

# **RELATÓRIO TÉCNICO CONCLUSIVO**

## **VIABILIDADE TÉCNICA E OPERACIONAL DA UTILIZAÇÃO DE REATORES SHUNT NA GESTÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA PARA CONTROLE DE TENSÃO EM REGIÕES COM ELEVADO NÚMERO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

**Mestranda:**

**EMANUELLE FERREIRA BRUM**

**Orientadores:**

**PROF. DR. ANTONIO VANDERLEI DOS SANTOS**

**PROF. DRA. ROSANE MARIA SEIBERT**

**Abril / 2025.**

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>Contribuições Científicas, Tecnológicas e Inovadoras .....</b>	<b>4</b>
<b>Aplicação na Comunidade e Impacto Regional.....</b>	<b>5</b>
<b>Etapas da análise de viabilidade técnica e operacional .....</b>	<b>6</b>
<b>1 ANÁLISE DE REDES SDMT DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....</b>	<b>7</b>
1.1 Resultados - Etapa I .....	8
1.2 Resultados - Etapa II .....	9
1.3 Resultados - Etapa III .....	12
1.4 Características da rede avaliada .....	13
<b>2 REATOR SHUNT – COMPENSAÇÃO REATIVA E CORREÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÃO SDMT .....</b>	<b>19</b>
<b>3 GESTÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>21</b>
3.1 Operação do SDMT Dentro dos Níveis de Tensão Estabelecidos pela ANEEL ..	21
<b>4 SIMULAÇÕES COM A INSTALAÇÃO DO REATOR SHUNT .....</b>	<b>24</b>
<b>5 ESCOPO DE INSTALAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO NOS SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....</b>	<b>27</b>
5.1 Definição do Equipamento e Características .....	27
5.2 Localização e dimensionamento do Alimentador .....	29
5.3 Horário de operação do Reator Shunt.....	30
5.4 Implementação .....	30
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>33</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>35</b>

## INTRODUÇÃO

O **produto técnico-tecnológico** denominado “**Viabilidade técnica e operacional da utilização de reatores shunt na gestão do sistema elétrico de potência para controle de tensão em regiões com elevado número de geração fotovoltaica**” consiste em uma solução para sustentabilidade energética e regulatória no âmbito regional do estado do Rio Grande do Sul. O produto objetivou verificar a viabilidade operacional de instalação de um equipamento no Sistema de Distribuição de Média Tensão para fazer o controle dos níveis de tensão no SDMT, provenientes da elevada inserção de Geração Fotovoltaica. Ele foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Gestão Estratégica de Organizações – URI Santo Ângelo (PPGGEO) que se enquadra na Área 27 da CAPES: Administração Pública e de Empresas, Ciências Contábeis e Turismo (Área 27). A **Área de Concentração** do PPGGEO é de **Gestão de Organizações** e a **Linha de Pesquisa** na qual o produto se enquadra é **Inovação, Sustentabilidade e Desenvolvimento**.

Este produto técnico-tecnológico constitui uma contribuição original e relevante no contexto da gestão aplicada a sistemas energéticos, oferecendo soluções inovadoras para um desafio contemporâneo: a estabilidade operacional de redes elétricas diante da crescente geração distribuída fotovoltaica (GDFV). O estudo propõe, com embasamento técnico-científico robusto, a instalação de reatores shunt em Sistemas de Distribuição de Média Tensão (SDMT), visando a mitigação de sobretensões decorrentes da intermitência da energia solar. Seu desenvolvimento alia excelência acadêmica e aplicabilidade prática, em consonância com os objetivos e diretrizes do PPGGEO da URI – Santo Ângelo.

A proposta se insere na área de concentração de Gestão de Organizações e diretamente na linha de pesquisa Inovação, Sustentabilidade e Desenvolvimento, ao explorar a interação entre novas tecnologias energéticas e o planejamento estratégico de infraestrutura, com enfoque na gestão da inovação tecnológica, na gestão da qualidade do processo de transmissão de energia, na sustentabilidade ambiental e no desenvolvimento regional. O produto dialoga com a missão do programa ao oferecer uma solução baseada na integração entre ciência, tecnologia e gestão, voltada para contextos reais e problemáticas vivenciadas por concessionárias de energia elétrica,

gestores públicos e comunidades afetadas por oscilações na qualidade do fornecimento de energia.

A aderência à área de concentração e às linhas do programa é evidenciada pela abordagem interdisciplinar, combinando fundamentos de engenharia elétrica, planejamento estratégico, análise regulatória e gestão operacional. Além disso, o trabalho apresenta um modelo de análise replicável, capaz de subsidiar políticas públicas e decisões corporativas no campo energético, especialmente em regiões de forte vocação agroindustrial, como é o caso do interior do estado do Rio Grande do Sul.

Outro destaque está na composição da banca avaliadora, formada por docentes doutores com reconhecida expertise em inovação, gestão de tecnologias e infraestrutura energética, o que garante a consistência metodológica e a pertinência do produto frente aos padrões de avaliação da CAPES para produtos tecnológicos.

### **Contribuições Científicas, Tecnológicas e Inovadoras**

O produto “Viabilidade técnica e operacional da utilização de reatores shunt na gestão do sistema elétrico de potência para controle de tensão em regiões com elevado número de geração fotovoltaica” apresenta contribuições que ultrapassam os limites da pesquisa acadêmica tradicional, promovendo o avanço do conhecimento aplicado em diversos níveis:

- Para a ciência: oferece um modelo computacional de simulação de fluxo de potência com foco em estabilidade de redes em presença de GDFV, com resultados comparativos antes e depois da instalação dos reatores, promovendo maior precisão em estudos voltados à regulação e planejamento energético.
- Para a tecnologia: explora o uso de reatores shunt trifásicos com ligação delta e configurações operacionais adaptadas à geração solar, apontando sua eficácia na correção de tensões fora da faixa regulatória, contribuindo com dados inéditos sobre sua aplicabilidade em redes rurais.
- Para a inovação: propõe um modelo de gestão proativa da rede elétrica, integrando monitoramento contínuo, dimensionamento adaptativo de equipamentos e ativação estratégica com base em janelas solares, promovendo eficiência energética e sustentabilidade regulatória.

- Para a produção científica associada: os dados empíricos, metodologias e resultados gerados alimentam futuras publicações em periódicos técnicos e científicos, contribuindo com o debate sobre energia descentralizada, gestão de ativos em serviços públicos e inovação em redes inteligentes.

### **Aplicação na Comunidade e Impacto Regional**

O produto é exemplar em sua aplicação prática junto à comunidade e ao setor produtivo, respondendo a demandas concretas do território de abrangência da URI – Santo Ângelo e além. A instabilidade no fornecimento de energia causada por excesso de injeção fotovoltaica é um problema enfrentado por diversos municípios da região, onde predomina a agricultura familiar e o uso intensivo de energia para irrigação e mecanização. Ao oferecer um modelo técnico de fácil replicação e escalabilidade, o estudo se apresenta como solução estratégica para cooperativas, concessionárias, prefeituras e produtores rurais, que buscam alinhar suas operações aos critérios regulatórios da ANEEL e garantir a continuidade e qualidade do fornecimento.

Em termos de desenvolvimento regional, a proposta atua diretamente na melhoria da infraestrutura energética, o que é condição fundamental para o crescimento sustentável e para a competitividade de cadeias produtivas locais. Além disso, ao minimizar perdas técnicas e oscilações de tensão, contribui com a redução de custos operacionais e o prolongamento da vida útil dos equipamentos, promovendo ganhos econômicos e ambientais.

Nesse sentido o produto se alinha aos critérios de avaliação da CAPES, no que se refere à relevância social, aplicabilidade prática, inovação e vínculo com o setor produtivo.

- Apresenta clareza metodológica e profundidade técnica, com simulações, dados empíricos e proposições operacionais ancoradas em marcos regulatórios e literatura especializada;
- Demonstra potencial de impacto regional e nacional, com possibilidade de extensão para outros sistemas de distribuição elétrica que enfrentam desafios similares;
- Contribui para o fortalecimento da identidade do PPG em Gestão da URI – Santo Ângelo, ao consolidar a integração entre conhecimento científico, solução de problemas concretos e desenvolvimento regional sustentável.

Este produto representa, portanto, um exemplo notável de como a pesquisa de pós-graduação pode transformar conhecimento em ação, com repercussões reais sobre a gestão de sistemas complexos, a qualidade de vida da população e o fortalecimento de práticas sustentáveis no contexto organizacional e territorial.

### **Etapas da análise de viabilidade técnica e operacional**

A análise da rede de distribuição de energia elétrica foi conduzida com o objetivo de avaliar os impactos da geração distribuída fotovoltaica (GDFV) sobre a qualidade do fornecimento de energia e verificar a viabilidade técnica da instalação de reatores shunt no SDMT. O capítulo está estruturado em três etapas principais, correspondentes às fases do estudo: seleção da subestação mais impactada pela inserção de GDFV, avaliação detalhada dos alimentadores dessa subestação e análise das variações de tensão para parametrização dos reatores shunt.

Inicialmente, foi realizada a identificação das subestações com maior injeção de energia solar, considerando dados operacionais da distribuidora e registros de variações de tensão. Posteriormente, os alimentadores da subestação selecionada foram analisados, considerando características como carga máxima, carga mínima e variações sazonais ao longo do ano. Por fim, foram identificadas as principais variações de tensão na rede, permitindo a definição das características ideais do reator shunt a ser simulado. Essa abordagem garantiu uma visão abrangente sobre os desafios impostos pela intermitência da geração fotovoltaica e as possíveis soluções técnicas para sua mitigação.

A seguir, neste relatório técnico conclusivo se passa a descrição de cada etapa.

## 1 ANÁLISE DE REDES SDMT DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

A análise das redes de distribuição de energia elétrica foi conduzida em três principais etapas, que serão detalhadas a seguir. A Etapa I consistiu na coleta e análise de dados operacionais das subestações, com o objetivo de identificar quais unidades apresentavam maior incidência de injeção de potência da GDFV. Para essa etapa, foram analisados dados históricos da distribuidora, utilizando estatística descritiva para avaliar padrões de variação de carga ao longo do tempo. O critério para seleção da subestação foi baseado no nível de penetração da GDFV em relação à carga total da rede, considerando informações disponibilizadas no Painel de Dados de Micro e Minigeração Distribuída (PDMMD) da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), além de registros de reclamações de consumidores sobre variações de tensão.

Na Etapa II, procedeu-se à avaliação dos alimentadores da subestação identificada na Etapa I como a que possuía maior incidência de geração solar e sazonalidade de carga. Foram analisados aspectos como carga máxima, carga mínima e variações sazonais, aspectos que são críticos para garantir a confiabilidade da rede (Chen et al., 2020). Essa avaliação permitiu uma visão detalhada dos desafios associados à intermitência da energia solar, considerando especialmente as flutuações de demanda e oferta.

Por fim, a Etapa III envolveu a identificação das variações de tensão na rede e a definição das características ideais para o reator shunt a ser instalado, com o objetivo de mitigar o impacto da variabilidade da geração solar e promover a estabilidade do sistema elétrico (Jiang: Xu, 2019). O uso de reatores shunt foi amplamente discutido como uma solução eficaz para compensação de reativos e controle de tensão em redes de distribuição com elevada penetração de GDFV (Abdul-Rahman et al., 2021).

A combinação entre análise estatística descritiva, modelagem computacional e registros operacionais permitiu uma investigação abrangente dos efeitos da GDFV sobre a qualidade da energia elétrica e possibilitou a avaliação da viabilidade técnica da instalação de reatores shunt no SDMT.

## 1.1 Resultados - Etapa I

Para definição da subestação a ser avaliada, adotou-se como critério a relação entre o total de geração distribuída (MW) e a geração distribuída atendida em média tensão (MW). Esse parâmetro foi escolhido por refletir o nível de inserção da geração fotovoltaica no sistema elétrico da subestação, permitindo identificar redes que apresentam maior impacto da GD sobre a rede. A análise dessa relação possibilitou a seleção da Subestação 1, que apresentou a maior densidade relativa de GD em média tensão, tornando-a um caso relevante para avaliação das oscilações de tensão associadas à injeção de potência fotovoltaica.

Tabela 1 - Relação de proporção entre GD vs. GD atendida em SDMT

Subestação	total de geração distribuída (MW)	total de geração distribuída atendida em média tensão (MW)	Relação
<b>Subestação 1</b>	<b>17,4</b>	<b>9,12</b>	<b>52%</b>
Subestação 2	16,5	8,3	50%
Subestação 3	24,1	12,3	51%

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A escolha da Subestação 1 como caso de estudo se justifica pelo fato de que mais da metade da geração distribuída instalada (52%) está conectada em média tensão, aumentando significativamente o impacto da GD sobre o controle da tensão. Além disso, essa subestação apresenta uma característica de carga sazonal, uma vez que atende uma região com forte influência da atividade agrícola, onde a demanda de energia varia ao longo do ano devido ao ciclo de safra. Durante períodos de colheita e irrigação, há um aumento expressivo no consumo de energia elétrica, enquanto em outras épocas do ano a carga da rede diminui consideravelmente. No entanto, a geração fotovoltaica não segue a mesma tendência, pois a disponibilidade de radiação solar permanece relativamente estável ao longo do ano. Esse descompasso entre a redução da carga e a continuidade da geração solar intensifica as sobretensões na rede, tornando ainda mais crítico o estudo dos impactos da GD na estabilidade do sistema elétrico e a necessidade de soluções para compensação reativa.

Com base nessa seleção, a Etapa II concentrou-se na avaliação dos alimentadores dessa subestação, analisando os perfis de carga máxima e mínima, as variações sazonais e o comportamento dinâmico da rede elétrica ao longo do tempo.

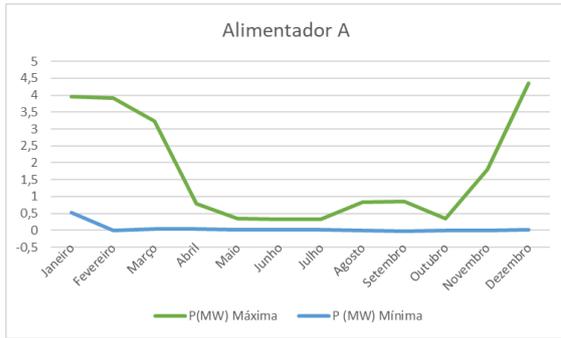
Essa análise foi fundamental para definir os parâmetros da modelagem computacional, permitindo que a investigação da viabilidade técnica dos reatores shunt ocorresse com base em um sistema representativo dos desafios enfrentados pela distribuidora.

## **1.2 Resultados - Etapa II**

A segunda etapa da análise concentrou-se na avaliação dos alimentadores da Subestação 1, previamente identificada como a que possui maior penetração de geração distribuída fotovoltaica (GDFV). Os alimentadores são os circuitos responsáveis por distribuir a energia elétrica da subestação para os consumidores finais, e seu comportamento é fortemente influenciado pelas características locais de carga. Neste estudo, foram analisados nove alimentadores (A, B, C, D, E, F, G, H e I), considerando suas respectivas demandas máximas e mínimas ao longo do ano, bem como a influência da variabilidade sazonal no consumo.

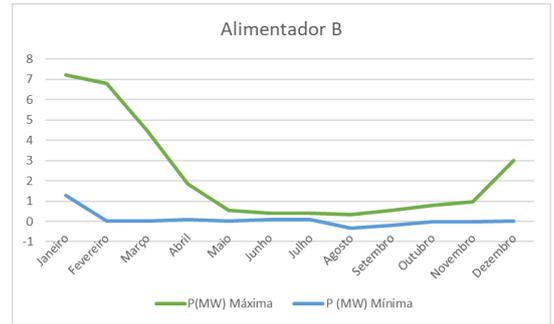
Os alimentadores A, B, C, D, G e I apresentaram um padrão de sazonalidade acentuado, refletindo a influência da atividade agrícola, cuja demanda por energia elétrica varia conforme os períodos de plantio, irrigação e colheita. A geração fotovoltaica, por outro lado, não acompanha essa flutuação, permanecendo constante em função da disponibilidade de radiação solar. Esse descompasso contribui para oscilações de tensão mais intensas durante os períodos de entressafra, quando a carga na rede está reduzida, mas a injeção de GD continua elevada.

Figura1: Consumo máximo e mínimo AL A



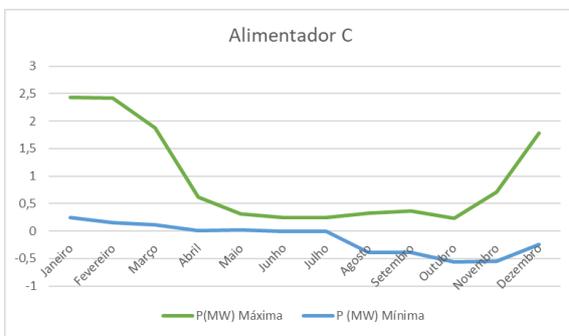
Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Figura 2: Consumo máximo e mínimo AL B



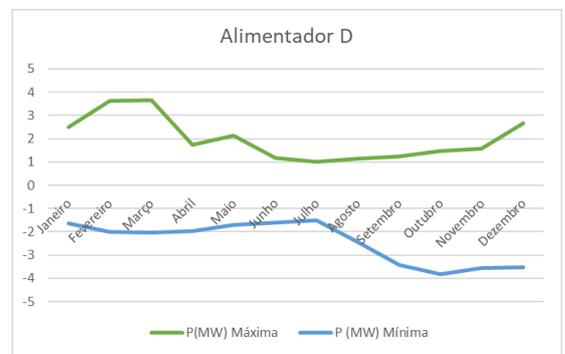
Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Figura 3: Consumo máximo e mínimo AL C



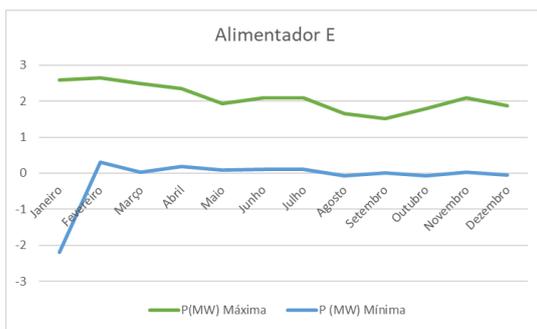
Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Figura 4: Consumo máximo e mínimo AL D



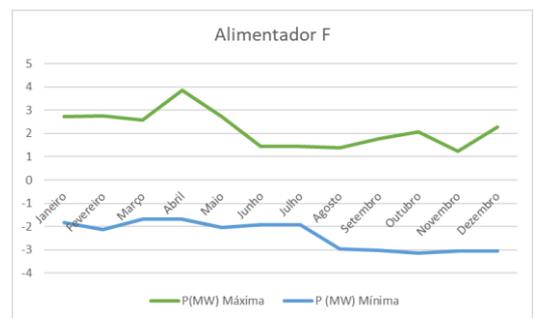
Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Figura 5: Consumo máximo e mínimo AL E



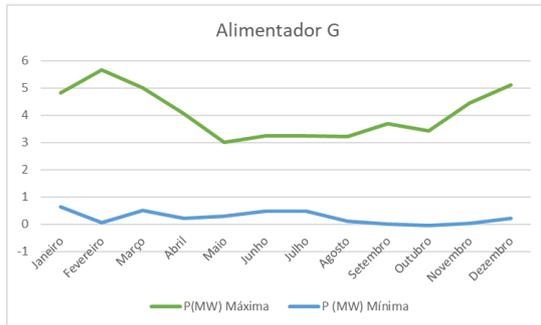
Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Figura 6: Consumo máximo e mínimo AL F



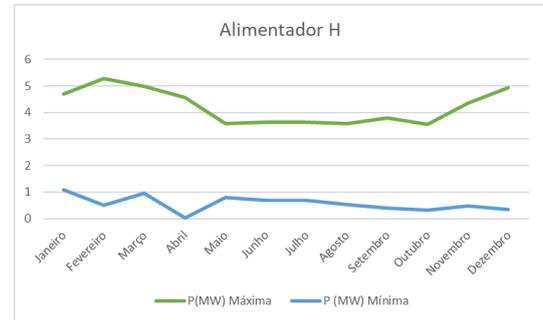
Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Figura 7: Consumo máximo e mínimo AL G



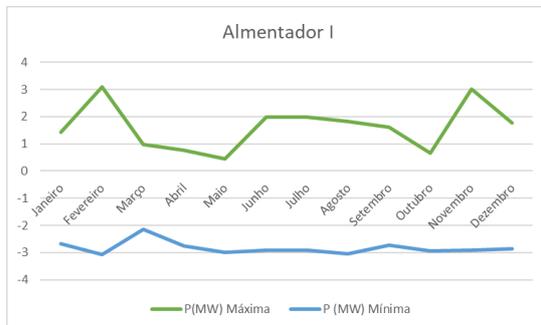
Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Figura8 : Consumo máximo e mínimo AL H



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Figura 91: Consumo máximo e mínimo AL I

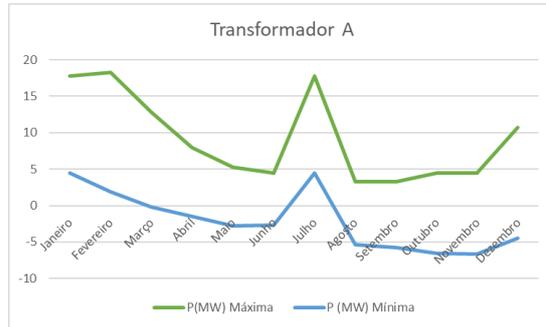


Fonte: Dados da pesquisa (2024)

De maneira análoga, procedeu-se à avaliação das capacidades nominais máximas e mínimas dos transformadores da subestação. A subestação em análise é caracterizada por ser de classe de tensão 69 kV/13,8 kV/23,1 kV, equipada com dois transformadores de potência, um com capacidade de 12,5 MVA e outro de 25 MVA, respectivamente.

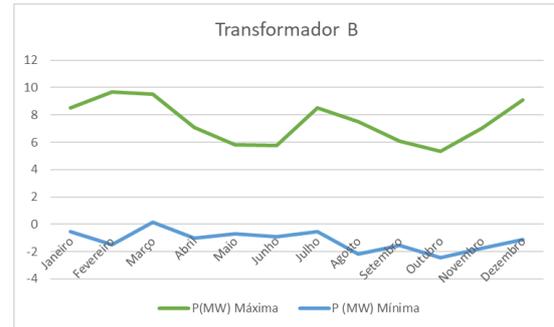
As oscilações observadas nos transformadores reforçam o impacto da sazonalidade do consumo na operação da subestação. O TR A registrou uma potência máxima próxima de 20 MVA, enquanto a potência mínima, medida no período de entressafra, foi de aproximadamente 5 MVA, caracterizando uma variação expressiva de carga. O TR B, por sua vez, apresentou uma variação menor, com potência máxima de 10 MVA e mínima de 6 MVA, operando com menor amplitude de variação. A Figura 1 ilustra a flutuação da carga nos transformadores ao longo do ano.

Figura 10: Consumo máximo e mínimo TR A



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Figura 11: Consumo máximo e mínimo TR B



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

A partir da análise dos alimentadores e da variação de carga nos transformadores, identificou-se que a sazonalidade do consumo afeta diretamente os níveis de tensão na rede, criando um cenário propício para avaliar a viabilidade técnica da aplicação de reatores shunt. Para aprofundar esse estudo, foi selecionado o Alimentador D, que apresentou a atenuação de carga mais significativa ao longo do ano. Essa escolha se deu porque, em momentos de baixa demanda e alta geração solar, esse alimentador registra oscilações de tensão acentuadas, tornando-se um caso representativo para modelagem dos impactos da GD na estabilidade da rede e no controle de tensão.

### 1.3 Resultados - Etapa III

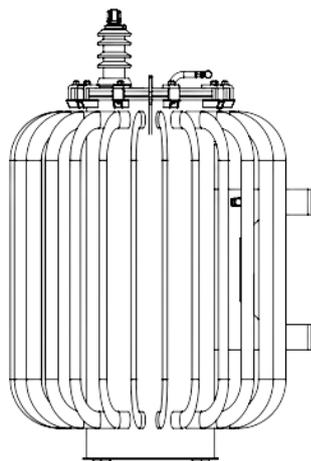
Nesta etapa, foram conduzidas simulações computacionais para avaliar o impacto da instalação dos reatores shunt na regulação dos níveis de tensão no alimentador selecionado. O objetivo foi verificar se a compensação da potência reativa capacitiva promovida pelos reatores contribuiria para mitigar as oscilações de tensão identificadas nas etapas anteriores, garantindo maior estabilidade à rede.

A escolha dos reatores trifásicos de 300 kVAr para simulação foi baseada em critérios técnicos que consideram a viabilidade estrutural da implementação do equipamento na rede existente. A potência nominal desses reatores foi selecionada por apresentar características físicas semelhantes às dos transformadores de distribuição já em operação no SDMT, o que possibilitaria uma instalação simplificada e minimizaria a necessidade de adaptações na infraestrutura da rede elétrica. Além disso, a escolha dessa potência permitiu avaliar se a absorção da potência reativa

seria suficiente para atenuar as sobretensões identificadas durante os períodos de baixa demanda e alta geração fotovoltaica.

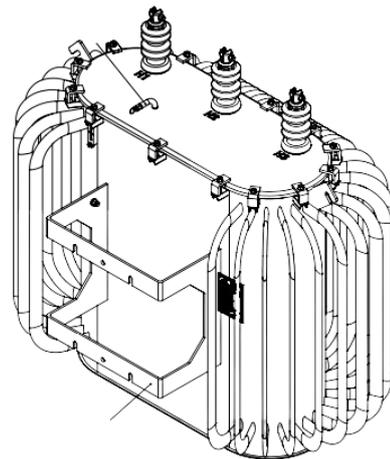
Os reatores selecionados para simulação foram: reator trifásico imerso em óleo de 300 kVAr, 13,8 kV, ligação delta e reator trifásico imerso em óleo de 300 kVAr, 23,1 kV, ligação delta. As características técnicas desses equipamentos foram incorporadas ao modelo de fluxo de potência da rede, garantindo que a simulação representasse as condições operacionais reais da subestação e do alimentador selecionado. A escolha da topologia delta foi fundamentada na sua capacidade de reduzir correntes de neutro e melhorar o desempenho da compensação reativa em redes de média tensão.

Figura 12: Característica física do reator shunt



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Figura 13: Característica física do reator shunt



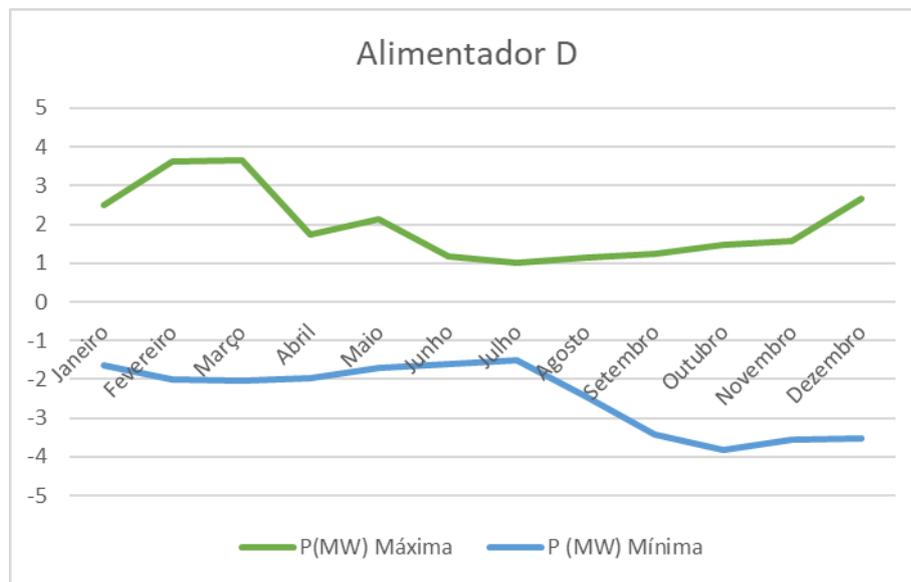
Fonte: Dados da pesquisa (2024)

#### 1.4 Características da rede avaliada

A análise do Alimentador D revelou padrões sazonais de consumo, fortemente influenciados pelas características agrícolas da região. O pico de demanda foi identificado no mês de fevereiro, coincidindo com períodos de elevada necessidade de irrigação e uso intensivo de equipamentos elétricos, especialmente devido ao crescimento e à colheita de culturas como soja e milho (EMATER/RS, 2023). O menor consumo ocorreu em outubro, quando há uma redução significativa da carga associada ao início da safra, com menor uso de sistemas elétricos de bombeamento e mecanização agrícola (IBGE, 2023).

O menor consumo foi registrado entre os meses de outubro e novembro, meses caracterizados pelo início das atividades de semeadura. Nessa etapa agrícola, a necessidade de irrigação e mecanização elétrica tende a ser menor do que na fase de crescimento e colheita (EMATER/RS, 2023; IBGE, 2023). Assim, confirma-se um comportamento sazonal comum em regiões com elevada produção agrícola, refletindo variações significativas da demanda ao longo do ano.

Figura 14: Consumo máximo e mínimo AL D



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Além do aspecto agrícola, a presença de unidades de Geração Distribuída (GD), sobretudo fotovoltaica, intensifica a intermitência de oferta e demanda de energia. Durante períodos de alta irradiação solar, como em março, verifica-se um aumento da exportação de energia para a rede. Essa injeção pode provocar picos de tensão em horários de baixa carga, exigindo sistemas de regulação para manter os níveis de tensão dentro dos limites aceitáveis (MAGHAMI, 2023; KUNDUR, 1994).

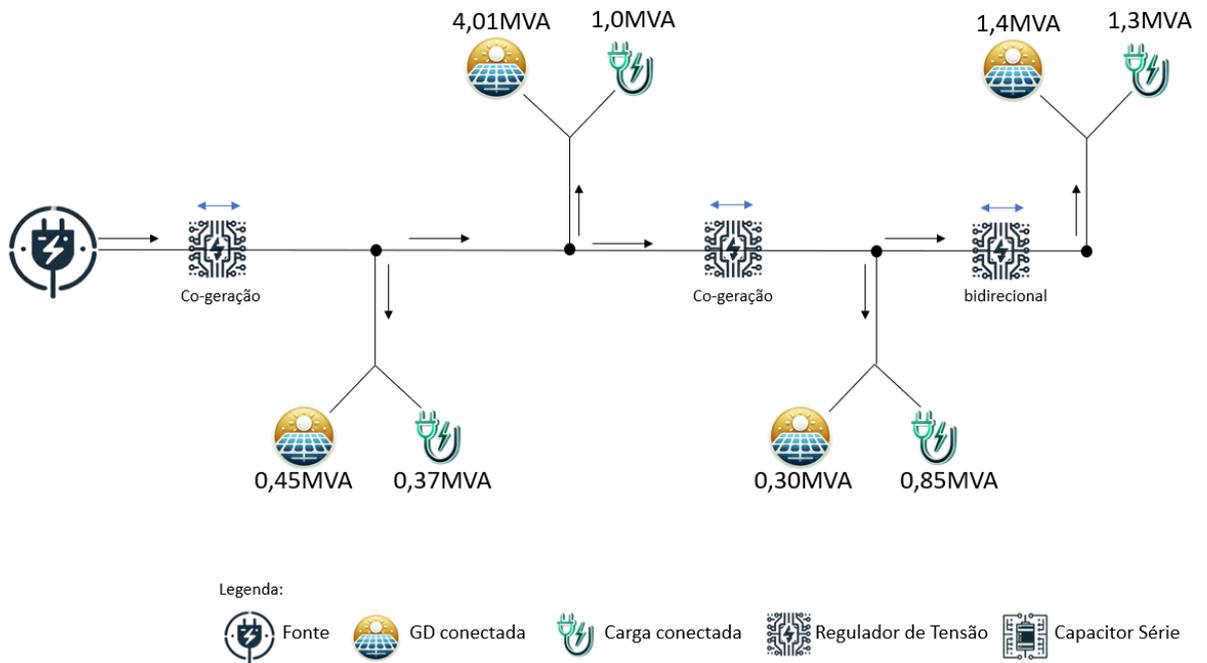
Portanto, a curva de carga do Alimentador D historicamente apresenta um comportamento sazonal, com variações significativas de consumo e injeção fotovoltaica influenciadas tanto pelas condições climáticas quanto pelas atividades agrícolas da região. Estudos anteriores já indicavam essa característica na rede elétrica de localidades com forte dependência do setor agropecuário, onde os ciclos de safra impactam diretamente a demanda por energia elétrica ao longo do ano (Costa et al., 2011; Farias et al., 2022). No entanto, os reflexos dessa sazonalidade nos níveis

de tensão da rede têm se agravado recentemente, devido ao expressivo crescimento da geração distribuída fotovoltaica (GDFV) instalada nos últimos anos. Esse aumento da GD, sem o devido acompanhamento de reforços na infraestrutura da rede, tem intensificado as oscilações de tensão, tornando necessário o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de gestão de carga e compensação reativa.

Diante desse contexto, a necessidade de dispositivos de controle de tensão torna-se cada vez mais evidente, especialmente em períodos de baixa carga e alta injeção de potência fotovoltaica, nos quais a rede elétrica opera com tendência à sobretensão. A implementação de soluções de compensação reativa, como reatores shunt, pode desempenhar um papel fundamental na estabilização dos níveis de tensão, garantindo que o fornecimento de energia permaneça dentro dos padrões regulatórios estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2022; 2023). Dessa forma, a análise realizada reforça a necessidade de planejamento técnico adequado para mitigar os impactos da intermitência da GD e preservar a qualidade da energia fornecida aos consumidores conectados ao Alimentador D.

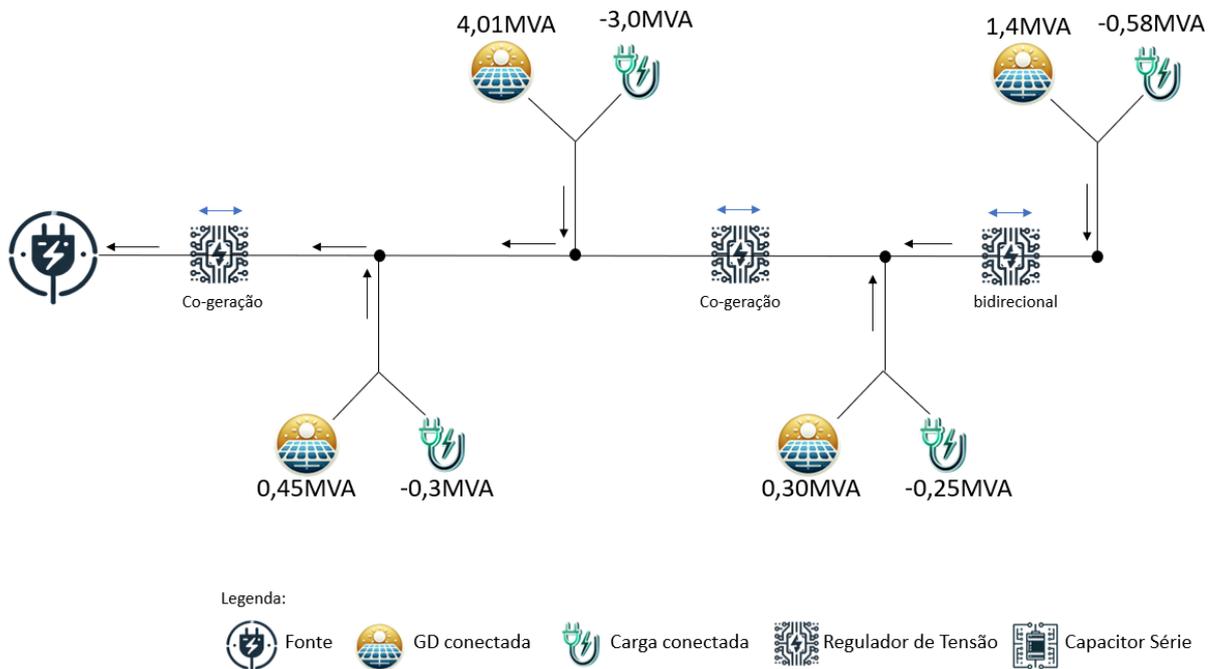
A seguir, são apresentados os diagramas unifilares do Alimentador D, correspondentes às condições de carga máxima e carga mínima registradas ao longo do período analisado. Essas cargas refletem os dias de maior e menor consumo, considerando exclusivamente as medições obtidas em operação normal da rede, sem influência de manobras operacionais. Os diagramas ilustram a disposição das cargas e das unidades de geração distribuída (GD) no sistema, proporcionando uma visão global da distribuição de potência e das interações entre consumo e geração ao longo do alimentador. Essa representação é essencial para a compreensão do comportamento da rede em diferentes condições operacionais, permitindo a análise detalhada dos pontos críticos de tensão e das necessidades de regulação do sistema.

Figura 15: Unifilar alimentador D – carga máxima



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Figura 16: Unifilar alimentador D – carga mínima



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Para avaliar as necessidades de correção do nível de tensão no sistema elétrico, ajustaram-se primeiramente os equipamentos de regulação existentes

(reguladores de tensão, transformadores com comutação sob carga, etc.) com base nos parâmetros operacionais vigentes, a fim de que as simulações representassem, com fidelidade, as condições reais de operação da rede (Kundur, 1994; Glover; Sarma; Overbye, 2011).

Em seguida, realizou-se a análise de tensão em cada ramal, cujos valores máximos e mínimos foram expressos em unidades por unidade (pu) — uma metodologia de normalização de grandezas elétricas que facilita a comparação e a interpretação de resultados em sistemas de potência (Machowski; Bialek; Bumby, 2008; El-Hawary, 2008). A Tabela 2 (ilustrativa) consolida essas medições, permitindo verificar o atendimento aos limites regulamentares definidos no Módulo 8 do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), que estabelece  $\pm 5\%$  em relação a 1,0 pu como faixa. Assim, tensões acima de 1,05 pu são consideradas sobretensões, enquanto valores abaixo de 0,95 pu caracterizam subtensões.

Esta avaliação do perfil de tensão viabilizou a identificação dos pontos críticos no alimentador, sinalizando a localização ideal para a instalação de dispositivos de compensação ou regulação, no intuito de aprimorar a qualidade da energia fornecida e de assegurar a conformidade com as normas regulatórias (Machowski; Bialek; Bumby, 2008). Vale ressaltar que os perfis de tensão apresentados nos diagramas unifilares posteriores contemplam as condições extremas (tensões mínimas e máximas) observadas ao longo de todo o alimentador. Tais valores não são, necessariamente, coincidentes no tempo, podendo ocorrer em diferentes intervalos sazonais ou horários de carga (Kundur, 1994).

Por fim, esses dados constituem a base técnica para definir onde e como alocar o equipamento proposto de acordo com as oscilações de tensão mapeadas. Esse embasamento assegura que eventuais investimentos em infraestrutura sejam direcionados aos trechos de rede com maior impacto positivo na estabilidade e qualidade do fornecimento de energia.

Tabela 2: Perfil de tensão alimentador D

	Tensão máxima (pu)	Tensão mínima (pu)
Carga máxima	0,986	0,923
Carga mínima	1,112	0,994

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Conforme ilustrado na Tabela 2, que apresenta o perfil de tensão no Alimentador D para os cenários de carga máxima e carga mínima, foram identificadas variações significativas nos valores de tensão ao longo da extensão do alimentador. Esses valores foram obtidos por meio de simulações computacionais, utilizando um software de análise de fluxo de potência, que permitiu reproduzir as condições operacionais reais da rede.

Para facilitar a interpretação dos resultados, adotou-se uma codificação de cores para representar a qualidade da tensão ao longo do alimentador. A cor vermelha indica uma condição crítica, em que a tensão está fora dos limites regulamentares, podendo comprometer a operação segura da rede e dos equipamentos conectados. A cor amarela aponta uma situação precária, onde os valores de tensão estão próximos dos limites normativos e podem exigir ajustes operacionais. Já a cor verde representa a faixa de tensão adequada, conforme os padrões estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST, que determina que a tensão deve ser mantida entre 0,95 pu e 1,05 pu em relação ao valor nominal (ANEEL, 2023).

O perfil de tensão do Alimentador D, portanto, serve como um instrumento de avaliação técnica para compreender o impacto da geração distribuída fotovoltaica (GDFV) na estabilidade do sistema e para identificar possíveis intervenções necessárias para correção dos níveis de tensão. A análise desses dados permite avaliar se as condições atuais do alimentador atendem aos requisitos regulatórios e quais medidas podem ser adotadas para mitigar oscilações, como a implementação de reatores shunt para compensação reativa.

## 2 REATOR SHUNT – COMPENSAÇÃO REATIVA E CORREÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÃO SDMT

Para atender ao segundo objetivo específico deste trabalho—averiguar a instalação de um reator shunt para a compensação reativa e correção dos níveis de tensão no sistema de distribuição de média tensão (SDMT)—foram selecionados para simulação dois reatores trifásicos imersos em óleo: um de 300 kVAr, 13,8 kV, com ligação em delta, e outro de 300 kVAr, 23,1 kV, também com ligação em delta.

Os reatores shunt são dispositivos essenciais para a absorção de potência reativa capacitiva excessiva em sistemas elétricos, especialmente em redes de distribuição com extensões significativas ou com grande quantidade de cabos subterrâneos que introduzem capacitância ao sistema (Kundur, 1994). A instalação desses reatores contribui para a estabilização dos níveis de tensão, evitando sobretensões que podem comprometer a integridade dos equipamentos e a qualidade do fornecimento de energia (El-Hawary, 2008).

A escolha de reatores trifásicos imersos em óleo se justifica pela robustez e confiabilidade em aplicações de média tensão. A ligação em delta é preferencial nesse contexto, pois permite a circulação de correntes de sequência zero internamente ao reator, reduzindo impactos de desequilíbrios e minimizando a propagação de correntes harmônicas no sistema (Grainger; Stevenson, 1994). As especificações de 300 kVAr e tensões nominais de 13,8 kV e 23,1 kV foram definidas com base nas necessidades de compensação reativa identificadas nas análises preliminares do SDMT e na característica física do equipamento (peso e tamanho). Dessa forma, assegura-se compatibilidade com os níveis de tensão operacionais e a capacidade adequada para mitigar os efeitos indesejados de potência reativa capacitiva no sistema.

Além disso, as simulações computacionais realizadas neste estudo consideraram a operação do reator shunt limitada ao período de maior incidência solar, compreendido entre 08h e 17h, quando a geração fotovoltaica atinge seus picos de. Esse intervalo foi definido com base nos dados operacionais da rede e nos perfis de geração da GDFV na região analisada, garantindo que a modelagem computacional representasse as condições reais de operação do sistema.

Fora desse período, o reator shunt não se faz necessário, pois sua principal função é absorver o excedente de potência reativa gerado pelas unidades

fotovoltaicas, evitando sobretensões e desequilíbrios na rede (Grainger; Stevenson, 1994). A ativação restrita ao horário de maior geração solar maximiza a eficiência operacional do equipamento, evitando o acionamento desnecessário em momentos de menor impacto da GD.

Do ponto de vista dos consumidores, a implementação dessa tecnologia pode resultar em um fornecimento de energia mais estável e seguro, minimizando oscilações de tensão e contribuindo para a preservação da vida útil de equipamentos elétricos. Além disso, a solução analisada auxilia a distribuidora na adequação aos limites regulatórios estabelecidos pelo PRODIST, garantindo a conformidade com os padrões de qualidade da energia elétrica e reduzindo a necessidade de intervenções corretivas frequentes (ANEEL, 2023).

### **3 GESTÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO**

Para alcançar o terceiro objetivo específico deste estudo—analisar a gestão de um Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT) que opere dentro dos níveis de tensão estabelecidos pelo PRODIST—foram realizadas simulações computacionais considerando a instalação de um reator shunt na rede de distribuição. Essas simulações foram conduzidas como parte da modelagem computacional descrita no resumo, utilizando um software especializado de análise de fluxo de potência amplamente empregado pela distribuidora de energia.

O processo de modelagem ocorreu após a coleta e análise dos dados operacionais do SDMT, permitindo que as simulações representassem com fidelidade as condições reais da rede. O objetivo dessas simulações foi avaliar a efetividade do reator shunt na compensação reativa e na estabilização dos níveis de tensão, verificando se a tecnologia garantiria conformidade com os padrões de qualidade estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST.

Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos nas simulações, destacando o impacto da instalação do reator shunt sobre a regulação da tensão, a redução de sobretensões e a melhoria da qualidade da energia fornecida aos consumidores. A partir dessa análise, discutem-se também as implicações para a gestão eficiente do SDMT, considerando a necessidade de planejamento técnico adequado para a integração de dispositivos de compensação reativa em redes com alta penetração de GDFV.

#### **3.1 Operação do SDMT Dentro dos Níveis de Tensão Estabelecidos pela ANEEL**

A manutenção dos níveis de tensão dentro dos limites regulamentares é fundamental para assegurar a qualidade e a confiabilidade do fornecimento de energia. O Módulo 8 do PRODIST estabelece que a tensão deva ser mantida entre 0,95 pu e 1,05 pu em relação ao valor nominal (PRODIST, 2010). Exceder esses limites pode causar:

- Perdas Técnicas: Tensões muito altas ou muito baixas elevam as correntes nos condutores e equipamentos, ampliando o nível de perdas (El-Hawary, 2008; Grainger; Stevenson, 1994).

- Degradação de Equipamentos: Sobretensões podem acelerar o desgaste de componentes como transformadores, cabos e dispositivos de proteção, enquanto subtensões afetam o desempenho de motores e cargas sensíveis (Machowski; Bialek; Bumby, 2008).
- Insatisfação dos Consumidores: Indústrias, comércios e residências sofrem com interrupções de processo, possíveis danos a equipamentos e custos adicionais de manutenção, resultando em reclamações e penalizações regulatórias.

Para manter a tensão dentro da faixa operacional de 0,95 pu a 1,05 pu e evitar impactos negativos na qualidade do fornecimento, a gestão do Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT) não deve se restringir apenas ao planejamento de novas linhas ou subestações. Torna-se essencial a adoção de estratégias de controle de tensão, capazes de acompanhar as variações sazonais de carga e a crescente inserção de geração distribuída (GD) fotovoltaica. Estudos mais recentes reforçam a necessidade de soluções flexíveis para mitigar oscilações de tensão e fluxos reversos de potência, principalmente em redes de distribuição com alta penetração de GD (El-Hawary, 2008; Santos; Oliveira; Costa, 2020).

Nesse contexto, o uso de dispositivos como reatores shunt, reguladores automáticos de tensão e transformadores com comutação sob carga desponta como uma abordagem eficaz para:

- Absorver ou injetar potência reativa, estabilizando os valores de tensão nos pontos de conexão;
- Reduzir manobras desnecessárias em equipamentos de regulação, prolongando a vida útil de ativos e diminuindo custos operacionais;
- Assegurar o cumprimento das metas de continuidade e qualidade (DEC, FEC) e, por consequência, o atendimento às exigências regulatórias (ANEEL, 2022:a).

A análise das simulações realizadas considerando a instalação do reator shunt neste trabalho, portanto, é parte de uma solução integrada de gestão de ativos e monitoramento contínuo, permitindo à concessionária manter os níveis de tensão

conforme estabelecido pelos requisitos do PRODIST (PRODIST, 2010) e, simultaneamente, maximizar a confiabilidade e eficiência do sistema de distribuição.

#### 4 SIMULAÇÕES COM A INSTALAÇÃO DO REATOR SHUNT

Para avaliar a eficiência do reator shunt na mitigação de sobretensões em redes com alta penetração de geração distribuída fotovoltaica (GDFV), foram realizadas simulações computacionais considerando o cenário de carga mínima. A escolha desse período se justifica pelo fato de que é o momento mais crítico para a operação da rede, quando há alta injeção fotovoltaica e baixa demanda de carga, resultando em elevação dos níveis de tensão ao longo do alimentador. Já no cenário de carga máxima, as simulações indicaram que não há violações dos limites de tensão estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST, uma vez que a demanda elevada contribui para o consumo da potência gerada, reduzindo a incidência de sobretensões (Kundur, 1994; Glover; Sarma; Overbye, 2011).

O estudo analisou a instalação de um reator trifásico imerso em óleo, de 300 kVAr, 13,8 kV, com ligação em delta, escolhido por sua capacidade de absorver potência reativa capacitiva e sua robustez em aplicações de média tensão (Machowski; Bialek; Bumby, 2008). Atualmente, não há reatores instalados no Alimentador D para compensação reativa. Assim, esta pesquisa visa avaliar se a implementação desse equipamento seria eficaz para corrigir os níveis de tensão, garantindo que permaneçam dentro da faixa regulamentar.

Inicialmente, a simulação considerou a instalação de um único reator de 300 kVAr, porém, verificou-se que essa potência não foi suficiente para manter toda a rede dentro dos parâmetros estabelecidos pelo PRODIST (0,95 pu a 1,05 pu). Dessa forma, simulações adicionais foram realizadas, e concluiu-se que a absorção de reativo necessária para corrigir as sobretensões demandaria a instalação de três reatores de 300 kVAr cada, totalizando 900 kVAr.

A definição das posições estratégicas para a instalação dos reatores foi baseada na análise dos pontos de maior violação de tensão ao longo do alimentador e no perfil de carga e geração, conforme identificado na simulação sem compensação reativa (El-Hawary, 2008). Para evitar concentração excessiva de reativo em trechos específicos da rede, os equipamentos foram distribuídos ao longo do alimentador, garantindo uma compensação equilibrada e uma melhoria uniforme dos perfis de tensão (Grainger; Stevenson, 1994).

A Tabela 3 apresenta o perfil de tensão do Alimentador D no período de carga mínima, comparando os valores antes e depois da instalação dos reatores shunt.

Tabela 3: perfil de tensão no alimentador D após a instalação do reator

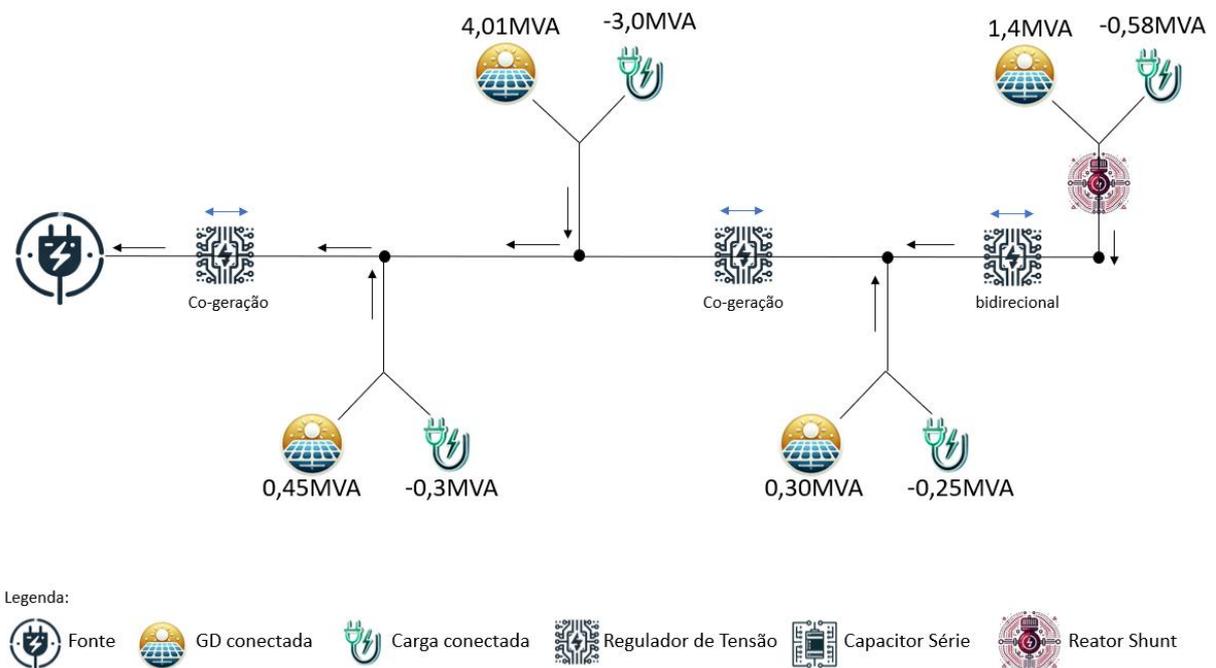
	Antes	Depois
Tensão máxima(pu)	1,112	1,019
Tensão mínima (pu)	0,994	0,992

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Os resultados evidenciam que a instalação dos reatores shunt permitiu reduzir as sobretensões no alimentador, enquadrando a tensão máxima dentro do limite de 1,05 pu definido pelo PRODIST. O valor máximo, que antes atingia 1,112 pu, foi reduzido para 1,019 pu, garantindo a conformidade com os padrões regulatórios. Já a tensão mínima apresentou uma leve variação, permanecendo dentro da faixa operacional estipulada.

Para complementar essa análise, a Figura X apresenta a disposição dos reatores ao longo do Alimentador D, ilustrando as posições estratégicas onde foram inseridos na simulação.

Figura 17: Localização de instalação do reator



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Esses resultados confirmam a viabilidade técnica da instalação dos reatores shunt como solução para mitigar sobretensões causadas pela alta penetração de GDFV em cenários de baixa carga. No entanto, a viabilidade econômica da implementação não foi objeto deste estudo e pode ser avaliada em pesquisas futuras, considerando custo de aquisição, instalação e benefícios associados à melhoria da qualidade da energia

## **5 ESCOPO DE INSTALAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO NOS SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO**

Este tópico tem como objetivo apresentar o escopo de instalação de um equipamento destinado a corrigir os níveis de tensão em um Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT) que sofre com sobretensões decorrentes da elevada penetração de geração fotovoltaica. A proposta de solução, embasada nos estudos e simulações realizados, envolve o uso de reatores shunt para absorver excedentes de potência reativa capacitiva, assegurando a qualidade de energia e o atendimento aos requisitos regulatórios. A seguir, são definidos o equipamento a ser implantado, suas características técnicas, as etapas de instalação e os benefícios esperados com sua aplicação no SDMT.

### **5.1 Definição do Equipamento e Características**

A escolha do equipamento a ser analisado nas simulações considerou diferentes fatores técnicos e operacionais, visando garantir compatibilidade com a infraestrutura existente do SDMT e otimizar a compensação de potência reativa na presença de alta penetração de geração distribuída fotovoltaica (GDFV). Após avaliação das opções disponíveis, optou-se pelo reator shunt trifásico imerso em óleo, com potência nominal de 300 kVAr e tensão de operação de 13,8 kV ou 23,1 kV, ligado em delta.

A definição desse equipamento foi fundamentada na análise de robustez, confiabilidade, adequação à potência reativa excedente e escalabilidade, sendo esses critérios essenciais para validar sua viabilidade técnica.

A Tabela 4 apresenta uma comparação entre diferentes configurações de reatores shunt, analisadas antes da escolha final do equipamento utilizado nas simulações.

Tabela 4: Comparativo de reatores

<b>Critério</b>	<b>Reator Shunt 150 kVAr</b>	<b>Reator Shunt 300 kVAr</b>	<b>Reator Shunt 500 kVAr</b>
<b>Robustez e Confiabilidade</b>	Boa estabilidade térmica, mas menor capacidade de absorção	Boa estabilidade térmica e compatibilidade com infraestrutura existente	Elevada capacidade de absorção, mas pode exigir reforço estrutural na instalação
<b>Adequação à Potência Reativa Excedente</b>	Insuficiente para compensação total da potência reativa gerada pela GDFV	Absorção suficiente para atenuar as sobretensões identificadas no estudo	Excedente para a demanda atual, podendo resultar em subutilização
<b>Escalabilidade</b>	Pode exigir instalação de múltiplas unidades para atender ao crescimento da GDFV	Modularidade permite instalação adicional conforme necessidade futura	Maior capacidade unitária, porém, requer planejamento mais complexo para expansão
<b>Manutenção e Operacionalidade</b>	Equipamento compacto, manutenção facilitada	Equipamento médio porte, compatível com padrões da distribuidora	Equipamento de grande porte, demanda maior espaço físico e manutenção especializada
<b>Custo de Aquisição e Implementação</b>	Baixo custo inicial, porém exige mais unidades para compensação adequada	Equilíbrio entre custo e desempenho, instalação simplificada devido ao porte similar a transformadores de distribuição	Alto custo inicial, com possível economia de escala em grandes instalações

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

O dispositivo escolhido é o reator shunt trifásico, imerso em óleo, com potência nominal de 300 kVAr e tensão de operação de 13,8 kV ou 23,1 kV, ligado em delta. Essa opção se justifica pela:

- **Robustez e Confiabilidade:** A ligação em delta reduz a circulação de correntes de sequência zero pela rede, além de manter boa estabilidade térmica (Grainger; Stevenson, 1994).
- **Adequação à Potência Reativa Excedente:** A capacidade de 300 kVAr atende aos cenários de baixa demanda e alta injeção fotovoltaica identificados nos estudos de fluxo (Machowski; Bialek; Bumby, 2008).
- **Escalabilidade:** Em caso de aumento futuro da penetração de geração distribuída, podem ser adicionados mais reatores ou ampliada a potência de cada equipamento.

## 5.2 Localização e dimensionamento do Alimentador

A definição da localização e do dimensionamento dos reatores shunt foi realizada com base nas análises de fluxo de potência, que permitiram mapear os pontos críticos de sobretensão ao longo do Alimentador D. Para garantir que a compensação reativa fosse eficaz e estrategicamente posicionada, foram adotados três critérios principais na escolha dos locais de instalação:

- Pontos de Violação de Tensão: Trechos do alimentador que, sem a compensação adequada, ultrapassavam o limite de 1,05 pu (ANEEL, 2022:a).
- Acesso para Operação e Manutenção: Preferência por estruturas de fácil acesso, para minimizar interrupções e reduzir custos operacionais (Cherbele, 2013).
- Viabilidade Construtiva: Verificação da capacidade física de postes ou pátios de subestação para instalação de bases, fundações e aterramentos adequados.

No cenário avaliado, chegou-se à necessidade de três unidades de 300 kVAr, totalizando 900 kVAr de reatância. A instalação de apenas um ou dois reatores não resultou nos níveis de tensão desejados, indicando que a rede exigia absorção adicional de reativo para controlar sobretensões no horário de pico fotovoltaico.

Além da configuração atual, foram realizadas simulações considerando cenários de crescimento da geração fotovoltaica, avaliando como a rede responderia a um aumento futuro da penetração da GDFV. Os resultados demonstraram que o crescimento da GD pode ocasionar novos picos de tensão, especialmente em horários de baixa demanda, tornando necessário um planejamento preventivo para futura expansão da compensação reativa. Dessa forma, a estratégia adotada para o posicionamento dos reatores não apenas corrige as sobretensões atuais, mas também permite ajustes futuros, garantindo que a solução seja escalável e adaptável às tendências de crescimento da geração distribuída.

### 5.3 Horário de operação do Reator Shunt

Considerando que a principal função do reator shunt é compensar a potência reativa apenas no período de alta geração (quando há incidência solar significativa), definiu-se a operação preferencial entre 08h e 17h. Esse intervalo coincide com o momento de maior disponibilidade de irradiação solar e, portanto, de maior propensão a sobretensões (Maghami et al., 2016). Fora desse período, a compensação de reativo se torna desnecessária, pois a rede passa a ter maior consumo do que geração, reduzindo drasticamente o excedente de potência fotovoltaica.

### 5.4 Implementação

A implantação do reator shunt segue um escopo inicial, baseado em critérios técnicos e operacionais para avaliar a viabilidade da tecnologia no controle de tensão em redes de distribuição. Como a solução ainda não foi implementada em campo, este estudo se concentra na aplicabilidade técnica, considerando aspectos de planejamento, dimensionamento e operação simulada. O tempo de execução, a operacionalidade e a definição detalhada dos processos de monitoramento e manutenção são aspectos que dependem das diretrizes e estratégias específicas de cada concessionária. Caso essa tecnologia venha a ser adotada na rede, tais fatores poderão ser analisados com maior precisão.

O escopo inicial para instalação do reator shunt pode ser estruturado em sete etapas principais:

#### 1. Levantamento de Dados e Modelagem

- a) Coletar informações de carga, geração fotovoltaica e topologia atualizada da rede.
- b) Modelar a rede para simulação de fluxo de potência, considerando diferentes cenários operacionais.

#### 2. Cálculos de Fluxo de Potência e Verificação de Curto-Circuito

- a) Avaliar a intensidade das sobretensões e quantificar o excedente de potência reativa.
- b) Garantir que a instalação do reator não comprometa os limites de curto-circuito dos equipamentos de manobra e proteção.

### **3. Dimensionamento Técnico**

- a) Confirmar a potência nominal necessária (kVAr) e a classe de tensão do equipamento.
- b) Definir os locais estratégicos de instalação, conforme análises de fluxo de potência.

### **4. Aquisição e Logística (Caso a tecnologia seja adotada no futuro)**

- a) Elaborar um Termo de Referência, especificando as características do equipamento e as condições de fornecimento.
- b) Planejar a logística de transporte e alocação em campo, considerando prazos de entrega e montagem.

### **5. Instalação e Comissionamento (Aplicável quando houver implementação)**

- a) Preparar a infraestrutura para receber o reator shunt.
- b) Realizar testes elétricos e funcionais, garantindo a integração do equipamento à rede e os ajustes de proteção.

### **6. Operação e Monitoramento (Considerado apenas em termos de aplicabilidade técnica neste estudo)**

- a) A concepção técnica prevê que o reator seja ativado nas janelas de maior incidência solar (08h-17h), ajustando-se automaticamente às condições da rede.
- b) O monitoramento dos indicadores de tensão e falhas, permitindo ajustes operacionais conforme necessário.

### **7. Manutenção Preventiva e Corretiva (Caso a tecnologia seja adotada futuramente)**

- a) Definir periodicidade de inspeção, incluindo análise de óleo isolante, testes nos terminais e verificação dos parâmetros de proteção.
- b) Planejar a substituição de componentes e reparos necessários, minimizando impactos em desligamentos programados.

Em síntese, este escopo inicial não estabelece um cronograma definitivo de implementação, pois a tecnologia ainda não foi instalada na rede elétrica. No entanto, o estudo demonstra a aplicabilidade técnica do reator shunt como solução para controle de tensão. Caso a tecnologia venha a ser utilizada, será possível avaliar com maior precisão os tempos de execução, as estratégias operacionais, a formação de

equipes e os procedimentos específicos de monitoramento e manutenção, conforme a realidade de cada concessionária.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O produto técnico-tecnológico "Viabilidade técnica e operacional da utilização de reatores shunt na gestão do sistema elétrico de potência para controle de tensão em regiões com elevado número de geração fotovoltaica" demonstrou ser uma solução promissora e relevante para os desafios impostos pela crescente inserção de GDFV no sistema de distribuição de média tensão do Rio Grande do Sul. A análise detalhada da rede, conduzida em etapas bem definidas, desde a seleção da subestação mais impactada até a parametrização dos reatores Shunt, forneceu subsídios técnicos robustos para atestar a viabilidade técnica e operacional da proposta.

As simulações e os dados empíricos apresentados evidenciaram a eficácia dos reatores Shunt trifásicos com ligação delta na mitigação das sobretensões decorrentes da intermitência da geração solar, contribuindo para a manutenção dos níveis de tensão dentro dos limites regulatórios. A aplicabilidade dessa tecnologia em redes rurais, comumente afetadas por essa problemática, ressalta o potencial de impacto regional do estudo, beneficiando diretamente cooperativas, concessionárias, produtores rurais e a comunidade em geral.

Do ponto de vista da gestão de organizações, o produto se alinha à área de concentração e à linha de pesquisa do PPGGEO da URI Santo Ângelo, ao promover a inovação, a sustentabilidade e o desenvolvimento através da aplicação de soluções tecnológicas para um problema concreto do setor energético. A proposta de um modelo de gestão proativa da rede elétrica, integrando monitoramento contínuo e ativação estratégica de equipamentos, demonstra o potencial de otimização da operação do sistema e a promoção da eficiência energética.

As contribuições do estudo são multifacetadas, abrangendo avanços no conhecimento científico por meio do modelo computacional de simulação, inovações tecnológicas na aplicação de reatores Shunt em contextos específicos de GDFV, e a proposição de um modelo de gestão inovador para redes elétricas. Adicionalmente, a produção científica associada a este trabalho tem o potencial de enriquecer o debate acadêmico e técnico sobre a gestão da energia descentralizada e o desenvolvimento de redes inteligentes.

A relevância social e o potencial de impacto regional do produto são inegáveis, especialmente em um estado com forte vocação agroindustrial como o Rio Grande do

Sul, onde a qualidade e a confiabilidade do fornecimento de energia são cruciais para o desenvolvimento econômico. A replicabilidade e a escalabilidade do modelo proposto abrem perspectivas para sua adoção em outras regiões que enfrentam desafios similares na gestão da GDFV.

Em conclusão, este produto técnico-tecnológico representa uma contribuição original e valiosa, alinhada aos objetivos do PPGGEO e aos critérios de avaliação da CAPES, demonstrando a capacidade da pesquisa aplicada em gerar soluções inovadoras e sustentáveis para as demandas do setor energético e da sociedade. Recomenda-se a continuidade da investigação, explorando a otimização dos sistemas de controle e a integração de outras tecnologias complementares, visando aprimorar a gestão do sistema elétrico de potência diante do cenário de crescente geração distribuída.

## REFERÊNCIAS

- ABDUL-RAHMAN, S.; ALI, M.; HASSAN, H. Using Shunt Reactors to Mitigate Voltage Fluctuations in High PV Penetration Grids. **Renewable Energy and Power Quality**, v. 10, p. 55-63, 2021.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Geração Distribuída**. 2022:a. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>. Acesso em: 2024.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Manual do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL**. Versão 2022:b. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/pesquisa-e-desenvolvimento>. Acesso em: 2024.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Brasília: ANEEL, 2023.
- CHEN, X.; WU, Y.; ZHANG, Y. Solar Photovoltaic Integration into Distribution Networks: A Reliability Assessment Approach. **Journal of Renewable Energy**, v. 35, p. 110-119, 2020.
- CHERBELE, L. Gerenciamento de ativos em redes de distribuição de energia elétrica. 2013. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2013. Disponível em: <https://abcobre.org.br/wp-content/uploads/2021/06/dissertacao-luciano-cherbele.pdf>.
- EL-HAWARY, M. E. **Introduction to Electrical Power Systems**. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2008.
- EMATER/RS – Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Rio Grande do Sul. **Informações sobre culturas agrícolas no estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2023. Disponível em: <https://www.emater.rs.gov.br>. Acesso em: 2024.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Painel de Dados de Micro e Minigeração Distribuída (PDGD)**. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/>. Acesso em: 2024.
- FARIAS, J. R. B.; SILVA, P. R. F.; NEUMAIER, N. **Cultivo de milho no Brasil: aspectos gerais e recomendações**. 2. ed. Londrina: Embrapa Soja, 2022.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. **Power System Analysis and Design**. 5. ed. Stamford: Cengage Learning, 2011.
- GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. **Power System Analysis**. New York: McGraw-Hill, 1994.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2023: Resultados preliminares**. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 2024.

JIANG, D.; XU, S. **Power System Stability Analysis with High Penetration of Solar PV**. *Journal of Sustainable Energy*, v. 25, n. 2, p. 10-21, 2019.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. New York: McGraw-Hill, 1994.

MACHOWSKI, J.; BIALEK, J. W.; BUMBY, J. R. **Power System Dynamics: Stability and Control**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.

MAGHAMI, M. R. **Impact of Photovoltaic Penetration on Medium Voltage Distribution Network**. 2023. Artigo. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/7/5613>. Acesso em: 2024.

SANTOS, F. A.; OLIVEIRA, L. R.; COSTA, M. R. Impacto das anomalias elétricas na qualidade do fornecimento de energia. **Revista Brasileira de Energia**, v. 26, n. 1, p. 55-72, 2020.