



# Aplicação de Transformador de Distribuição com Comutação Automática sob Carga (OLTC): Melhoria da Qualidade de Energia

**Tema:** Qualidade de Energia

**Autores:** Carlos Eduardo da Luz

**Co-Autores:** Liece Hönig Brazil, Vagner Vasconcellos e Gilnei Jose Gama dos Santos

**Empresa:** RGE Sul Distribuição de Energia S/A

---

## Resumo

A integração de transformadores de distribuição com comutadores sob carga (OLTC) é um avanço crucial para a estabilização e qualidade das redes de distribuição elétrica, especialmente em cenários com alta penetração de geração distribuída (GD). Este estudo aborda a implementação e resultados iniciais de um transformador regulador de tensão com comutação automática sob carga, instalado na rede da RGE em Santana do Livramento, RS. Desenvolvido em uma parceria entre o Grupo CPFL Energia, TRAEEL Transformadores Elétricos e o Grupo Reinhausen (MR), o projeto visa mitigar as violações de tensão causadas por variações sazonais de carga, aumento da penetração de recursos elétricos distribuídos (RED), aumento da instalação de estações de recarga para veículos elétricos, entre outros fatores.

No contexto brasileiro, onde esses desafios são crescentes, a regulação automática se destaca como solução promissora para garantir qualidade e estabilidade na energia fornecida. Este artigo apresenta um método testado na rede da RGE, utilizando transformadores de distribuição com OLTCs automáticos para mitigar violações de tensão. Medições comparativas antes e após sua instalação serão utilizadas para apontar a quão promitente será a tecnologia na estabilização da tensão, atendendo aos limites regulatórios, reduzindo a necessidade de intervenções manuais e aumentando a confiabilidade dos sistemas de distribuição de baixa tensão.

## 1. Introdução

A expansão da geração distribuída, especialmente de fontes renováveis, trouxe vantagens econômicas, sociais e ambientais, mas também desafios, como a diminuição da confiabilidade dos sistemas elétricos. Os Sistemas de Distribuição foram originalmente projetados para operar além da demanda calculada, mas a introdução de elementos ativos e o aumento do número de geradores distribuídos demandam uma mudança nessa abordagem.

Apesar dos avanços nos sistemas de distribuição, a regulação de tensão continua sendo um desafio significativo. Variações de tensão em regime permanente podem resultar em danos a equipamentos eletrônicos, prejudicando indicadores de qualidade e causando insatisfação dos consumidores.

Uma das abordagens empregada para atenuar ou corrigir os níveis de tensão que se encontram distantes da faixa adequada envolve a realização de ajustes dos comutadores de tap (derivação do enrolamento) dos transformadores de distribuição, entretanto, esse método apresenta limitações. Primeiramente, os ajustes

são manuais e fixos, o que exige a interrupção temporária do fornecimento de energia para realizar as correções e adequar o ponto de derivação do enrolamento. Além disso, não há garantia de que a configuração de tap seja eficaz tanto nos períodos de ponta (sem injeção de potência pelas GDs e elevado consumo pelas unidades consumidoras), quanto nos períodos fora de ponta (com elevada injeção de potência pelas GDs e baixo consumo pelas unidades consumidoras).

Como alternativa para mitigar essas limitações, em algumas condições, são aplicados bancos reguladores automáticos na rede primária, que realizam correções na tensão primária após o ponto de instalação, contudo, essas correções afetam todo um setor, resultando em ajustes que podem ser desnecessários para determinados transformadores, causando impactos indesejados em circuitos de rede em baixa tensão, devido características das cargas locais. Além disso, a expansão dos sistemas de geração fotovoltaicos e da infraestrutura para eletromobidade traz um aumento de carga nas redes de média e baixa tensão, o que intensifica a necessidade de intervenções estratégicas. Quando análises de planejamento apontam violações nos limites de tensão, é necessário aplicar medidas corretivas. Um transformador regulador automático, neste contexto, se mostra como uma alternativa inovadora para eliminar essas violações e garantir a estabilidade da rede.

Conhecidos também como transformadores reguladores da distribuição, esses dispositivos destacam-se pela capacidade automática de ajustar os níveis de tensão na rede de distribuição, oferecendo maior flexibilidade e agilidade nas correções, sem a necessidade de interrupções significativas no fornecimento de energia. A implementação desses transformadores não apenas representa uma resposta aos desafios enfrentados, mas também proporciona uma contribuição significativa para o controle da tensão na rede de distribuição em baixa tensão, resultando na otimização do desempenho e da confiabilidade do sistema elétrico como um todo.

A integração com sistemas de geração distribuída torna esse desenvolvimento promissor para resolver desafios atuais e futuros na regulação de tensão nos sistemas de distribuição elétrica.

## **2. Desenvolvimento**

No contexto brasileiro, a regulamentação do funcionamento e desempenho dos sistemas elétricos de distribuição de energia elétrica, conectados ao sistema interligado nacional, é normatizada e padronizada por meio do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Estes procedimentos abordam um conjunto de documentos que disciplinam as relações entre as distribuidoras de energia elétrica e outros agentes, como unidades consumidoras e centrais geradoras, conectados aos sistemas de distribuição, incluindo redes e linhas com tensão inferior a 230 kV.

O Módulo 8 do PRODIST concentra-se especificamente nas questões relacionadas à qualidade do fornecimento de energia elétrica, regulamentando questões como tensão de regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrios de tensão, flutuação de tensão, variações de frequência e variações de tensão de curta e longa duração. Além disso, estabelece indicadores para avaliação da qualidade do produto e dos serviços prestados pelas companhias de distribuição de energia elétrica.

No contexto dos níveis de tensão de regime permanente, o PRODIST estabelece limites de operação que as distribuidoras devem observar. Conforme demonstrado na Figura 1, esses limites são categorizados como adequados, precários e críticos. No caso específico de sistemas de distribuição monofásicos com tensão secundária de 380 V/220 V, esses níveis impactam diretamente nos índices de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e tensão crítica (DRC).

**Tabela 5 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 2,3 kV (380/220)**

<b>Tensão de Atendimento</b>	<b>Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)</b>
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399)/(202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403)/$ $(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403)/(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

*Figura 1. PRODIST: Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 2,3kV (380/220)*

O não cumprimento dos limites estabelecidos pela ANEEL pode acarretar compensações para os consumidores, além de não eximir a distribuidora de outras responsabilidades decorrentes do serviço inadequado, resultando em prejuízos para as companhias concessionárias de energia.

## **IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA**

Diversas são as causas de Reclamações de Níveis de Tensão, podendo ter origem desde problemas na rede primária, passando pelo ajuste de tensão no comutador derivação do transformador de distribuição, até chegar na rede secundária, com problemas vinculados às conexões (mau contato), extensão, tipo de condutor e distribuição de carga entre as fases.

Especificamente sobre ajuste de tensão no comutador de derivação do transformador de distribuição é um problema detectável por meio da análise do gráfico oriundo dos 1008 registros de leituras obtidas no MUG instalado em determinado ponto de um circuito (normalmente a partir da reclamação de nível de tensão). Para determinar a viabilidade de corrigir o problema com a instalação de um transformador automático, é necessário observar critérios que definem se o ponto de instalação deve ser incluído na lista de soluções via OLTC. A seleção do local para a instalação de transformadores reguladores é um processo complexo e multidisciplinar, que requer uma análise cuidadosa de diversos aspectos técnicos, operacionais e ambientais, visando garantir a eficiência, confiabilidade e sustentabilidade do sistema de distribuição de energia elétrica.

Um dos aspectos cruciais a ser considerado é o comprimento dos cabos de alimentação. Em áreas mais extensas, onde a alimentação elétrica se estende por longos trechos, a regulação de tensão se torna essencial para melhorar a eficiência do sistema. A utilização de transformadores reguladores nessas áreas pode evitar a necessidade de recondutoramento e a abertura de novos circuitos com o uso de outros transformadores, proporcionando uma solução mais econômica e eficiente.

Além disso, é importante destacar que a presença de geração distribuída (GD) pode desencadear alterações significativas na rede elétrica. Deste modo, a potência instalada dos sistemas de geração fotovoltaicos também deve ser levada em consideração durante o processo de seleção do local. Com o aumento da adoção de sistemas de geração distribuída, é importante considerar a capacidade de absorção desses sistemas pela rede elétrica, garantindo uma integração eficiente e segura.

Outro critério relevante é o número de conexões domésticas. Áreas com grande número de residências ou estabelecimentos comerciais podem demandar uma maior capacidade de fornecimento de energia, justificando a instalação de transformadores reguladores para garantir uma distribuição equitativa e estável de energia elétrica.

Além dos critérios mencionados, outros fatores como carga básica também devem ser avaliados para garantir uma escolha adequada do local de instalação dos transformadores reguladores.

A análise e sugestão de locais para a instalação dos transformadores reguladores, embasada nos critérios e precauções mencionados anteriormente, são conduzidas pela área de gestão de ativos da RGE (GA), especificamente pela equipe responsável pelo Nível de Tensão. Para essa análise, foram considerados diversos locais previamente identificados em relatórios gerenciais, os quais fornecem informações essenciais, tais como carga básica instalada, quantidade de conexões, presença de geração distribuída e sistemas fotovoltaicos, extensão do circuito e localização geográfica favorável para coleta de dados e realização de inspeções periódicas.

### SELEÇÃO DO PONTO DE APLICAÇÃO DO TESTE PILOTO

A aplicação do equipamento foi realizada em um circuito da rede de distribuição da RGE, no município de Santana do Livramento, RS. Medições prévias no trecho indicaram níveis críticos de tensão nesse circuito, que apresentava frequentes violações dos limites regulamentares, como ilustrado na Figura 2, com gráficos das medições realizadas com o Medidor Universal de Grandezas (MUG). Esses dados evidenciaram a necessidade de uma solução dinâmica e automática, que permitisse ajustes em tempo real nos níveis de tensão. Com a instalação do OLTC, espera-se mitigar as violações de tensão e melhorar a estabilidade e qualidade do fornecimento, respondendo de forma eficiente aos desafios locais, como as variações sazonais de carga, o impacto da geração distribuída e o aumento da demanda de carregamento de veículos elétricos.



Figura 2. Medição prévia no circuito de BT com violação de níveis de tensão.

A escolha do local de instalação para o equipamento piloto envolve uma análise cuidadosa dos dados disponíveis. Ao considerar os pontos de corte fornecidos, destacou-se um transformador trifásico de potência igual a 75 kVA na região de Santana do Livramento, vide Figura 3. O circuito possui 58 consumidores, em tensão de fornecimento de 220/308V, sendo que, 11 consumidores possuem sistema de microgeração distribuída (totalizando 61,16 kW de potência instalada). A Figura 4 apresenta o carregamento do transformador com a visão de carga e geração existente.

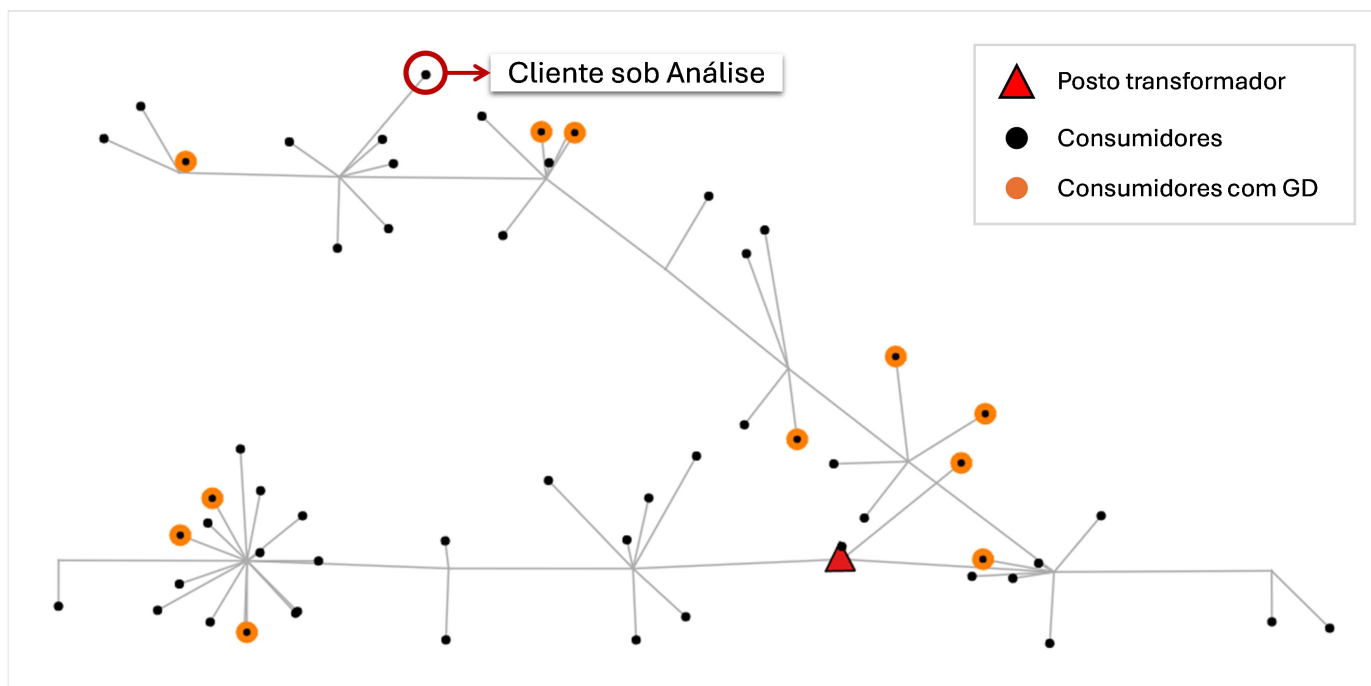


Figura 3. Circuito BT atendido pelo transformador OLTC piloto na RGE.

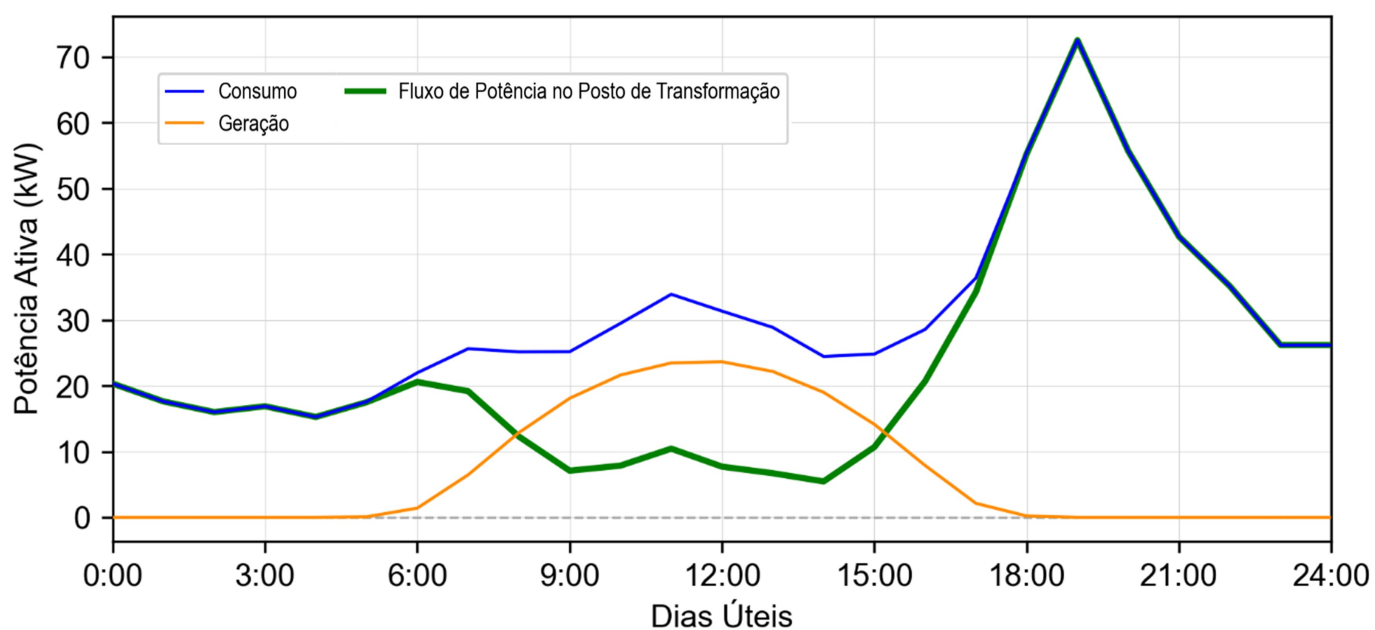


Figura 4. Carregamento atual do transformador com a visão de carga e geração existente.

Para atender às demandas atuais e futuras no circuito, com base em critérios de planejamento da expansão do sistema elétrico de distribuição, foi realizada a instalação de um transformador trifásico com potência nominal de 112,5 kVA.

### TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO COM COMUTAÇÃO AUTOMÁTICA SOB CARGA

O transformador autorregulado empregado utiliza o comutador de derivação automático ECOTAP® VPD® e é preenchido com líquido isolante biodegradável, alinhando-se às diretrizes de sustentabilidade e práticas



ESG. Um dos principais diferenciais deste transformador é sua capacidade de realizar ajustes automáticos em tempo real, otimizando a resposta às flutuações de carga.

Nesse contexto, o uso de transformadores com comutadores de derivação sob carga (OLTC) surge como uma solução inovadora, permitindo ajustes dinâmicos de tensão que evitam quedas ou elevações além dos limites regulamentares, mesmo diante das variações na geração distribuída e no consumo. Essa inovação permite ajustes contínuos, garantindo a continuidade e qualidade do produto, com redução de reclamações dos consumidores e dos custos associados a compensações e intervenções em campo.

O transformador regulador automático adotado em Santana do Livramento, Figura 5, possui um padrão construtivo específico, no qual os ajustes de tensão ocorrem no lado de alta tensão, enquanto o lado de baixa tensão mantém uma saída constante.



*Figura 5. Transformador OLTC - Piloto instalado em Santana do Livramento/RS.*

No lado de alta tensão, os taps variam entre 14.400V e 13.200V, distribuídos em nove posições, oferecendo uma faixa de regulação de 1,08% por derivação. Esse intervalo permite uma precisão controlada para ajustes de tensão conforme as variações de carga e geração distribuída no sistema. Construtivamente, o comutador é capaz de realizar ajustes de até 2,5% entre os taps, com um degrau máximo de 550 volts, no entanto, para este projeto, o ajuste foi limitado a um degrau de 1,08%, equivalendo a aproximadamente 150V entre as posições das derivações. Essa configuração atende aos requisitos de estabilidade da tensão, ao mesmo tempo que minimiza impactos na operação da rede, promovendo uma transição suave entre os diferentes níveis de tensão e assegurando a qualidade do fornecimento de energia aos consumidores finais.

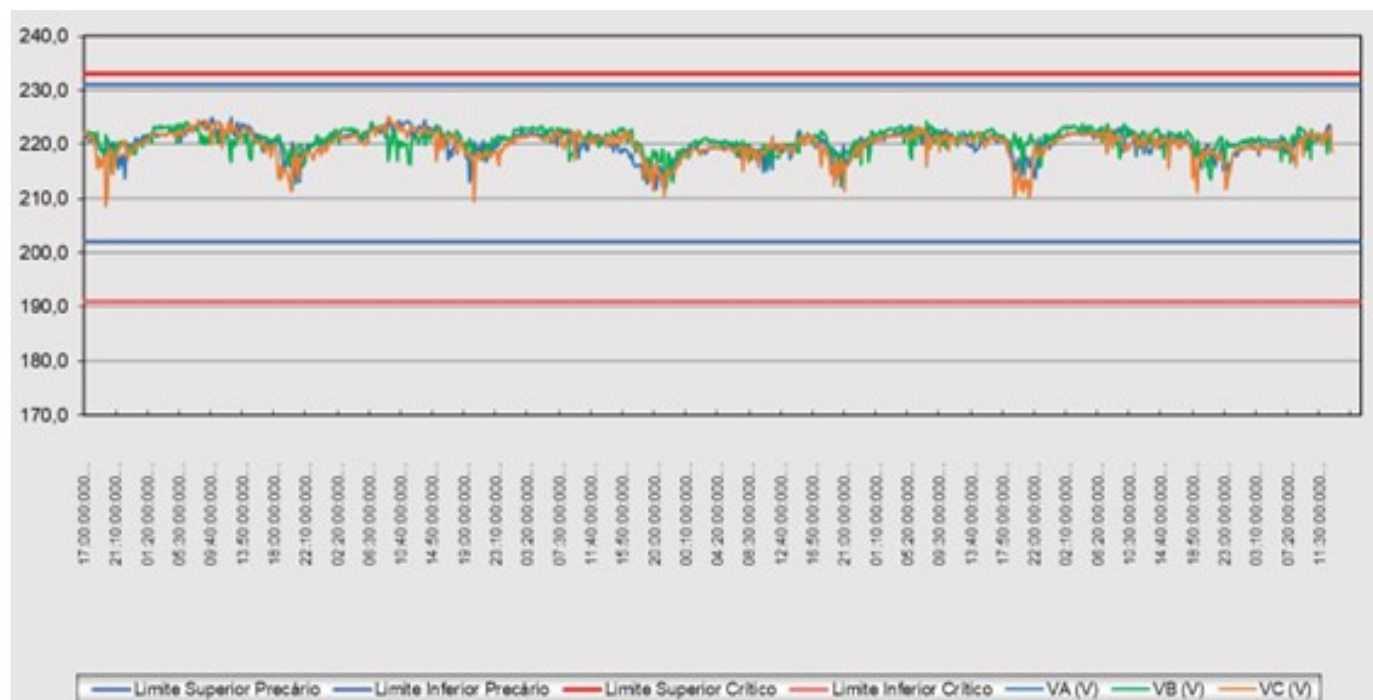
## **MONITORAMENTO E RESULTADOS OBTIDOS**

A primeira etapa do processo de implementação do transformador com comutador de derivação sob carga envolve a coleta de dados preliminares da rede de distribuição onde o equipamento será instalado. Esta coleta prévia de dados tem como objetivo obter uma visão geral das condições operacionais da rede e dos indicadores de qualidade da energia elétrica, como a medição de tensão em regime permanente.

A metodologia do projeto envolveu medições contínuas, realizadas com medidores de qualidade, registrando tensão de forma integralizada a cada 10 minutos em dois pontos distintos da rede, durante um período de 7 dias, para avaliar cada condição operacional.

Antes da instalação do transformador autorregulado, as medições foram realizadas em pontos próximo e distante do transformador, as quais indicaram níveis de tensão fora dos limites regulatórios definidos pela ANEEL.

As leituras próximas ao transformador, conectada logo na saída secundária do posto transformador, demonstraram que a tensão em regime permanente estava dentro dos limites regulados da ANEEL.



*Figura 6-Medição realizado antes da instalação do OLTC, na saída do transformador.*

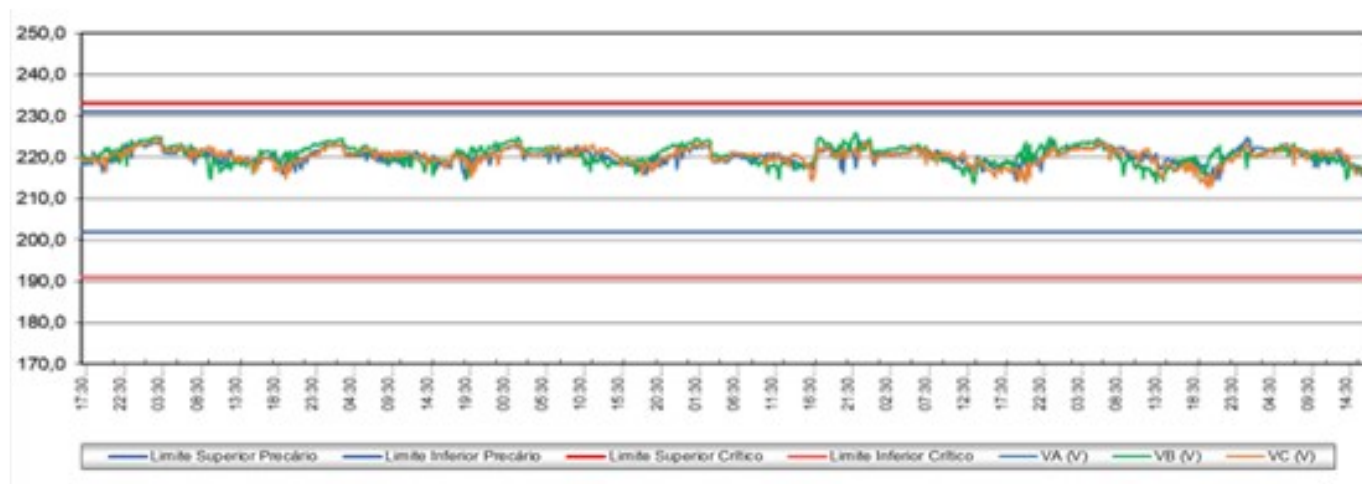
No ponto mais distante, aplicado no ponto de conexão do cliente sob análise, indicado da Figura 7, as medições anteriores à instalação do transformador demonstraram variações de até 35,33% acima dos limites DRC e 18,43% de DRP, com resultados classificados como críticos. Um dos grandes desafios deste circuito está relacionado a conexão de sistemas de geração monofásicos, o qual impacta no desequilíbrio de tensão deste circuito.



*Figura 7-Medição realizada antes da instalação do OLTC, em cliente no final do circuito de BT atendido pelo TR.*

O fato observado ocorre devido a impedância equivalente entre o sistema de geração distribuída e o posto transformador de distribuição, visto que, quanto maior a impedância entre eles maior será a possibilidade da ocorrência de sobretensão no sistema sob análise. Este é um dos grandes desafios para as distribuidoras, uma vez que geram a necessidade de elevados investimentos para reforços de rede, a fim de mitigar a ocorrência destes eventos. Deste modo, a instalação da solução proposta neste trabalho visa reduzir a aplicação destes investimentos.

Com a implementação do Transformador de Distribuição com comutação automática sob carga (OLTC), realizou-se uma nova campanha de medições nos pontos anteriormente indicados. Na nova campanha de medição realizada na saída do posto transformador, verifica-se que o nível de tensão se mantém adequado, porém com um maior equilíbrio entre as fases e menores picos de tensão em horários de maior injeção.



*Figura 8. Medição realizado na saída do transformador, com uso do OLTC em modo automático.*

Já as medições realizadas no ponto do cliente sob análise neste circuito, após a instalação do OLTC, apresentaram valores significativamente otimizados, alcançando a marca de 0,09% acima do DRP, se estabelecendo dentro das margens aceitáveis do PRODIST Módulo 8. Além da correção dos valores de tensão em regime permanente, também é verificado a redução do desequilíbrio de tensão neste circuito, visto que o controle de tensão reduz as variações causadas nos pontos mais distantes da rede.





Figura 9. Medição realizado em cliente distante do TR, com uso do OLTC em modo automático.

A seguir, as Figuras 10 e 11 apresentam um resumo dos valores medidos nos pontos anteriormente indicados neste circuito de baixa tensão em estudo.

	DRC	DRP	Resultado
Medição Anterior	0,00%	0,00%	Critico
Limite Aneel	0,50%	3,00%	Limite
Medição Posterior	0,00%	0,00%	Adequado

Figura 10. Comparativo de medições antes e pós instalação do OLTC, realizada em ponto na saída do TR.

	DRC	DRP	Resultado
Medição Anterior	35,33%	18,43%	Critico
Limite Aneel	0,50%	3,00%	Limite
Medição Posterior	0,00%	0,09%	Adequado

Figura 11. Comparativo de medições antes e pós instalação do OLTC, realizada em cliente distante do TR.

Um diferencial importante do equipamento foi a sua capacidade de realizar 23 comutações automáticas em um intervalo de 14 dias, referente ao período de medições, ajustando a tensão em tempo real sem a necessidade de intervenção manual ou envio de equipe ao local. Cada comutação não apenas representa uma regulação automática da rede, mas também um rearranjo dinâmico do sistema, permitindo que as equipes de campo sejam direcionadas para outras atividades, aumentando a eficiência operacional.

### 3. Conclusão

Conclui-se que a tecnologia de transformadores autorregulados (OLTC) representa uma solução técnica promissora para enfrentar as exigências operacionais e regulatórias no setor elétrico brasileiro. O projeto demonstra que a modernização das redes de distribuição, com a inclusão de transformadores automáticos de tensão, pode proporcionar benefícios substanciais tanto para a distribuidora quanto para o consumidor final, assegurando maior estabilidade, eficiência e sustentabilidade no fornecimento de energia.

A análise comparativa das medições antes e após a instalação demonstrou a eficiência do sistema autorregulado em comparação com o sistema convencional (tap fixo), evidenciando o potencial da tecnologia em minimizar as oscilações de tensão e assegurar a conformidade regulatória.

Além dos ganhos operacionais, o uso de óleo isolante biodegradável contribui para a redução do impacto ambiental, reforçando o compromisso do Grupo CPFL Energia com práticas de governança e sustentabilidade.

Apesar dos ganhos técnicos identificados neste estudo, persiste um desafio significativo relacionado aos custos associados à solução e ao seu reconhecimento como ativo pelo órgão regulador. Isso ocorre porque o custo da solução é consideravelmente superior ao dos transformadores convencionais atualmente utilizados pela distribuidora.

Todavia, os resultados obtidos sugerem que a ampliação do uso de transformadores autorregulados nas áreas atendidas pela concessionária podem proporcionar uma rede mais confiável e um fornecimento de energia com qualidade aprimorada, atendendo de forma proativa aos desafios impostos pela geração distribuída.

#### **4. Referências bibliográficas**

ANEEL. **PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO: Módulo 8. 2020.** Disponível em [https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020888\\_prodist\\_modulo\\_8\\_v11.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020888_prodist_modulo_8_v11.pdf)