

Proposta de Análise dos Impactos no Sistema Elétrico Brasileiro de Média Tensão da Mini/Microgeração Distribuída em Seu Estágio Inicial

Proposal for Analysis of the Impacts on the Brazilian Medium-Voltage Electrical System of Mini/Micro Distributed Generation in Its Initial Stage

Felipe Luiz Krause¹

 orcid.org/0009-0009-5919-3963

Dr. Crescencio Silvio Segura Salas²

 orcid.org/0000-0003-4665-2082

Dr. Lúcio de Medeiros³

 orcid.org/0000-0001-7075-8966

M.Sc. Frank Toshioka⁴

 orcid.org/0000-0002-4944-8987

¹Discente do Curso Superior de Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, Curitiba-PR.
E-mail: krausefelipe@hotmail.com

²Docente do Curso Superior de Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, Curitiba-PR.
E-mail: silvio.salas@lactec.com.br

³Docente do Curso Superior de Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, Curitiba-PR.
E-mail: lucio.medeiros@lactec.com.br

⁴Engenheiro Eletricista, Companhia Paranaense de Energia, COPEL, Curitiba-PR.
E-mail: frank.toshioka@copel.com

DOI: 10.25286/rep.v10i3.3128

Esta obra apresenta Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.

Como citar este artigo pela NBR 6023/2018: Felipe Luiz Krause; Crescencio Silvio Salas; Lúcio de Medeiros; Frank Toshioka. Proposta de Análise dos Impactos no Sistema Elétrico Brasileiro de Média Tensão da Mini/Microgeração Distribuída em Seu Estágio Inicial. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v.10, n. 2, p. 1-10, 2025.

RESUMO

O aumento nas ligações de sistemas de mini e microgeração distribuída (MMGD), especialmente com fonte de energia solar fotovoltaica, tem sido notável, sendo favorecido também por incentivos regulatórios. No entanto, essa expansão traz desafios significativos para o sistema de distribuição de energia elétrica, como a sobrecarga de alimentadores, o risco de sobretensões e a deterioração da qualidade da energia, o que pode afetar a estabilidade do sistema e resultar em penalidades para as concessionárias. Compreender os impactos da MMGD no sistema elétrico brasileiro é essencial para desenvolver soluções que garantam a estabilidade e a qualidade do fornecimento de energia, além de apoiar uma transição energética mais sustentável e eficiente. Nesse cenário, esse artigo propõe uma metodologia para avaliar a MMGD nos sistemas de distribuição de média tensão, considerando aspectos técnicos e sugerindo medidas corretivas quando necessário. Por fim, é apresentada uma abordagem de análise qualitativa para entender o impacto atual da geração distribuída no sistema elétrico de média tensão.

PALAVRAS-CHAVE: geração distribuída (GD), reguladores de tensão na GD, violações de tensão na GD, sistemas fotovoltaicos.

ABSTRACT

The adoption of mini and micro distributed generation (MMDG) systems, particularly those based on photovoltaic solar energy, has grown significantly, supported by regulatory incentives. However, this expansion presents substantial challenges to the electricity distribution network, including feeder overloads, the risk of overvoltages, and a deterioration in power quality. These issues can negatively impact system stability and may result in penalties for utilities. Understanding the impacts of MMDG on the Brazilian electrical system is essential for developing solutions that ensure a stable and high-quality power supply, while also facilitating a more sustainable and efficient energy transition. In this context, this paper proposes a methodology for evaluating MMDG in medium-voltage distribution systems, taking into account technical aspects and recommending corrective actions where necessary. Finally, a qualitative analysis approach is proposed to assess the current impact of distributed generation on the medium-voltage electricity distribution network.

KEY-WORDS: distributed Generation (DG), voltage regulators in DG, voltage violations in DG, photovoltaic systems.

1 INTRODUÇÃO

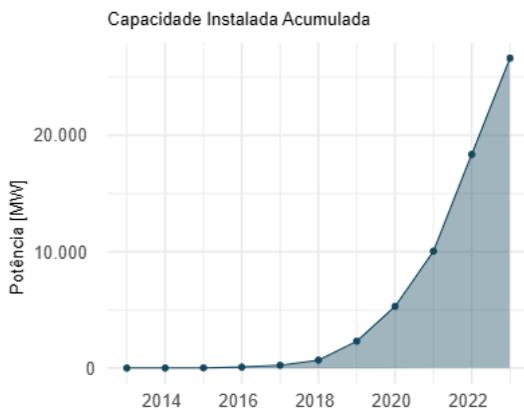
A Geração Distribuída (GD) é um modelo de geração de energia onde os sistemas geradores são instalados próximos às cargas e podem ser conectados diretamente à rede elétrica ou às instalações dos consumidores. Esse modelo oferece vantagens, como redução das perdas de transmissão, menor dependência da rede e promoção de fontes de energia limpa. [1]

No Brasil, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) criou a RN (Resolução Normativa) 482/2012 para regulamentar os sistemas de GD de pequeno porte, permitindo que o excedente gerado seja injetado na rede e compensado na fatura de energia. A resolução dividiu os sistemas em microgeração (até 75 kW) e minigeração (até 5 MW). Em 2016, a RN 687/2015 atualizou a RN 482/2012 para incluir modalidades como empreendimentos com múltiplas unidades consumidoras, geração compartilhada e autoconsumo remoto.

Em 2023, a RN 1.059/2023 revogou a RN 482/2012, consolidando o marco legal para mini e microgeração distribuída (MMGD) no CAPÍTULO XI da RN 1.000/2021. O objetivo das revisões nas resoluções foi fomentar o crescimento da MMGD como fonte limpa e alternativa de energia e adequar o crescimento desses sistemas às necessidades dos consumidores e concessionárias de energia.

A Figura 1 demonstra o crescimento significativo e exponencial de instalações de GD principalmente desde 2018.

Figura 1: Evolução da Capacidade Instalada de GD no Brasil

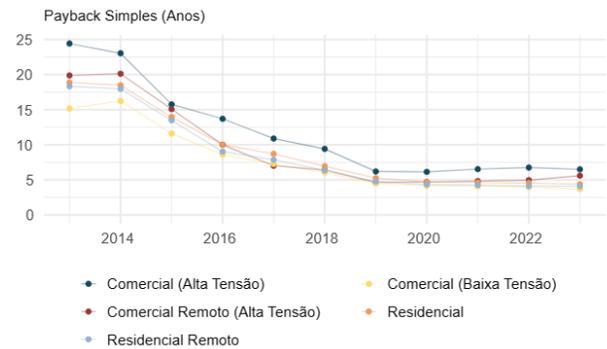


Fonte: [2]

A GD tem se expandido rapidamente, com a capacidade instalada acumulada praticamente

dobrando a cada ano. Além das revisões das resoluções impulsionarem esse crescimento pode-se incluir mais um fator incentivador, a redução dos custos de aquisição.

Figura 2: Retorno financeiro médio em anos de um sistema de MMGD



Fonte: [2]

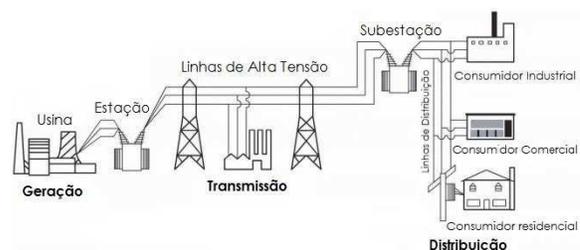
Na Figura 2 é possível observar que o retorno financeiro do capital investido nesses sistemas decaiu, especialmente de 2014 a 2019, sendo um fator importante na tomada de decisão para entrar no mercado de compensação de energia por sistemas de MMGD. Mas, apesar dos benefícios dos sistemas de MMGD, também existem desafios devido a esse sistema com geração multidirecional. Alguns dos efeitos causados por essa crescente integração de sistemas de GD foram citados por Bollen, M. H, Hassan, F. [3]:

- Aumento do risco de sobretensões em áreas remotas de um alimentador de distribuição.
- Deterioração da qualidade da energia devido as perturbações das GD.

Esses efeitos acabam por impactar diretamente o sistema de distribuição.

Em uma rede de distribuição tradicional, há uma única fonte de geração centralizada, e o sistema é composto por impedâncias nas diferentes etapas do circuito, até a entrada de serviço das unidades consumidoras de BT, representado na Figura 3.

Figura 3: Visão Geral do Sistema de Geração, Transmissão e Distribuição



Fonte: [4]

Cada uma dessas etapas tem uma impedância associada, o que leva a uma queda de tensão à medida que se avança de uma etapa para a próxima.

O Prodist, no módulo 8, que regula a qualidade do fornecimento de energia elétrica, define os parâmetros que determinam se a tensão está dentro de limites adequados, precários ou críticos, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Pontos de Conexão em Tensão Nominal de Igual ou Superior a 2,3kV e Inferior a 69kV

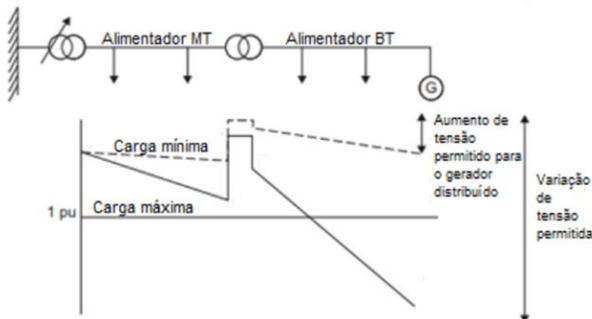
Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão de Leitura em Relação à Tensão de Referência (TL) em
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Fonte: [5]

Ou seja, com base nesses limites de tensão, os reguladores tensão são utilizados para manter a tensão dentro dos níveis desejados. A relação entre a tensão primária e secundária de um regulador varia conforme a carga e as impedâncias do circuito. Assim, tanto para a carga máxima quanto para a mínima exigida pelo alimentador, os limites de tensão devem ser respeitados.

No entanto, esse controle se torna mais desafiador com a inserção de gerações próximas à carga, como as gerações distribuídas (GD).

Figura 4: Controle de Tensão ao Longo de um Alimentador



Fonte: [6]

A Figura 4 ilustra o caso de um consumidor com GD localizado no final de um alimentador. Nesse cenário, o consumidor deve receber a tensão adequada durante a carga mínima. Porém, quando a geração distribuída atinge seu pico de produção, a carga mínima é reduzida, o que exige que o sistema de regulação se ajuste para evitar que a tensão ultrapasse o limite máximo e cause sobretensões para o consumidor. Além disso, as GD fotovoltaicas podem sofrer variações rápidas na geração devido a fatores como passagem de nuvens ou mudanças climáticas inesperadas, o que exige comutações

frequentes nos bancos reguladores de tensão (BRTs). Se essas comutações forem excessivas, isso pode prejudicar a vida útil e o desempenho dos BRTs, comprometendo sua capacidade de controlar a tensão no alimentador. Em casos extremos, o BRT pode perder a capacidade de compensar a sobretensão, resultando em falhas no sistema de regulação de tensão.

Assim, outro fator que justifica esse estudo são as multas pagas pelas concessionárias devido às violações dos limites de tensão. A ANEEL estabelece os indicadores de conformidade de nível de tensão em regime permanente na Tabela 1 e estabelece os valores pagos de compensação financeira aos consumidores que foram afetados por essas violações. A Tabela 2 demonstra os valores pagos devido a transgressão dos níveis de tensão por algumas das maiores concessionárias de energia.

Tabela 2: Indicadores de conformidade de nível de tensão em regime permanente nas maiores concessionárias dos estados com mais MMGD

Distribuidora	Ano	DRCe	DRPe	ICC	Qtde. Compens.	Vlr. Compens. (R\$)
Cemig-D	2020	0,00	0,10	1,00	42.250	4.607.304,81
Cemig-D	2021	0,35	0,55	13,18	37.933	3.782.333,69
Cemig-D	2022	0,39	0,89	16,64	49.555	6.322.741,77
Cemig-D	2023	0,46	1,08	16,23	63.642	11.684.873,75
Cemig-D	2024	0,54	1,06	18,36	74.982	22.148.747,37
Copel-Dis	2020	0,03	0,51	11,68	1.110	304.071,82
Copel-Dis	2021			0,00	1.731	216.503,04
Copel-Dis	2022			0,00	2.880	333.421,23
Copel-Dis	2023			0,00	4.197	501.974,67
Copel-Dis	2024	0,73	0,94	14,14	7.259	1.232.079,23
CPFL Paulista	2020	0,32	1,03	5,83	867	253.104,09
CPFL Paulista	2021	0,00	0,00	0,00	1.930	209.628,44
CPFL Paulista	2022	0,33	0,82	9,75	847	300.266,20
CPFL Paulista	2023	0,12	0,55	9,43	2.863	713.927,71
CPFL Paulista	2024	0,21	0,36	7,94	3.471	945.506,47

Fonte: [7]

Interessante notar a relação entre o aumento da capacidade instalada dos sistemas de MMGD no decorrer dos anos com o aumento dos valores pagos em compensação pelas concessionárias de energia (Tabela 2). Após os incentivos regulatórios e econômicos houve um crescimento dos sistemas de MMGD, o que resultou em um aumento das violações de tensão e, conseqüentemente, nas indenizações pagas.

Outra justificativa para esse estudo é que as concessionárias fazem grandes investimentos nos seus sistemas de distribuição a fim de reduzir as perdas técnicas e melhorar a qualidade de

atendimento e de serviço [8] [9]. Mas, dentro dessas melhorias ainda não se tem observado investimentos significativos pensados em minimizar os efeitos adversos advindos dos sistemas de MMGD, talvez exatamente pela falta de regulamentação e de estudos apontando essas necessidades.

Por isso, o objetivo desse estudo é propor uma metodologia para analisar os impactos da mini e microgeração distribuída (MMGD) nos sistemas de distribuição de média tensão, avaliando aspectos técnicos e sugerindo medidas mitigatórias quando necessário.

Para que esse objetivo seja atingido serão necessárias as seguintes etapas:

- Analisar o crescimento da capacidade instalada de MMGD em relação às violações de tensão acumuladas em um alimentador de média tensão, entendendo a integração da GD e suas implicações no sistema elétrico.
- Avaliar a evolução das violações de tensão ao longo do tempo em um alimentador sem controle de tensão, como regulador de tensão, em decorrência do aumento da MMGD.
- Estudar os efeitos da injeção de potência de usinas de MMGD nas violações de tensão em um alimentador exclusivo de média tensão.
- Propor um procedimento para análise qualitativa do impacto atual da GD no sistema elétrico de média tensão.

2 MÉTODO UTILIZADO

2.1 PRIMEIRA ETAPA DO MÉTODO

Na primeira fase do método, é necessário selecionar um alimentador de média tensão de uma subestação para análise. Os critérios para essa escolha incluem:

a) Maior Quantidade de MMGD: Optar pelo alimentador que possui o maior número de mini e microgerações distribuídas (MMGD) atualmente.

b) Maior Potência Instalada de MMGD: Escolher o alimentador com a maior potência instalada total de MMGD.

c) Exclusividade em Minigerções: Focar em um alimentador que tenha apenas sistemas de minigerção distribuída.

d) Comparativo Sem MMGD: Selecionar um alimentador que não tenha nenhum sistema de MMGD, para facilitar a comparação.

e) Menor Quantidade de MMGD: Escolher um alimentador que possua a menor quantidade de MMGD.

f) Menor Potência Instaladas: Focar em um alimentador com a menor potência instalada de MMGD.

Esses critérios foram definidos para abranger uma variedade de cenários de sistemas de mini e microgeração em um alimentador de média tensão. Entretanto, para a análise dos impactos iniciais da MMGD, os critérios a), b) e c) são considerados os mais relevantes, pois cobrem as situações com maior número e potência de MMGD.

2.2 SEGUNDA ETAPA DO MÉTODO

Na segunda fase, serão coletados dados sobre a potência ativa (em MW), a potência de geração instalada do circuito e a irradiação solar local.

Potência Ativa do Alimentador: Esses dados são registrados pela concessionária em medidores instalados na saída dos alimentadores da subestação, permitindo calcular a energia ativa mensal consumida (em MWh).

Potência de Geração de Sistemas de MMGD: As potências de geração de cada sistema de GD são armazenadas pela concessionária nos projetos de ligação das unidades com MMGD.

Irradiação Solar: Os dados de irradiação solar podem ser obtidos de fontes como o Global Solar Atlas [10], que fornece informações sobre o potencial solar na região.

Com essas informações, é possível calcular a energia mensal gerada utilizando a equação:

$$\text{Energia Gerada Mensal} = \sum_{i=1}^n P_i \times P_{med} \times D \quad (1)$$

Onde:

- P_i = Potência de geração instalada da usina i (kW);
- P_{med} = Potencial médio de geração diário da região (kWh/kW);
- D = Quantidade de dias do mês.

Esse cálculo permite estimar a energia total gerada pelos sistemas de MMGD ao longo de um mês.

2.3 TERCEIRA ETAPA DO MÉTODO

Na terceira etapa, serão apresentados dados sobre a energia gerada pelos sistemas de mini e microgeração distribuída (MMGD) em comparação com a energia consumida no alimentador. Esses

dados serão organizados em tabelas e representados graficamente para facilitar a visualização da relação entre a geração e o consumo de energia.

2.4 QUARTA ETAPA DO MÉTODO

Na quarta etapa, serão coletados dados de medição da tensão de linha do circuito, que são registrados por medidores instalados na saída dos alimentadores de média tensão nas subestações. A análise se concentrará em medidores de faturamento já existentes nas subestações, que estão instalados para monitoramento. Esses medidores registram dados em tempo real, mas os resultados serão organizados em médias horárias.

Com as medições de tensão, serão identificados períodos de violação de tensão precária e crítica, de acordo com as seguintes definições:

Tensão Precária: $0,90 \times TR \leq TL < 0,93 \times TR$ (2)

Tensão Crítica: $TL < 0,90 \times TR$ ou $TL > 1,05 \times TR$ (3)

Onde:

- TR é a Tensão de Referência.
- TL é a Tensão de Leitura.

Esses dados permitem a construção de um gráfico que mostra a quantidade de violações de tensão acumuladas em relação ao aumento da geração de energia.

2.5 QUINTA ETAPA DO MÉTODO

Na quinta etapa, será feita uma análise dos dados coletados para verificar a relação entre o aumento da geração distribuída (GD) e a energia consumida, além dos impactos no sistema. Os critérios de análise incluem os itens a seguir.

Período de Análise: A avaliação abrange um período específico em que todos os dados necessários foram coletados, permitindo uma análise abrangente.

Variáveis Consideradas: Quatro variáveis principais serão analisadas: capacidade instalada de MMGD, violações de tensão precária, violações de tensão crítica e violações acumuladas.

Foco na Capacidade de Geração: Um dos objetivos é acompanhar o crescimento da capacidade de MMGD ao longo do tempo, observando seus impactos no sistema elétrico.

Registro de Violações de Tensão: Serão documentadas as ocorrências de tensões precárias e críticas, ajudando a identificar padrões de estabilidade.

Identificação de Eventos Significativos: Serão registrados eventos que possam indicar problemas ou tendências relevantes no sistema elétrico.

Comparação Temporal: Os dados serão comparados ao longo do período para identificar tendências e variações que possam afetar as condições elétricas.

Esses critérios ajudarão a estruturar uma análise detalhada, possibilitando identificar variações importantes causadas pela introdução de sistemas de MMGD e sugerir melhorias para o sistema elétrico.

3 APLICAÇÃO DO MÉTODO

O método foi aplicado em alimentadores de subestações da concessionária de distribuição de energia da COPEL, do estado do Paraná. Mas a mesma metodologia pode ser aplicada em outras concessionárias.

3.1 ALIMENTADOR DE SUBESTAÇÃO COM MAIOR QUANTIDADE DE MMGD

Foi selecionada uma subestação de média tensão com dois alimentadores por apresentar a maior quantidade de sistemas de microgeração distribuída (MMGD) no momento. Assim, na barra de 13,8kV os dois alimentadores supriam energia para 2310 unidades consumidoras, sendo dessas 114 unidades com sistema de MMGD.

Os dados de potência ativa e os dados de tensão de linha foram coletados dos dois sistemas de medição instalados um que cada alimentador de saída da barra de 13,8kV da subestação.

A energia mensal gerada dos sistemas de MMGD foram calculados a partir da Equação (1) levando em conta a irradiação da região. O estudo utilizou dados de consumo e geração de energia entre abril de 2020 e novembro de 2022.

A partir desses dados foi possível estabelecer as relações apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Dados comparativos do caso 1

Data	Potência instalada acumulada (kW)	Potencial de geração mensal (kWh/kW)	Energia Gerada (MWh)	Energia Consumida (MWh)	Quantidade de violações de tensão acumuladas
abr/20	88,3	4,416	11,7	1.648,19	0
mai/20	98,74	3,898	11,55	1.516,53	0
jun/20	102,7	3,719	11,46	1.539,07	0
jul/20	102,7	4,001	12,33	1.543,41	0
ago/20	102,7	4,43	13,65	1.601,18	0
set/20	102,7	4,308	13,27	1.875,55	0
out/20	102,7	4,266	13,14	2.023,46	0
nov/20	102,7	4,424	13,63	1.907,97	0
dez/20	105,7	4,208	13,34	1.955,38	0
jan/21	125,2	4,119	15,47	1.819,46	0
fev/21	170,8	4,335	22,21	1.705,94	0

Proposta de Análise dos Impactos no Sistema Elétrico Brasileiro de Média Tensão da Mini/Microgeração Distribuída em Seu Estágio Inicial

Data	Potência instalada acumulada (kW)	Potencial de geração mensal (kWh/kW)	Energia Gerada (MWh)	Energia Consumida (MWh)	Quantidade de violações de tensão acumuladas
mar/21	177,61	4,585	24,43	1.933,96	0
abr/21	192,59	4,416	25,51	1.692,77	0
mai/21	215,59	3,898	25,21	1.563,55	0
jun/21	226,59	3,719	25,28	690,13	0
jul/21	228,99	4,001	27,49	1.460,03	0
ago/21	231,69	4,43	30,79	1.720,51	0
set/21	327,19	4,308	42,29	1.593,61	0
out/21	356,19	4,266	45,59	1.566,16	0
nov/21	383,79	4,424	50,94	1.768,07	0
dez/21	417,29	4,208	52,68	1.973,43	1
jan/22	435,03	4,119	53,76	878,79	1
fev/22	443,03	4,335	57,62	1.590,68	1
mar/22	496,56	4,585	68,3	1.906,46	1
abr/22	507,28	4,416	67,2	1.550,01	2
mai/22	579,97	3,898	67,82	1.484,88	2
jun/22	579,97	3,719	64,71	1.409,27	3
jul/22	596,77	4,001	71,63	1.589,64	3
ago/22	674,77	4,43	89,68	1.506,31	3
set/22	710,79	4,308	91,86	1.482,49	3
out/22	743,79	4,266	95,19	1.585,35	3
nov/22	788,79	4,424	104,69	1.547,87	7

Fonte: Os autores.

A partir dos dados obtidos na Tabela 3 pode-se extrair algumas informações relevantes do estudo que estão descritas a seguir.

3.1.1 Energia gerada pela GD e energia consumida nos alimentadores

A informação da energia gerada pela GD em comparação com a energia consumida é importante para entender a relação entre essas grandezas.

Na Figura 5, o gráfico foi extraído dos dados da Tabela 3, sendo a energia consumida pelos alimentadores representada no eixo vertical à esquerda, enquanto a energia gerada pela GD aparece no eixo vertical à direita.

Figura 5: Energia Gerada Pela GD e Energia Consumida nos Alimentadores



Fonte: Os autores.

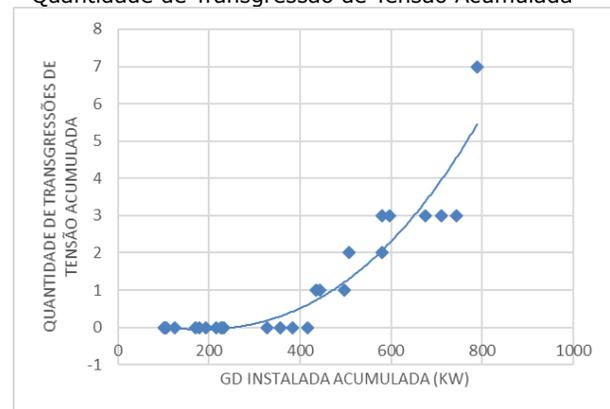
Ao comparar, ao longo do tempo, a energia gerada pela GD com a energia consumida pelos alimentadores, nota-se uma variação no consumo, especialmente em dois períodos, junho de 2021 e

janeiro de 2022. Contudo, a curva de tendência indica uma redução na energia consumida, sendo essa informação mais relevante do que conhecer o consumo exato mês a mês. Em relação à energia gerada, observa-se um aumento constante e regular, o que já era esperado devido ao crescimento das novas ligações de MMGD.

3.1.2 Relação entre Quantidade de Transgressão de Tensão Acumulada com o Crescimento da GD Instalada (kW)

Os dados de tensão de linha foram coletados e comparados a partir das equações (2) e (3). Como nesse estudo o que importa é a violação de tensão, sem levar em conta se foi uma violação precária ou crítica, na Tabela 3 foram somados os eventos como violação de tensão acumulados. A partir desses dados com o incremento das gerações de GD obtivemos o gráfico da Figura 6.

Figura 6: Crescimento da GD Instalada X Quantidade de Transgressão de Tensão Acumulada



Fonte: Os autores.

A Figura 6 mostra um crescimento constante da GD, com poucos registros de violações de tensão ao longo do período. No entanto, a ocorrência de violações de 4 violações de tensão somente no mês de novembro de 2022, último mês da análise, em comparação com as 7 ocorrências em todo o período analisado, sugere que o aumento da GD pode impactar na qualidade da tensão.

3.1.3 Análise dos resultados

Quanto a potência instalada, energia consumida e energia gerada pelos sistemas de MMGD pode-se observar um crescimento constante das GD, de 88,3kW em abril de 2020 para 788,79kW em novembro de 2022. Apesar das gerações de GD no

período de análise serem numa escala menor do que a energia consumida ainda é possível notar um decréscimo da linha de tendência da energia consumida, do gráfico da Figura 5. Isso vai de encontro ao esperado que o decréscimo da energia consumida à medida que o autoconsumo das GD aumenta.

Quanto a quantidade de violações de tensão no período de 29 meses analisados tendo a ocorrência de apenas 7 violações de tensão pode não representar a realidade nesse caso. O principal motivo é devido a influência de dois BRTs (Bancos Reguladores de Tensão) instalados a montante da medição que afetam os dados de tensão obtidos na barra de 13,8kV.

Isso significa que apenas 7 violações de tensão não puderam ser corrigidas pelos Reguladores de Tensão, e não se trata do total de violações que provavelmente ocorreriam na ausência deles. Esses poucos pontos resultaram no gráfico da Figura 6 que apresenta uma tendência crescente. Com os dados de tensão anteriores à intervenção dos BRT, o gráfico provavelmente teria mostrado uma curva de acomodação ao longo do tempo.

3.2 ALIMENTADOR DE SUBESTAÇÃO COM MAIOR QUANTIDADE E POTÊNCIA DE MMGD

Nesse caso, foi escolhido um alimentador de média tensão de uma subestação que combinasse a maior quantidade de sistemas de geração distribuída com a maior potência instalado de sistemas de MMGD no alimentador.

O alimentador escolhido é em 34,5kV numa subestação de 138kV com vários alimentadores em 13,8kV e 34,5kV. Esse alimentador possui 1.147 unidades consumidoras, sendo 47 unidades com sistemas de MMGD com capacidade instalada até novembro de 2022 de 1.126,27kW.

Os dados de potência ativa e os dados de tensão de linha foi coletado do sistema de medição instalado no alimentador de saída da barra de 34,5kV da subestação.

A energia gerada mensal foi calculada a partir da Equação (1) levando em conta a irradiação da região. O estudo utilizou dados de consumo e geração de energia entre abril de 2020 e novembro de 2022.

A partir desses dados são apresentadas as relações na Tabela 4.

Tabela 4: Dados comparativos do caso 2

Data	Potência instalada acumulada (kW)	Potencial de geração mensal (kWh/kW)	Energia Gerada (MWh)	Energia Consumida (MWh)	Quantidade de violações de tensão acumuladas
abr/20	35	5,498	5,77	3293,24	0
mai/20	35	4,763	5	3352,98	0
jun/20	37,7	4,653	5,26	3003,9	0
jul/20	37,7	5,15	5,82	3157,72	2
ago/20	37,7	5,554	6,28	2391,4	4
set/20	52,7	4,747	7,51	2461,58	5
out/20	52,7	4,702	7,43	2754,85	7
nov/20	52,7	5,555	8,78	2485,76	7
dez/20	160,4	5,197	25,01	4171,99	9
jan/21	175,4	4,714	24,81	3666,68	9
fev/21	175,4	5,096	26,82	1204,88	12
mar/21	205,4	5,414	33,36	4533,53	13
abr/21	205,4	5,498	33,88	3012,61	17
mai/21	205,4	4,763	29,35	2218,02	17
jun/21	215,4	4,653	30,07	1578,62	17
jul/21	220,4	5,15	34,05	1729,82	17
ago/21	220,4	5,554	36,72	2189,64	20
set/21	220,4	4,747	31,39	2240,36	20
out/21	220,4	4,702	31,09	1923,07	20
nov/21	223,4	5,555	37,23	1621,71	20
dez/21	323,4	5,197	50,42	3129,82	20
jan/22	330,9	4,714	46,8	3687,84	20
fev/22	372,36	5,096	56,93	3668,66	20
mar/22	393,36	5,414	63,89	4800,49	20
abr/22	407,6	5,498	67,23	4021,8	20
mai/22	502,6	4,763	71,82	1875,08	20
jun/22	722,6	4,653	100,87	2148,55	28
jul/22	954,64	5,15	147,49	1987,6	28
ago/22	1029,64	5,554	171,56	1738,87	28
set/22	1071,27	4,747	152,56	2685,9	29
out/22	1126,27	4,702	158,87	3638,39	29
nov/22	1126,27	5,555	187,69	3344,93	29

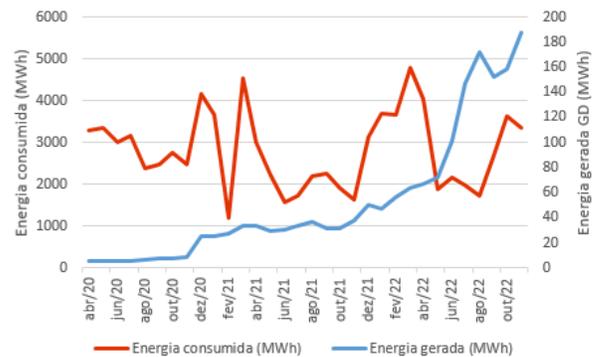
Fonte: Os autores.

A partir dos dados obtidos na Tabela 4 pode-se extrair algumas informações que serão comentadas a seguir.

3.2.1 Energia gerada pela GD e energia consumida nos alimentadores

A informação da energia gerada pela GD em comparação com a energia consumida é importante para entender a relação entre essas duas grandezas.

Figura 7: Energia Gerada pela GD e Energia Consumida no Alimentador



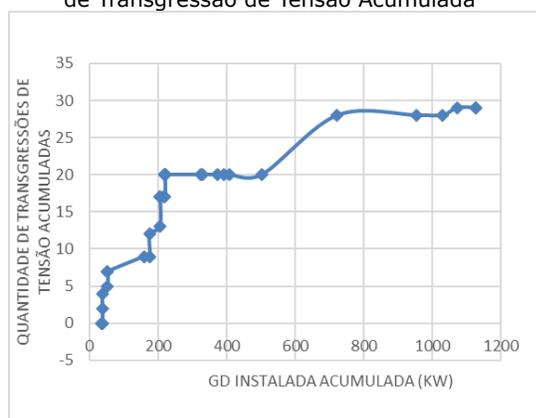
Fonte: Os autores.

Na Figura 7, o gráfico foi obtido a partir dos dados da Tabela 4, com a energia consumida pelo alimentador representada no eixo vertical à esquerda e a energia gerada pela GD no eixo vertical à direita. Ao analisar a comparação entre a energia gerada pela GD e a energia consumida pelo alimentador ao longo do tempo, observa-se uma variação no consumo, com destaque para os períodos de fevereiro/2021, junho/2021, julho/2021 e agosto/2022. No entanto, a curva de mostra uma tendência de diminuição no consumo de energia, o que se revela mais significativo do que o acompanhamento detalhado mês a mês do consumo. Quanto à energia gerada, percebe-se um aumento contínuo e regular, o que era esperado em função da expansão das novas conexões de MMGD.

3.2.2 Relação entre Quantidade de Transgressão de Tensão Acumulada com o Crescimento da GD Instalada (kW)

Os dados de tensão de linha foram obtidos e analisados com base nas equações (2) e (3). Como o foco deste estudo está nas violações de tensão, independentemente de serem consideradas precárias ou críticas, na Tabela 4 os eventos foram contabilizados como violações de tensão acumuladas. Com esses dados e o aumento das gerações de GD, gerou-se o gráfico apresentado na Figura 8.

Figura 8: Crescimento da GD Instalada X Quantidade de Transgressão de Tensão Acumulada



Fonte: Os autores.

Na Figura 8, é possível notar que, à medida que a geração distribuída instalada acumula aumenta, há um aumento no número de casos de violações de tensão acumuladas. No entanto, durante o período analisado, observa-se uma tendência de

estabilização nas ocorrências de transgressões de tensão.

3.2.3 Análise dos resultados

Neste estudo de caso, não houve a influência do BRT sobre a subestação, o que resultou em 29 ocorrências de violação de tensão, um número superior ao registrado no primeiro caso. No primeiro caso, o alimentador analisado estava sob a influência do BRT antes da coleta dos dados, o que acabou mascarando algumas interferências de violação de tensão causadas pela GD.

Assim, a avaliação desse alimentador entre abril de 2020 e novembro de 2022 forneceu uma visão mais detalhada das condições elétricas, com foco na geração instalada acumulada e nas violações de tensão acumuladas.

Ao longo do período observado, constatou-se um aumento gradual na geração instalada acumulada, que passou de 35 kW em abril de 2020 para 1.126,27 kW em novembro de 2022. Esse crescimento reflete uma possível resposta à crescente demanda por energia ou a um estímulo para a adoção de fontes de energia renováveis.

Por outro lado, as violações de tensões apresentaram variações ao longo do tempo. Um caso notável ocorreu em junho de 2022, quando se observou um aumento significativo nas violações, com 8 ocorrências de violação de tensão. Este evento exige uma análise mais aprofundada para identificar as possíveis causas, especialmente considerando o crescimento da geração distribuída nesse período.

3.3 ALIMENTADOR DE SUBESTAÇÃO EXCLUSIVO DE MINIGERAÇÃO

No terceiro caso, foi avaliada a influência das MMGD em um alimentador dedicado exclusivamente a sistemas de minigeração distribuída. O alimentador analisado opera em 34,5 kV e se origina de uma subestação de 138 kV. Tem uma extensão total de 6.743 metros para atender apenas a 4 consumidores, todos equipados com sistemas de minigeração, ligados diretamente em 34,5 kV. As quatro unidades consumidoras (UCs) foram conectadas ao sistema no final de fevereiro de 2021, ou seja, antes dessa data, o alimentador não tinha carga nem geração associada.

Os dados de potência ativa e de tensão de linha foram obtidos a partir do sistema de medição instalado no alimentador de saída da barra de 34,5

kV da subestação. A energia mensal gerada foi calculada utilizando a Equação (1), levando em consideração a irradiação solar da região. O estudo analisou os dados de consumo e geração de energia no período de fevereiro de 2021 a novembro de 2022.

Com base nesses dados, foram estabelecidas as relações apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Dados comparativos do caso 3

Data	Potência instalada acumulada (kW)	Potencial de geração mensal (kWh/kW)	Energia Gerada (MWh)	Energia Consumida (MWh)	Quantidade de violações de tensão acumuladas
fev/21	3000	4,343	52,116	0	13
mar/21	3000	4,461	401,49	5,25	32
abr/21	3000	4,484	403,56	2,19	52
mai/21	3000	4,022	361,98	-6,04	88
jun/21	3000	3,85	346,5	8,05	97
jul/21	3000	4,122	370,98	117,5	98
ago/21	3000	4,51	405,9	165,7	104
set/21	3000	4,402	396,18	222,35	126
out/21	3000	4,314	388,26	242,4	155
nov/21	3000	4,37	393,3	268,49	190
dez/21	3000	4,239	381,51	404,59	213
jan/22	3000	4,092	368,28	410,52	240
fev/22	3000	4,343	390,87	352,3	274
mar/22	3000	4,461	401,49	298,08	306
abr/22	3000	4,484	403,56	-19,21	333
mai/22	3000	4,022	361,98	-89,06	347
jun/22	3000	3,85	346,5	-85,19	361
jul/22	3000	4,122	370,98	-58,96	376
ago/22	3000	4,51	405,9	-35,19	399
set/22	3000	4,402	396,18	-42,27	416
out/22	3000	4,314	388,26	-21,36	435
nov/22	3000	4,37	393,3	5,08	444

Fonte: Os autores.

3.3.1 Energia gerada pela GD e energia consumida no alimentador

Neste caso específico, o alimentador é dedicado exclusivamente às usinas de geração, o que significa que a carga é muito baixa, composta principalmente pela impedância dos cabos e pelos sistemas auxiliares das usinas de geração distribuída. Vale destacar que todas as quatro usinas foram conectadas em fevereiro de 2021 e desde então não houve a adição de novas cargas ou sistemas de geração. Dessa forma, o gráfico e as funções que comparam a energia gerada pela geração distribuída e a energia consumida no alimentador não fornecem resultados significativos, pois não há aumento ou variação de geração e o consumo é mínimo, limitado apenas à manutenção dos sistemas de geração.

3.3.2 Relação entre Quantidade de Transgressão de Tensão Acumulada com o Crescimento da GD Instalada (kW)

Os dados de tensão de linha foram coletados e analisados utilizando as equações (2) e (3). Como o

objetivo principal deste estudo é analisar as violações de tensão, independentemente de serem classificadas como precárias ou críticas, na Tabela 5 os eventos foram registrados como violações de tensão acumuladas.

Essa análise tem como objetivo mostrar a relação entre a quantidade de violações de tensão de linha, que ocorrem quando as tensões ficam fora dos limites permitidos pela ANEEL, e o aumento das potências acumuladas de GD (Geração Distribuída). No entanto, como não houve incremento ou variação nas potências instaladas de GD após fevereiro de 2021, quando as 4 usinas de minigeração distribuída foram conectadas, a quantidade de violações de tensão não é influenciada pelo crescimento da GD, já que a geração permanece constante.

Ao correlacionar a geração instalada acumulada de GD com o número de violações de tensão acumuladas mensalmente, e excluindo dados irrelevantes para a GD, obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 5, sendo registrados pelo alimentador um total de 444 violações de tensão acumuladas. Essa informação é importante, pois pode ser utilizada para prever as possíveis penalidades associadas a futuras infrações de tensão causadas pelos sistemas de mini e microgeração distribuída.

3.3.3 Análise dos resultados

Na Tabela 5, apesar de a quantidade de geração instalada permanecer constante, devido às características desse alimentador, que foi projetado exclusivamente para atender às usinas de minigeração ligadas no mesmo mês, observa-se um número de violações de tensão muito superior aos dos casos 1 e 2. Isso ocorre porque cada uma das 4 usinas têm uma capacidade de 750 kW e estão conectadas a um alimentador exclusivo, o que resulta em uma grande potência de fluxo reverso.

Os dados mostram um aumento nas ocorrências de violação de tensão acumuladas ao longo dos meses, totalizando 444 ocorrências em novembro de 2022. Esse é um indicativo preocupante, já que violações frequentes podem afetar a qualidade do fornecimento de energia.

Esses resultados confirmam um dos principais problemas da Geração Distribuída: as sobretensões nos alimentadores, além do fluxo reverso na barra da subestação, situação confirmada pelo registro na Tabela 5, apresentando energia consumida negativa, durante vários meses.

4 CONCLUSÃO

A injeção de potência dos sistemas de MMGD (mini e microgeração distribuída) pode causar elevação de tensão nos alimentadores, especialmente quando a potência injetada é significativa.

No Caso 1, em uma subestação com alimentador com grande quantidade de MMGD, o uso de BRTs na barra de 34,5 kV mostrou eficácia na correção de oscilações de tensão, mas a medição de tensão não capturou completamente os efeitos da GD. Embora o aumento da capacidade instalada de GD seja positivo, o aumento das violações de tensões, especialmente em novembro de 2022, levanta preocupações sobre a estabilidade do sistema.

No Caso 2, com maior quantidade e potência de MMGD, foi observado um aumento significativo nas violações de tensões, especialmente em junho de 2022. Também foi constatado uma quantidade de ocorrências de violações de tensão 4 vezes maior que no caso 1 onde haviam bancos reguladores de tensão. Isso reforça a necessidade de análises mais detalhadas e dispositivos para estabilização do sistema, dado o crescimento contínuo da GD.

No Caso 3, com alimentador exclusivo para MMGD, o fluxo reverso de energia gerado por usinas de grande potência resultou em sobretensões persistentes, com 444 ocorrências de violação de tensão em 22 meses. Esse cenário, com alta potência reversa e sem autoconsumo significativo, demonstra o impacto da alta penetração da GD. A ausência de BRTs para controle de variação de tensão agravou a situação, ressaltando a necessidade de soluções técnicas e regulatórias para lidar com os desafios da GD.

REFERÊNCIAS

[1] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Avaliação da Eficiência Energética e Geração Distribuída**. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2026%20Efici%C3%A4ncia%20Energ%C3%A9tica%20e%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Distribu%C3%ADda%20para%20os%20pr%C3%B3ximos%2010%20anos\[1\].pdf#search=defini%C3%A7%C3%A3o%20gera%C3%A7%C3%A3o%20distribuida](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2026%20Efici%C3%A4ncia%20Energ%C3%A9tica%20e%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Distribu%C3%ADda%20para%20os%20pr%C3%B3ximos%2010%20anos[1].pdf#search=defini%C3%A7%C3%A3o%20gera%C3%A7%C3%A3o%20distribuida)> Acesso em 12 de abril de 2024.

[2] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Painel de Dados de Micro e Minigeração Distribuída**. Disponível em: <<https://dashboard.epe.gov.br/apps/pdgd/>> Acesso em 10 de maio de 2024.

[3] BOLLEN, M. H, Hassan, F. **Integration of distributed generation in the power system**. IEEE press series on power engineering. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2011.

[4] BLUME, S. W. **Eletric Power System Basics for the Nonelectrical Professional**. IEEE Press, 2007.

[5] PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL (PRODIST) – **PRODIST Módulo 8 – Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica**, 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf> Acesso em 07 de abril de 2024.

[6] JENKINS, N.; Ekanayake, J. B.; Strbac, G. **Distributed Generation**. Londres, The Institution of Engineering and Technology, 2010.

[7] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Indicadores de conformidade do nível de tensão em regime permanente**. Disponível em: <<https://portalrelatorios.aneel.gov.br/indicadoresDistribuicao/indicadoresConformidadeNivelTensaoRegimePermanente>> Acesso em 17 de janeiro de 2024.

[8] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GÉRIAS (CEMIG) – **Relatório de Sustentabilidade 2021**. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2022/04/ras-2021.pdf>>. Acesso em: 06 de março de 2024.

[9] COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL) – **Relatório Socioambiental Integrado 2021**. Disponível em: <<https://ri.copel.com/sustentabilidade/relatorios-anuais-e-socioambientais>>. Acesso em 22 de março de 2024.

[10] GLOBAL SOLAR ATLAS – **Média mensal de incidência solar por região**. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/detail?c=-23.246393,-52.492075,13&m=site&s=-23.200205,-52.510904&pv=small,0,24,1>> Acesso em: 15 de março de 2024.