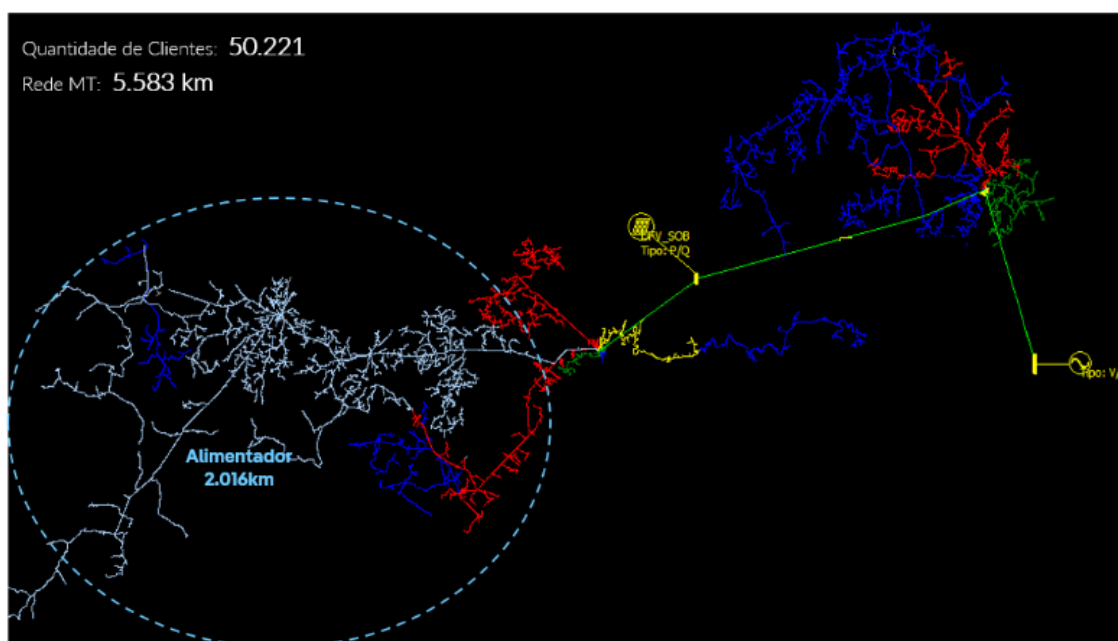


Figura 6 – Rede do Estudo de Caso .



Após a modelagem da rede, o RNS também foi modelado no ATP e a partir disso, simulações foram realizadas para entender como seria o comportamento do sistema sob ocorrências quando um ou mais Reatores de Núcleo Saturados fossem inseridos no alimentador de distribuição. Nas Figuras 7 e 8, é possível observar a diferença na forma de onda de tensão no alimentador quando este está sob ocorrência do chaveamento de um religador de rede.

- **Forma de onda durante chaveamento do religador quando a rede está sem Reatores de Núcleo Saturado alocados:**

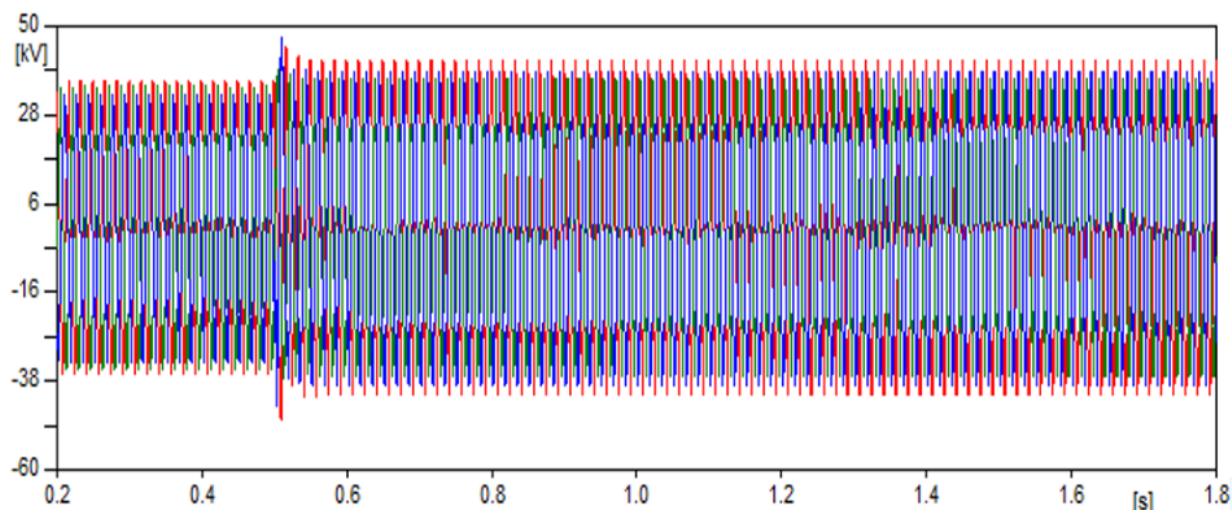


Figura 7 – Tensões no Cliente Industrial sem o reator (VTCD: 20%).

- **Forma de onda durante chaveamento do religador com Reatores de Núcleo Saturado, do tipo twin-trippler, foram alocados:**

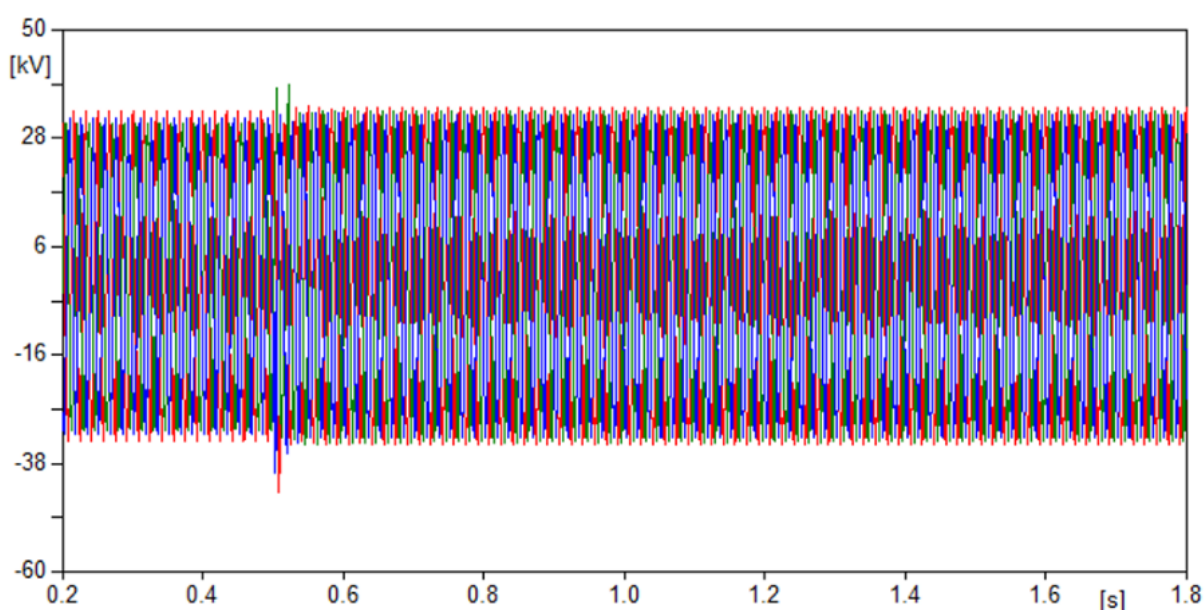


Figura 8 – Tensões no Cliente Industrial com o reator (sem VTCD).

Foi evidenciado que, o chaveamento deste religador ocasionaria uma sobretensão de 20%, já com os Reatores de Núcleo Saturado, a sobretensão é mitigada. A partir destas simulações e de muitas outras condições operacionais estudadas, observou-se que do ponto de vista de variações de tensão de curta duração, as sobretensões foram reduzidas significativamente.

#### 2.4 Projeto, Fabricação e Ensaios

Nesta etapa foram realizadas modelagens e implementações computacionais do Reator a Núcleo Saturado. Para a realização destas análises foi utilizado o método de elementos finitos (FEM – *Finite Element Method*). Este tipo de estudo é adequado para a concepção, otimização e análise de quaisquer dispositivos eletromagnéticos. De uma forma geral, a metodologia possui em três fases: pré-processamento (modelagem da geometria do dispositivo, definição das propriedades físicas, e confecção das malhas); processamento (resolução de problemas) e pós-processamento (análise dos resultados).

Como estratégia para a regulação das tensões no barramento do alimentador alvo do estudo, realizou-se a implementação de um RNS de 500 kVAr e 34,5 kV, no aplicativo de elementos finitos, o programa *Ansys Maxwell®*.

Dessa forma, as constantes elétricas, térmicas e magnéticas foram simuladas. O modelo simplificado do Reator de Núcleo Saturado por ser visto na Figura 9. Com este projeto, a fabricação do equipamento foi realizada (Figura 10), garantindo as especificações definidas. A primeira unidade de Reator de Núcleo Saturado projetada e confeccionada para o fornecimento de uma potência reativa de 500kVAr pode ser observado na Figura 11.

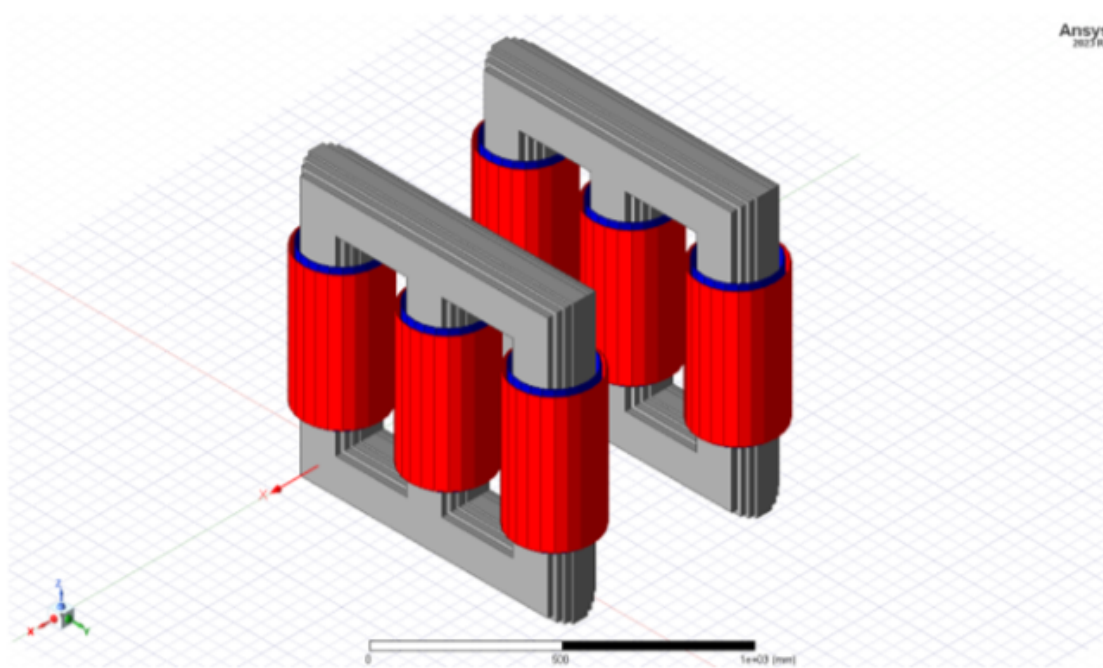


Figura 9 – Modelo Simplificado do RNS de 500kVA no ANSYS.



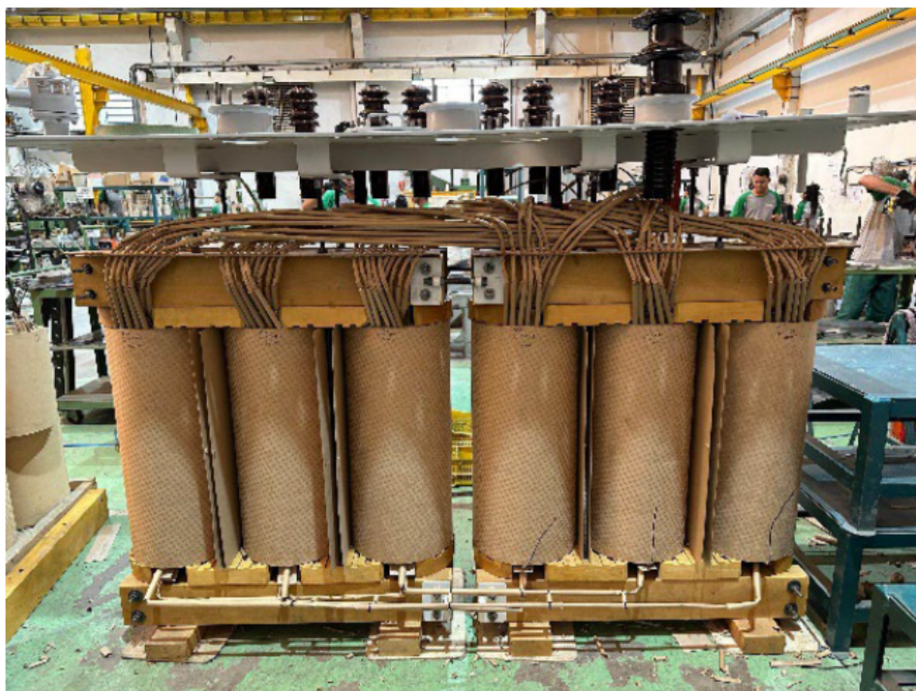


Figura 10 – Primeira unidade de RNS em processo de fabricação.



Figura 11 – Primeira unidade de RNS em fábrica.

#### 2.4.1 Ensaios Realizados

Após a fabricação da primeira unidade, foram realizados ensaios em laboratório para comprovação da eficácia do equipamento construído. A estrutura montada para a realização destes ensaios em fábrica pode ser observada no diagrama da Figura 12.

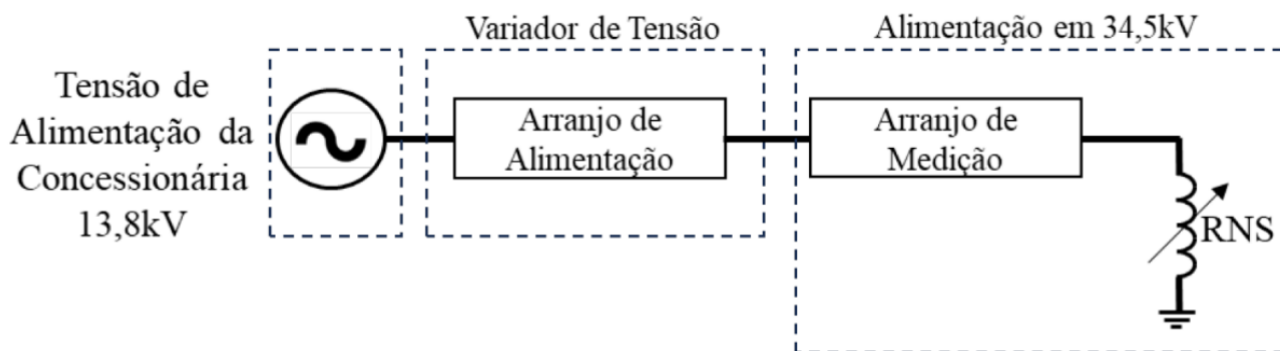


Figura 12 – Estrutura montada para realização de ensaios.

Com a estrutura de alimentação e medição (Figura 13) conectada a primeira unidade do Reator de Núcleo Saturado, o objetivo principal dos testes realizados foi implementar uma variação de tensão da alimentação e analisar o comportamento da potência reativa do equipamento. Dessa forma, seria possível determinar as regiões de saturação para cada um dos TAPs do RNS.



Figura 13 – Equipamentos de medição durante ensaios na TRael.

Para os ensaios realizados em cada um dos TAPs do equipamento, a tensão inicial foi definida para 25kV e durante um período de aproximadamente 6 minutos foram feitos incrementos até um valor máximo de 41kV. A Figura 14 apresenta o desempenho do Reator de Núcleo Saturado ao verificar a variação da potência reativa com relação a variação da tensão aplicada durante o ensaio. As características levantadas possibilitam a análise do comportamento do RNS e a definição de sua curva de saturação. Dessa forma, o processo foi repetido para os 5 TAPs do equipamento.

Para os ensaios realizados em cada um dos TAPs do equipamento, a tensão inicial foi definida para 25kV e durante um período de aproximadamente 6 minutos foram feitos incrementos até um valor máximo de 41kV. A Figura 14 apresenta o desempenho do Reator de Núcleo Saturado ao verificar a variação da potência reativa com relação a variação da tensão aplicada durante o ensaio. As características levantadas nos ensaios convergem com os resultados simulados no Ansys e no ATP. Portanto, espera-se que o compor-

tamento do RNS atenda as expectativas de resolução do problema existente e que o mesmo seja mais um equipamento disponível para melhoria da qualidade do produto.

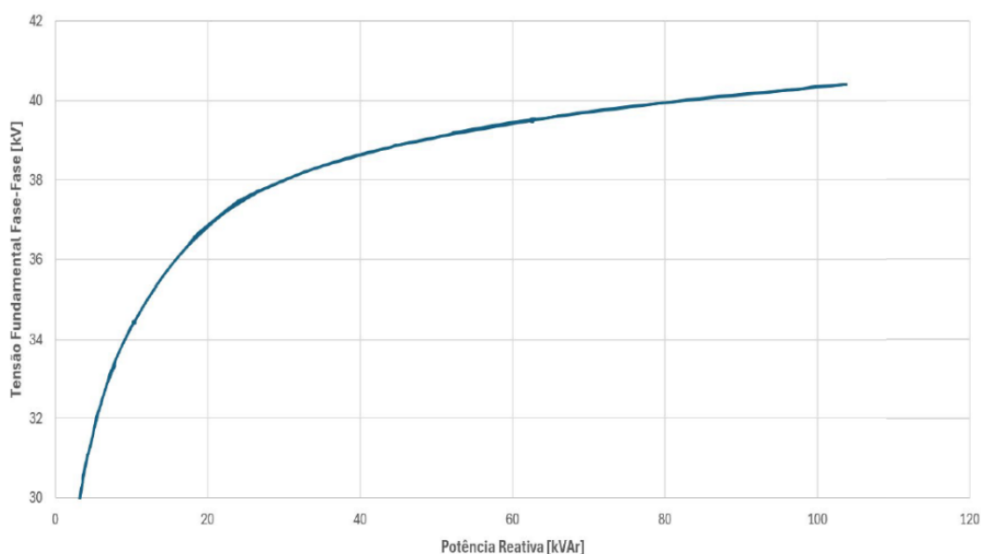


Figura 14 – Gráfico de Potência Reativa do RNS alimentado no TAP 1.

O padrão para instalação desse equipamento também foi desenvolvido para que o mesmo fique em uma bancada com 2 postes, viabilizando a sua instalação ao longo da rede de distribuição de forma similar à instalação dos postos de transformação já padronizados na Neonergia. A Figura 15 apresenta o desenho em escala do projeto para sua instalação em campo.

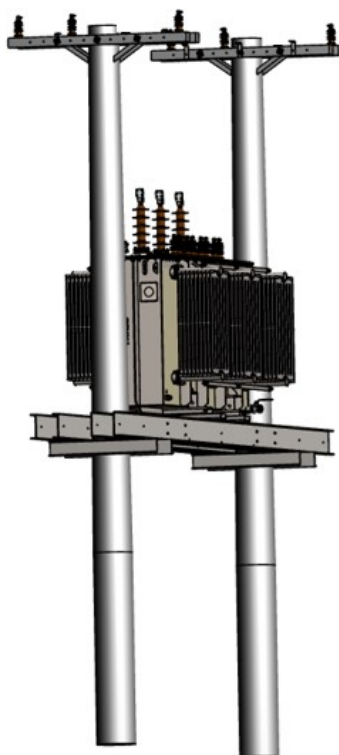


Figura 15 – Padrão construtivo para instalação do RNS.

### 3. Conclusão

A prova de conceito apresentada neste trabalho demonstra que a solução proposta trará benefícios a rede do estudo, uma vez que é capaz de mitigar as sobretensões que são objetivo de reclamação de clientes industriais da região. A partir da fabricação do equipamento e após as análises de todas as curvas levantadas durante os ensaios em laboratório, foi observado que o princípio operativo do RNS corresponde com as expectativas para limitação da sobretensão no alimentador e oferece um maior custo-benefício com relação a injeção de harmônicos na rede, se comparado com outras possíveis topologias de Reatores de Núcleo Saturado.

A partir da confecção da primeira unidade de RNS, será realizado ainda um trabalho para otimização do equipamento visando a redução das dimensões, peso e custo. Para isso, técnicas de inteligência artificial serão utilizadas em conjunto com o *software* de elemento finitos Ansys para alteração dos parâmetros do equipamento.

Paralelo ao desenvolvimento das próximas atividades um estudo de alocação ótima dos equipamentos deverá ser realizado de forma a desenvolver um método para escolha dos locais mais adequados para a instalação simultânea de unidades do RNS. Portanto, o equipamento foi aprovado nos testes de desempenho realizados em laboratório, sendo o próximo passo a sua instalação em campo com um acompanhamento contínuo da sua performance através de medições.

### 4. Referências bibliográficas

BARBOSA JÚNIOR, João Areis Ferreira et al. Uma contribuição para a modelagem, construção e análise de desempenho de compensadores de tensão a reator saturado. 2013.

BLAKE, David K. The application of the saturated-core reactor and regulator. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 43, p. 937-946, 1924.

CHAVES, Camilla de Sousa et al. Projeto, modelagem e avaliação da eficácia dos reatores a núcleo saturado ao processo da regulação de tensão. 2016.

PRODIST, Procedimentos de Distribuição. Módulo 8—qualidade da energia elétrica. Agência Nacional de Energia Elétrica—ANEEL, 2010.

DUGAN, Roger C. et al. Electric power systems quality. 2004.