



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Kamila Mariane Lima de Araújo

**Análise do Impacto da Instalação de Reguladores de Tensão na
Qualidade da Energia Elétrica Frente às Consequências de uma Densa
Concentração de Geração Distribuída: Estudo de Caso**

Natal – RN

Janeiro de 2025

Kamila Mariane Lima de Araújo

**Análise do Impacto da Instalação de Reguladores de Tensão na
Qualidade da Energia Elétrica Frente às Consequências de uma Densa
Concentração de Geração Distribuída: Estudo de Caso**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Crisluci Karina Souza Santos
Cândido

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN

Departamento de Engenharia Elétrica – DEE

Curso de Engenharia Elétrica

Natal – RN

Janeiro de 2025

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Araújo, Kamila Mariane Lima de.

Análise do Impacto da Instalação de Reguladores de Tensão na Qualidade da Energia Elétrica Frente às Consequências de uma Densa Concentração de Geração Distribuída: Estudo de Caso / Kamila Mariane Lima de Araújo. - 2025.

55f.: il.

Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Bacharelado em Engenharia Elétrica, Natal, 2025.

Orientação: Dra. Crisluci Karina Souza Santos Cândido.

1. Regulação de Tensão - Monografia. 2. Geração Distribuída - Monografia. 3. Distribuição de Energia Elétrica - Monografia. I. Cândido, Crisluci Karina Souza Santos. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.3

Kamila Mariane Lima de Araújo

**Análise do Impacto da Instalação de Reguladores de Tensão na
Qualidade da Energia Elétrica Frente às Consequências de uma Densa
Concentração de Geração Distribuída: Estudo de Caso**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Crisluci Karina Souza Santos
Cândido

Trabalho aprovado. Natal-RN, 14 de Janeiro de 2025:

Prof. Dra. Crisluci Karina Souza Santos Cândido - Orientadora
UFRN

Prof. Dr. Arrhenius Vinicius da Costa Oliveira - Convidado
UFRN

Prof. Dr. Max Chianca Pimentel Filho - Convidado
UFRN

Natal – RN
Janeiro de 2025

*Ao meu pai, que fez da sua gambiarra a minha engenharia,
À minha mãe, por todo apoio e cuidado,
À minha irmã, por ter aberto meus caminhos,
Aos meus amigos, que me ensinaram muito mais do que eu poderia aprender sozinha,
E, por fim, à minha avó Lourdes, por rezar sempre por mim.*

RESUMO

A energia solar fotovoltaica tem se difundido de forma acelerada no Brasil nos últimos anos. O crescimento das instalações de painéis solares, tanto em residências quanto em empreendimentos comerciais, reflete a busca por alternativas energéticas mais limpas e economicamente viáveis, consolidando a energia solar como uma das principais fontes renováveis no cenário energético brasileiro. Entretanto, este contexto tem causado transformações significativas no planejamento e na operação dos sistemas de distribuição de energia elétrica. As redes, projetadas para um fluxo de potência unidirecional, enfrentam impactos como sobretensões, variações no fator de potência e aumento das perdas técnicas. Esses desafios tornam indispensável o desenvolvimento de novas alternativas para mitigar os efeitos, reconsiderando as atividades de manutenção, operação, expansão e planejamento técnico/econômico das concessionárias de energia. Neste estudo, que busca contribuir para o debate técnico sobre o tema, é apresentada a metodologia de Regulação de Tensão Controlada por Potência (RTCP), implementada pela distribuidora de energia do Rio Grande do Norte, que visa a melhoria da qualidade de energia elétrica entregue aos consumidores em uma localidade com alta concentração de clientes que utilizam geradores fotovoltaicos.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica. Distribuição de Energia Elétrica. Impactos. Planejamento Técnico. Alternativas. Regulação de Tensão Controlada por Potência. Geradores Fotovoltaicos.

ABSTRACT

Photovoltaic solar energy has been rapidly expanding in Brazil in recent years. The growth in solar panel installations, both in residential and commercial settings, reflects the pursuit of cleaner and more economically viable energy alternatives, solidifying solar energy as one of the main renewable sources in the Brazilian energy landscape. However, this context has brought significant changes to the planning and operation of electricity distribution systems. The networks, initially designed for unidirectional power flow, are now facing challenges such as overvoltage, power factor variations, and increased technical losses. These challenges make it essential to develop new alternatives to mitigate the effects, reconsidering the maintenance, operation, expansion, and technical/economic planning activities of energy service providers. In this study, which aims to contribute to the technical debate on the subject, the Voltage Regulation Controlled by Power (VRCP) methodology, implemented by the energy distributor of Rio Grande do Norte, is presented. This methodology aims to improve the quality of electricity delivered to consumers in an area with a high concentration of clients using photovoltaic generators.

Keywords: Photovoltaic Solar Energy. Electrical Energy Distribution. Impacts. Technical Planning. Alternatives. Voltage Regulation Controlled by Power. Photovoltaic Generators.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama do Sistema Interligado Nacional – SIN	14
Figura 2 – Visão Geral do SEP	16
Figura 3 – Aplicação das novas regras da Lei 14.300	26
Figura 4 – SEP com geração distribuída	28
Figura 5 – PDGD - Capacidade Instalada no Rio Grande do Norte até 2023.	30
Figura 6 – PDGD - Projeção Até 2034 para o Rio Grande do Norte.	31
Figura 7 – Gráficos Afundamento (<i>sag</i>) e Elevação (<i>swell</i>) de Tensão	33
Figura 8 – Gráficos Sobretensão e Subtensão	35
Figura 9 – Gráficos Desequilíbrio de Tensão	37
Figura 10 – Gráfico Interrupções	38
Figura 11 – Gráfico Flutuação de Tensão	40
Figura 12 – Ocorrência de Oscilação de Tensão em junho - Cliente 1.	42
Figura 13 – Ocorrência de Oscilação de Tensão em abril - Cliente 2.	43
Figura 14 – Comportamento do Método RTCP	45
Figura 15 – Instalação do Regulador de Tensão.	46
Figura 16 – Relé RUA-01	47
Figura 17 – Painel de Visualização do Relé RUA-01	48
Figura 18 – Área abrangida pelo Regulador de Tensão	49
Figura 19 – Gráfico de Resultados - Medição no Último Cliente	50

LISTA DE SIGLAS

- ABNT* Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABSOLAR* Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
- ANEEL* Agência Nacional de Energia Elétrica
- ANP* Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
- BRT* Banco Regulador de Tensão
- CAA* Custo Anual dos Ativos
- CAOM* Custos de Administração, Operação e Manutenção
- CLP* Controladores Lógicos Programáveis
- EMC* Eletromagnetic Compatibility/ Compatibilidade Eletromagnética
- EPE* Empresa de Pesquisa Energética
- EPS* Empresa Prestadora de Serviços
- GD* Geração Distribuída
- IEC* International Electrotechnical Commission
- IEEE* Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
- MME* Ministério de Minas e Energia
- MMGD* Micro e Mini Geração Distribuída
- ONS* Operador Nacional do Sistema
- PGD* Painel de Dados de Micro e Minigeração Distribuída
- PRODIST* Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
- REN* Resolução Normativa
- RTCP* Regulação de Tensão Controlada por Potência
- RUA – 01* Relé Único Assimétrico
- SCEE* Sistema de Compensação de Energia Elétrica

SEP Sistema Elétrico de Potência

SIN Sistema Interligado Nacional

TAP Terminal de Ajuste de Potência

TE Tarifa de Energia

TUSD Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

VTCD Variações de Tensão de Curta Duração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	METODOLOGIA	12
3	SISTEMAS, AGENTES E NORMATIVOS DA REDE ELÉTRICA BRASILEIRA	13
3.1	Sistemas e Agentes da Rede Elétrica Brasileira	13
3.1.1	Sistema Interligado Nacional (SIN)	13
3.1.2	Sistema Elétrico de Potência (SEP)	16
3.1.3	ANEEL, ONS e MME	18
3.1.4	Comissão Internacional de Eletrotécnica – IEC	21
3.2	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elé- trico Nacional (PRODIST)	22
3.2.1	Módulo 8 - Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica	22
4	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA: INTEGRAÇÃO À REDE ELÉTRICA TRADICIONAL E SEUS IMPACTOS	24
4.1	Micro e Minigeração Fotovoltaica	24
4.2	Composição Tarifária	25
4.3	Legislação MMGD Brasileira	26
4.4	Integração e Impactos da Geração Distribuída na Rede Elétrica	28
4.5	Crescimento da MMGD no Rio Grande do Norte	30
5	DISTÚRBIOS QUE INFLUENCIAM NA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	32
5.1	Afundamento e Elevação de Tensão	33
5.2	Sobretensão e Subtensão	35
5.3	Desequilíbrios de Tensão	37
5.4	Interrupções (Momentânea, temporária e permanente)	38
5.5	Flutuações de Tensão	40
6	ESTUDO DE CASO COM RTCP	41
6.1	Introdução	41
6.2	Cenário de Ocorrências Anteriores à Instalação do RT	42
6.3	Regulação de Tensão Controlada por Potência (RTCP)	44
6.4	Instalação e Aspectos Construtivos	46

6.4.1	Obra de Instalação	46
6.4.2	Relé RUA-01 - TAPELETRO	47
6.5	Resultados	49
7	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Conforme o uso de energia solar distribuída cresce, é imperativo abordar as complexas questões técnicas e regulatórias associadas a esta forma de geração de energia. A integração bem-sucedida de usinas de microgeração solar à rede elétrica tradicional é fundamental para garantir a confiabilidade do fornecimento de energia e, ao mesmo tempo, promover a sustentabilidade e a eficiência energética.

A presente pesquisa se dedica à análise do aprimoramento da qualidade de energia elétrica fornecida aos consumidores, com foco nos desafios enfrentados por regiões residenciais que possuem uma alta densidade de usinas de microgeração solar. Esta investigação é baseada na documentação e no estudo de caso da implementação do regulador de tensão instalado pela Neoenergia Cosern nos arredores dessas propriedades.

Diante deste desafio, a distribuidora já implementou diversas alterações na infraestrutura de sua rede elétrica, incluindo a realização de recondutoramento em trechos, instalação de novos transformadores e a divisão de circuitos. No entanto, as questões persistiram, levando a empresa a repensar a utilização de um Banco Regulador de Tensão como um novo investimento em inovação para enfrentar essa problemática. Neste contexto, serão avaliados os resultados alcançados por meio da análise de dados da rede elétrica e do acompanhamento das reclamações e ocorrências na área, tanto antes quanto depois da implementação dessa iniciativa. O objetivo é fornecer uma análise crítica da eficácia do regulador de tensão para essa aplicação específica.

2 METODOLOGIA

A metodologia utilizada será um estudo de caso real de um novo modelo de abordagem para os bancos reguladores de tensão, denominado de Regulação de Tensão Controlada por Potência (RTCP), apresentando os resultados do investimento feito pela concessionária de distribuição de energia elétrica do Rio Grande do Norte, a Neoenergia Cosern.

Nos primeiros capítulos, serão discutidos temas relevantes para a introdução dessa tecnologia. No Capítulo 3, serão apresentadas informações sobre os sistemas que regem a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil, incluindo os agentes responsáveis e as normas aplicáveis. O Capítulo 4 abordará os impactos e o crescimento da Micro e Mini Geração Distribuída (MMGD), com foco específico no estado do Rio Grande do Norte para um melhor embasamento. No Capítulo 5, serão expostos alguns dos distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica, justificando o principal objeto do estudo, pois devem ser mantidos dentro dos níveis aceitáveis conforme a legislação brasileira.

Por fim, no Capítulo 6, a introdução do método RTCP e seus resultados aferidos, seguidos da análise e conclusão do trabalho.

3 SISTEMAS, AGENTES E NORMATIVOS DA REDE ELÉTRICA BRASILEIRA

3.1 Sistemas e Agentes da Rede Elétrica Brasileira

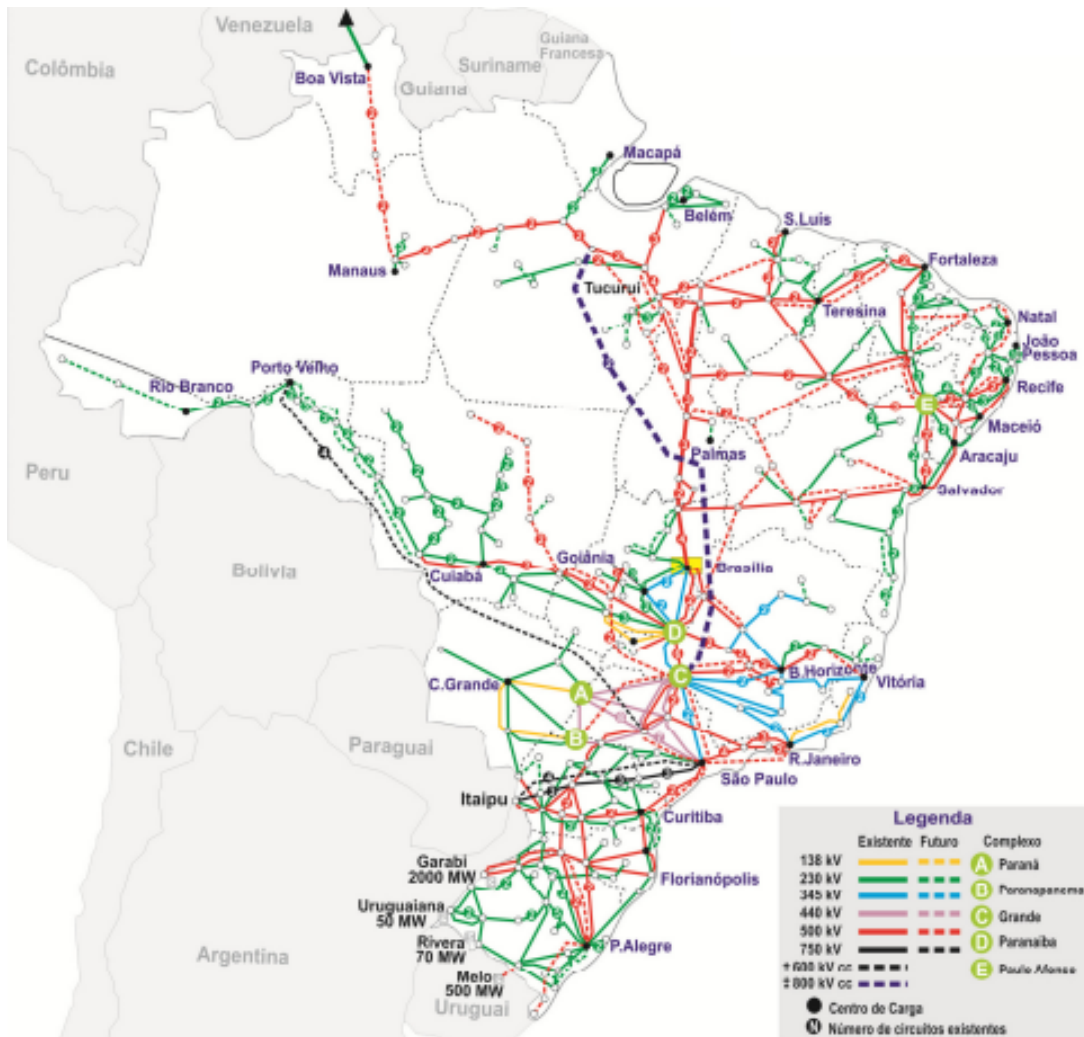
3.1.1 Sistema Interligado Nacional (SIN)

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é o sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica que interconecta usinas de geração de eletricidade, subestações de transmissão e sistemas de distribuição em um determinado país ou região. O termo "SIN" pode ser usado para se referir a sistemas elétricos interconectados em diversos países, mas no contexto do Brasil, ele é mais comumente associado ao Sistema Interligado Nacional brasileiro que abrange todo o território nacional. O SIN é operado e coordenado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), que monitora constantemente a demanda por eletricidade e a geração de energia, tomando ações para garantir o equilíbrio entre oferta e demanda. (ONS, 2024)

O SIN brasileiro é notável pela diversidade de fontes de geração de energia que incluem usinas hidrelétricas, termelétricas, eólicas, solares, nucleares e outras. Essa diversificação permite uma maior segurança no fornecimento de eletricidade, uma vez que o sistema não depende exclusivamente de uma única fonte de energia. Em 2024, segundo dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), a matriz elétrica brasileira possuía 225.827 MW instalados, podendo destacar-se as fontes: Hídrica (109.929 MW ou 48,7%), Solar Fotovoltaica (38.466 MW ou 17,0%) e Eólica (29.026 MW ou 12,9%), com previsão de expansão para 233.690 MW até 2027. (ABSOLAR, 2024a)

A interligação do SIN, conforme mostra a Figura 1, é crucial para o fornecimento confiável de eletricidade em todo o país. Permite que a eletricidade seja gerada em uma região e entregue a consumidores em outras partes do país, garantindo que as áreas com excesso de geração possam suprir as áreas com maior demanda, ajudando a estabilizar a rede elétrica. Ele desempenha um papel fundamental no desenvolvimento econômico, fornecendo energia para indústrias, comércio, serviços e residências. Além disso, ele participa na integração de fontes de energia renovável, contribuindo para a sustentabilidade energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Figura 1 – Diagrama do Sistema Interligado Nacional – SIN



Fonte:(ONS, 2024)

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é composto por diversos elementos que trabalham de maneira integrada para assegurar a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em um país ou região. A primeira parte fundamental do SIN consiste nas usinas de geração de energia, que podem variar desde usinas hidrelétricas que aproveitam a força da água, até termelétricas movidas a gás, carvão, biomassa, usinas eólicas e usinas solares. A diversidade dessas fontes de geração desempenha um papel crucial na segurança e na resiliência do sistema, permitindo a produção de eletricidade de maneira contínua.

A segunda componente essencial é a rede de transmissão de alta tensão, que compreende uma complexa rede de linhas de transmissão. Essas linhas transportam a eletricidade das usinas para áreas de demanda, como centros urbanos e zonas industriais. Subestações de transmissão desempenham um papel crítico ao permitir a conversão de tensões e facilitar a distribuição eficiente da eletricidade.

Após a transmissão, a terceira parte do SIN é composta pelos sistemas de distribui-

ção, que são operados por empresas de distribuição de energia elétrica. Essas empresas são responsáveis por entregar a eletricidade diretamente aos consumidores, sejam residenciais, comerciais ou industriais. Elas desempenham um papel vital em garantir que a eletricidade chegue de forma confiável às residências e empresas.

Empresas geradoras e distribuidoras de energia também fazem parte do SIN, atuando na construção e operação de usinas de geração e no fornecimento de eletricidade aos consumidores. Por fim, os próprios consumidores, sejam eles residenciais, comerciais ou industriais, compõem a última parte do SIN, pois são os destinatários finais da eletricidade gerada e distribuída através do sistema.

No Brasil, o funcionamento do Sistema Interligado Nacional (SIN) é regulado por diversas normas, sendo algumas das mais importantes:

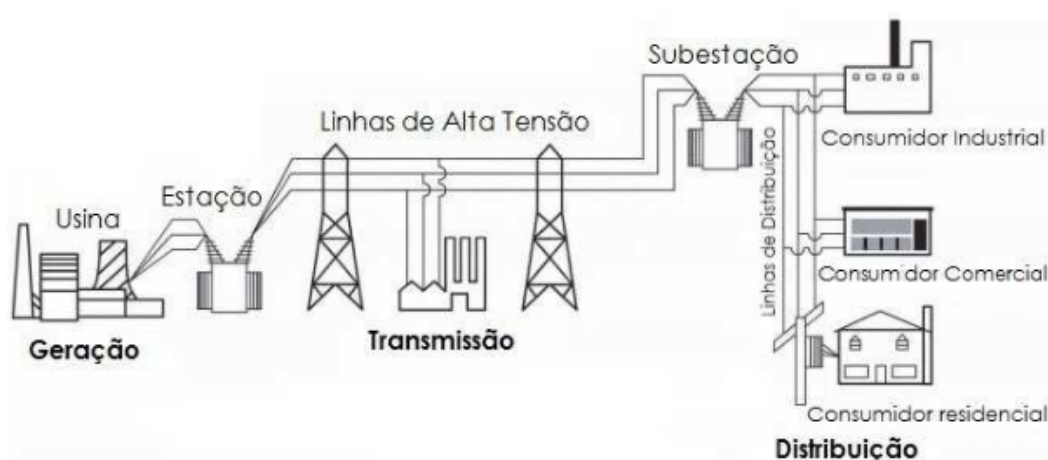
- Lei nº 9.427/1996: essa lei estabelece as bases legais para a organização e o funcionamento do setor elétrico no Brasil, incluindo a criação do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e a definição de suas competências;
- Resolução Normativa nº 414/2010: essa resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica no país, incluindo as normas de qualidade e segurança do serviço;
- Portaria MME nº 514/2020: essa portaria do Ministério de Minas e Energia (MME) estabelece as diretrizes para a operação do SIN, incluindo as regras de planejamento e coordenação do sistema;
- Resolução Normativa nº 819/2018: essa resolução da ANEEL estabelece as regras para a contratação de energia elétrica no mercado de curto prazo, que é utilizado pelo ONS para garantir o equilíbrio entre oferta e demanda no SIN.

A documentação regente do SIN é aprimorada periodicamente, conforme necessidade, garantindo a segurança, eficiência e qualidade do sistema.

3.1.2 Sistema Elétrico de Potência (SEP)

O Sistema Elétrico de Potência (SEP), ilustrado de forma simplificada na Figura 2, é uma infraestrutura complexa e interligada que desempenha um papel fundamental na geração, transmissão, distribuição e controle de energia elétrica em larga escala. O SEP é responsável por assegurar que a eletricidade seja gerada de forma confiável a partir de diversas fontes de energia, transportada eficientemente por meio de linhas de transmissão de alta tensão e entregue aos consumidores em residências, indústrias, comércio e outros setores.

Figura 2 – Visão Geral do SEP



Fonte: (BLUME, 2016)

A geração de energia é o ponto de partida do SEP, onde usinas de diferentes tipos, como hidrelétricas, termelétricas, nucleares, eólicas e solares, transformam diversas fontes de energia em eletricidade. Essa diversificação da matriz energética contribui para a segurança e resiliência do sistema, minimizando a dependência de uma única fonte.

As linhas de transmissão de alta tensão constituem a espinha dorsal do SEP, permitindo que a eletricidade gerada nas usinas seja transportada a longas distâncias. Subestações e transformadores desempenham um papel crucial ao regular a tensão e a distribuição da eletricidade, tornando-a adequada para diferentes áreas e usos.

A distribuição de energia é realizada por empresas de distribuição que operam as redes de distribuição locais, garantindo que a eletricidade seja entregue de forma eficaz a residências, comércio e indústrias. Empresas de distribuição desempenham um papel vital em manter a continuidade do fornecimento.

A operação e o controle do SEP são centralizados em centros de operação, como o Operador Nacional do Sistema (ONS), que monitoram em tempo real a oferta e a demanda de eletricidade, tomando ações para manter a estabilidade do sistema e evitar sobrecargas

ou falhas.

À medida que as energias renováveis desempenham um papel crescente na geração de eletricidade, a integração de fontes intermitentes, como a energia eólica e solar, torna-se um desafio adicional para o SEP. A gestão eficiente é necessária para lidar com a variabilidade dessas fontes.

A resiliência e a segurança do SEP são fundamentais, pois interrupções no fornecimento de eletricidade podem ter impactos significativos. Isso inclui a proteção contra eventos naturais, como tempestades, e a segurança cibernética para mitigar ameaças potenciais aos sistemas elétricos.

O SEP desempenha um papel essencial na infraestrutura de uma sociedade moderna, fornecendo energia para impulsionar o desenvolvimento econômico, o bem-estar das pessoas e a operação de serviços essenciais. À medida que o mundo enfrenta desafios energéticos e ambientais, a gestão eficiente e a modernização contínua do SEP são cruciais para garantir um fornecimento confiável de eletricidade.

No Brasil, o funcionamento do Sistema Elétrico de Potência (SEP) é regulado por diversas normas, sendo algumas das mais importantes:

- Norma Regulamentadora NR-10, emitida pelo Ministério do Trabalho e Emprego, que estabelece as diretrizes básicas de segurança e saúde no trabalho em instalações e serviços em eletricidade;
- Norma NBR 14039, emitida pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), que estabelece os requisitos para projeto, operação e manutenção de sistemas elétricos de potência;
- Norma NBR 5410, também emitida pela ABNT, que estabelece as condições adequadas de instalações elétricas de baixa tensão;
- Norma NBR 5419, emitida pela ABNT, que estabelece as regras para proteção de estruturas contra descargas atmosféricas;
- Resolução Normativa ANEEL nº 414/2010, que estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica, incluindo os requisitos técnicos para a conexão de unidades consumidoras ao sistema elétrico de potência.

A documentação regente do SEP é aprimorada periodicamente, conforme necessidade, garantindo a segurança, eficiência e qualidade do sistema.

3.1.3 ANEEL, ONS e MME

- **Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)**

A ANEEL, ou Agência Nacional de Energia Elétrica, é uma autarquia federal vinculada ao Ministério de Minas e Energia do Brasil. Sua criação em 1996 foi um marco no setor elétrico brasileiro, ocorrendo durante a implantação do novo modelo que promoveu a privatização e a abertura do mercado de energia no país. A agência tem como principal missão regular e fiscalizar o setor elétrico, garantindo o fornecimento de energia elétrica de qualidade para os consumidores e promovendo o desenvolvimento sustentável do setor. (REPUBLICA, 1996)

A ANEEL desempenha várias funções essenciais. Uma delas é a regulação, na qual elabora normas e regulamentos que orientam o funcionamento do setor elétrico, incluindo tarifas, concessões, contratos e políticas públicas. Essas regulamentações visam promover a competição, a eficiência e o desenvolvimento sustentável do setor.

Além disso, a agência é responsável pela fiscalização, monitorando o cumprimento das regras estabelecidas para o setor elétrico. Ela verifica se as empresas estão operando de acordo com os regulamentos e as condições de suas concessões, garantindo que ofereçam serviços de qualidade e respeitem os direitos dos consumidores.

A ANEEL também desempenha um papel importante na definição das tarifas de energia elétrica, assegurando que sejam justas e reflitam os custos reais da prestação de serviços, evitando abusos e protegendo os interesses dos consumidores. A concessão de autorizações, licenças e concessões para empresas que desejam atuar no setor é outra responsabilidade da agência. Essas concessões estabelecem as condições e os prazos para a prestação de serviços, garantindo que as empresas cumpram com os padrões de qualidade e eficiência estabelecidos.

A ANEEL também desempenha um papel fundamental na promoção das energias renováveis no Brasil, criando incentivos e políticas para o desenvolvimento de fontes de energia limpa, como a solar, eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas. Esses esforços contribuem para a diversificação da matriz energética do país e para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Além disso, a ANEEL atua como mediadora na resolução de conflitos entre consumidores e empresas do setor elétrico, oferecendo mecanismos para que as partes envolvidas possam solucionar disputas de forma justa e eficaz, garantindo a proteção dos direitos dos consumidores. Em resumo, a ANEEL desempenha um papel fundamental no setor elétrico brasileiro, contribuindo para sua estabilidade e desenvolvimento sustentável, equilibrando os interesses dos consumidores, das empresas e do governo e garantindo o acesso à energia elétrica de qualidade.

- **Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)**

O ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) desempenha um papel central no cenário elétrico brasileiro. Sua principal função é coordenar e operar o Sistema Interligado Nacional (SIN), que engloba todos os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica do Brasil. Essa coordenação é fundamental para garantir a estabilidade do suprimento de energia em todo o país, pois permite o monitoramento em tempo real e a gestão das operações.

Um dos aspectos críticos da atuação do ONS é a operação do sistema elétrico. A organização monitora constantemente a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, garantindo que todos os componentes do sistema funcionem de forma coordenada e eficiente. Isso envolve a gestão das centrais geradoras, das redes de transmissão de alta tensão e a integração das unidades consumidoras, possibilitando o fornecimento de eletricidade de forma ininterrupta.

Além disso, o ONS é responsável por programar a geração e a transmissão de energia elétrica, a fim de equilibrar a oferta e a demanda. Isso requer a previsão precisa do consumo de energia e a coordenação das usinas de geração para atender a essa demanda, mantendo o sistema estável. A organização também planeja a expansão do sistema, identificando a necessidade de novas linhas de transmissão, subestações e usinas de geração, contribuindo para o crescimento do setor elétrico brasileiro.

A segurança operacional é uma preocupação fundamental do ONS. Ele desenvolve planos de contingência e estratégias para lidar com eventos imprevistos, como falhas em equipamentos ou eventos climáticos extremos, a fim de evitar apagões e garantir a continuidade do fornecimento de energia.

Além disso, o ONS desempenha um papel importante na integração de fontes de energia renovável, como a energia eólica e solar, ao sistema elétrico brasileiro. Isso inclui a adaptação do sistema para acomodar a geração intermitente dessas fontes, otimizando a sua contribuição para a matriz energética do país.

Em resumo, o ONS é uma instituição fundamental para garantir a confiabilidade, a segurança e a eficiência do fornecimento de energia elétrica no Brasil. Ele opera e coordena o SIN, prevenindo apagões, planejando a expansão do sistema e integrando fontes renováveis, contribuindo para o desenvolvimento sustentável do setor elétrico brasileiro.

- **Ministério de Minas e Energia (MME)**

O Ministério de Minas e Energia (MME) é uma instituição de extrema importância no cenário brasileiro, responsável por coordenar e direcionar políticas e estratégias para os setores de mineração e energia no país. O MME desempenha um papel fundamental na gestão dessas áreas que são vitais para o desenvolvimento econômico e a qualidade de vida dos cidadãos.

No que se refere à energia elétrica, o MME formula políticas e diretrizes que guiam o setor, abrangendo desde a geração até a distribuição de eletricidade. Sua atuação contribui para o desenvolvimento de fontes de energia limpa e renovável, além de promover a eficiência e a confiabilidade do sistema elétrico. O ministério trabalha em estreita colaboração com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para regulamentar o setor e assegurar o acesso a energia de qualidade para a população.

No que se refere aos recursos naturais, o MME é responsável por coordenar as políticas relacionadas à exploração de petróleo, gás natural e minerais, incluindo a regulação da indústria do pré-sal. Isso envolve a gestão das concessões, a promoção de políticas de conteúdo local e a supervisão da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), garantindo o aproveitamento responsável desses recursos.

Além disso, o MME promove a produção e o uso de biocombustíveis, como etanol e biodiesel, contribuindo para a diversificação da matriz energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa. Também desempenha um papel de destaque no planejamento energético, assegurando a segurança no abastecimento de energia, com projeções de médio e longo prazo e a criação de cenários para o setor energético.

Por fim, o MME representa o Brasil em questões de energia e mineração em âmbito internacional, estabelecendo acordos e parcerias com outros países e participando de fóruns internacionais. Sua atuação abrange desde a pesquisa e inovação no setor até a busca por soluções sustentáveis para o futuro do país.

Em resumo, o Ministério de Minas e Energia é um órgão estratégico para o Brasil, desempenhando um papel fundamental na promoção do desenvolvimento sustentável, na garantia de suprimento energético confiável e na gestão responsável dos recursos naturais do país. Suas políticas e diretrizes influenciam diretamente a economia e a qualidade de vida dos brasileiros, além de contribuir para a transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável.

3.1.4 Comissão Internacional de Eletrotécnica – IEC

A International Electrotechnical Commission (IEC) é uma organização internacional que desenvolve e publica normas para tecnologias elétricas e eletrônicas. Fundada em 1906, a IEC tem como objetivo promover a padronização e a compatibilidade de produtos e sistemas em todo o mundo, garantindo que eles funcionem de forma segura e eficiente. A comissão é composta por representantes de países membros que colaboram para criar normas que cobrem uma ampla gama de áreas, incluindo eletricidade, eletrônica e tecnologias relacionadas. O trabalho relacionado às normas da IEC é realizado por mais de 300 comitês técnicos e subcomissões. (IEC, 2024)

Essas normas são fundamentais para a indústria global, pois asseguram que os produtos e sistemas possam operar de maneira consistente e sem problemas de compatibilidade, independentemente de onde foram fabricados ou utilizados. A IEC desempenha um papel crucial na facilitação do comércio internacional e na proteção da saúde e segurança dos usuários, ao mesmo tempo em que promove a inovação tecnológica.

Uma das áreas importantes cobertas pela IEC é a Compatibilidade Eletromagnética (EMC), que trata de como os dispositivos e sistemas interagem no que diz respeito a emissões e imunidade a interferências eletromagnéticas. Dentro dessa área, a norma IEC 61000-2-2 é um exemplo significativo. Ela define os ambientes eletromagnéticos típicos e estabelece requisitos para garantir que os equipamentos sejam projetados para operar de forma eficiente e sem causar interferências indesejadas.

Essa norma estabelece níveis de compatibilidade para sistemas públicos de distribuição de baixa tensão CA com valor nominal de até 420 V, monofásico ou 690 V, trifásico de 50 Hz ou 60 Hz. Os níveis de compatibilidade especificados se aplicam no ponto de acoplamento comum e consideram, dentre outros, os seguintes fenômenos: flutuações de tensão, cintilação luminosa, harmônicos, distorção de tensão de modo diferencial em frequências mais altas, afundamentos de tensão, interrupções de curto fornecimento, desequilíbrio de tensão e sobretensões transitórias. (IEC, 2017)

A IEC desempenha um papel fundamental na padronização global de eletricidade e eletrônica, e suas normas, como a IEC 61000-2-2, são vitais para garantir a funcionalidade e a segurança dos produtos eletrônicos em diversos contextos, como o estudado neste trabalho.

3.2 Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)

O PRODIST, que significa "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional", é um conjunto de regulamentações estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no Brasil. Esses procedimentos definem as regras técnicas e operacionais a serem seguidas pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica no país.

O principal objetivo do PRODIST é garantir a segurança, qualidade, confiabilidade e eficiência da distribuição de energia elétrica, bem como promover a padronização de práticas e procedimentos em todo o território brasileiro. Esses procedimentos são essenciais para o funcionamento do sistema de distribuição elétrica e para proteger os interesses dos consumidores.

O PRODIST é composto por 11 módulos que abordam diversas áreas relacionadas à distribuição de energia. O módulo 8 fornece pontos importantes sobre a qualidade da energia, que serão expostos neste trabalho.

3.2.1 Módulo 8 - Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica

O Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) é um conjunto de normas e diretrizes estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), visando garantir a qualidade e a continuidade do fornecimento de energia elétrica no Brasil. O Módulo 8 do PRODIST, em particular, trata da qualidade da energia elétrica, abordando aspectos fundamentais para a avaliação e manutenção dos padrões de qualidade exigidos para o fornecimento de energia elétrica no país. (ANEEL, 2020)

O principal objetivo do Módulo 8 é assegurar que a energia elétrica fornecida aos consumidores atenda a critérios mínimos de qualidade, estabelecendo parâmetros para a medição e o monitoramento de diversos indicadores de qualidade. Isso inclui a análise de fenômenos como variações de tensão, distorções harmônicas, flutuações de tensão (*flicker*), interrupções de fornecimento, entre outros. Esses indicadores são essenciais para garantir que a energia entregue aos consumidores seja confiável e não cause danos a equipamentos elétricos ou desconforto aos usuários.

Entre os principais indicadores de qualidade definidos pelo Módulo 8, destacam-se a Distorção Harmônica Total (THD), que mede o nível de distorções harmônicas na tensão e na corrente elétrica. Valores elevados de THD podem causar aquecimento excessivo em equipamentos elétricos, reduzindo sua vida útil e eficiência. A Flutuação de Tensão (*flicker*) refere-se às variações rápidas e repetitivas de tensão que podem causar efeitos

visíveis em lâmpadas incandescentes, resultando em desconforto visual aos usuários. As Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) envolvem quedas e elevações momentâneas de tensão que podem afetar o funcionamento de equipamentos sensíveis. As interrupções de fornecimento, classificadas como longas (superiores a três minutos) ou curtas (inferiores a três minutos), afetam diretamente a continuidade do serviço e a confiabilidade do sistema elétrico.

As concessionárias de distribuição são obrigadas a realizar o monitoramento contínuo desses indicadores, utilizando equipamentos de medição adequados. Os dados coletados são analisados e compilados em relatórios periódicos, que devem ser apresentados à ANEEL. Esses relatórios são essenciais para a identificação de áreas críticas, permitindo a implementação de ações corretivas e preventivas para a melhoria da qualidade da energia elétrica fornecida. Além disso, o Módulo 8 estabelece mecanismos de penalidades e incentivos para as concessionárias de distribuição. Concessionárias que não cumprirem os padrões de qualidade estabelecidos podem ser penalizadas, enquanto aquelas que superarem os requisitos mínimos podem receber incentivos. Isso cria um ambiente regulatório que incentiva a melhoria contínua dos serviços prestados. (ANEEL, 2020)

A implementação efetiva do Módulo 8 do PRODIST é fundamental para garantir a qualidade da energia elétrica no Brasil. Além de proteger os consumidores contra problemas decorrentes da má qualidade da energia, como danos a equipamentos e interrupções frequentes, contribui para a eficiência operacional das concessionárias e para a estabilidade do sistema elétrico nacional. Compreender e aplicar as diretrizes desse módulo é essencial para engenheiros e eletricitas que desejam contribuir para a melhoria do sistema elétrico e para a satisfação dos consumidores. Portanto, o Módulo 8 do PRODIST desempenha um papel crucial na manutenção da qualidade da energia elétrica no Brasil, assegurando que as concessionárias de distribuição trabalhem continuamente para oferecer um serviço de alta qualidade aos consumidores.

4 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA: INTEGRAÇÃO À REDE ELÉTRICA TRADICIONAL E SEUS IMPACTOS

4.1 Micro e Minigeração Fotovoltaica

A geração de energia pode ser classificada como centralizada ou distribuída. A geração de energia é centralizada quando possui uma grande fonte geradora. Nesse caso, o fluxo de energia ocorre em uma única direção, da fonte geradora ao consumidor, sendo necessárias linhas de transmissão e distribuição. Por outro lado, a geração distribuída ocorre quando há fontes de geração de energia conectadas junto à rede de distribuição de alguma concessionária ou junto ao consumidor. Com a popularização da geração distribuída fotovoltaica, tornou-se cada vez mais comum a visualização desses sistemas em residências, comércios e indústrias locais. (ACKERMANN; ANDERSSON; SODER, 2001)

Em relação à categorização técnica, o conjunto de MMGD inclui todas as instalações conectadas à rede e que não fazem parte do despacho pelo ONS ou de quaisquer tipos de controle por partes das empresas distribuidoras. Esses sistemas de MMGD são classificados em dois grupos:

- Micro Geração Distribuída, que engloba usinas até 75 kW (setenta e cinco quilowatts);
- Mini Geração Distribuída, que engloba usinas maiores que 75 kW (setenta e cinco quilowatts), menor ou igual a 5 MW (cinco megawatts) para as fontes despacháveis ¹ e menor ou igual a 3 MW (três megawatts) para as fontes não despacháveis. ²

¹Fontes despacháveis: hidrelétricas (incluindo aquelas a fio d'água que possuam viabilidade de controle variável de sua geração de energia); cogeração qualificada; biomassa; biogás; e fontes de geração fotovoltaica com baterias cujos montantes de energia despachada aos consumidores finais apresentam capacidade de modulação de geração através do armazenamento de energia em baterias, em quantidade de, pelo menos, 20% da capacidade de geração mensal da central geradora que podem ser despachados através de um controlador local ou remoto

²Fontes não despacháveis: solar fotovoltaica sem armazenamento, e demais fontes não listadas acima. Ou seja, para essas fontes, o Projeto de Lei 5829/2019 propõe uma diminuição do limite de potência instalada para minigeração para 3 MW. Por esse motivo, pode provocar uma redução do mercado potencial e escalabilidade da Mini GD para estas fontes.

4.2 Composição Tarifária

Para um melhor entendimento da legislação MMGD brasileira, é necessário compreender a composição tarifária das contas de energia elétrica pagas pelos consumidores no Rio Grande do Norte. Atualmente ela é composta pelas seguintes bases: 41,6% do valor da tarifa é destinado à compra de energia e a transmissão da mesma, 28,5% são destinados para encargos e tributos e os 29,9% restantes configuram a parcela recebida pela distribuidora para realização de investimentos e funcionamento da empresa. (COSERN, 2023)

Detalhando essa composição, a tarifa total é composta por dois grandes grupos: Tarifa de Energia (TE), que corresponde ao produto utilizado pelo consumidor final e os custos atrelados a esse consumo, e a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD), vinculada à prestação dos serviços necessários para que esse consumo ocorra (disponibilização, manutenção e operação da infraestrutura do setor elétrico). Esses grupos tarifários possuem subdivisões, sendo elas (ANEEL, 2021):

- Tarifa de Energia (TE) - Subdivisões:
 - Encargos;
 - Perdas;
 - Transporte;
 - Energia.

- Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) - Subdivisões:
 - Encargos;
 - Perdas;
 - Transporte.
 - * Fio A: Referente ao uso de sistemas de terceiros pela distribuidora local (sistema de transmissão ou o sistema de outra distribuidora);
 - * Fio B: Referente aos custos da atividade de distribuição, separados em Custos de Administração, Operação e Manutenção (CAOM) e Custo Anual dos Ativos (CAA).

4.3 Legislação MMGD Brasileira

A MMGD brasileira é foco de constante estudo, sendo inicialmente regulamentada pela Resolução Normativa N° 482, de 17 de abril de 2012 (REN 482/2012), que instituiu o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) através da Micro e Minigeração Distribuída (MMGD). (ANEEL, 2012)

O SCEE tornou-se um dos principais incentivos à geração distribuída a partir de fontes renováveis no Brasil. Por meio dessa modalidade, a energia gerada por uma unidade produtora é convertida em créditos junto à concessionária distribuidora de energia local, sendo utilizados para abater o consumo na fatura de energia do consumidor em questão, eliminando a necessidade de pagamento em dinheiro pela parcela gerada. Além disso, é possível destinar os excedentes mensais de créditos de geração tanto para a própria unidade geradora quanto para outras unidades consumidoras vinculadas ao mesmo sistema de compensação, dentro do prazo de validade dos créditos.

Ela foi seguida por sua alteração em 2015 pela Resolução Normativa n° 687 e em 06 de janeiro de 2022, foi publicada a Lei 14.300 que instituiu novas diretrizes e é considerada um marco legal para a micro e minigeração. (REPUBLICA, 2022) Esse marco posiciona o Brasil um passo adiante em sua transição energética, constituindo um avanço crucial para estabelecer bases mais robustas de segurança jurídica, incrementando o nível de estabilidade e previsibilidade do mercado de MMGD. (GREENER, 2022)

Para uma melhor aceitação do mercado, na Lei 14.300/2022 também foram definidos os períodos de transição para que ela substitua de forma integral a Resolução Normativa 482 de 2012. Conforme linha temporal da Figura 3, os clientes com sistemas de MMGD que protocolaram suas solicitações de acesso antes do início da nova regra, permanecem nos termos da REN 482/2012 até 31 de dezembro de 2045, se beneficiando do chamado "direito adquirido" de permanecer nos termos da legislação anterior.

Figura 3 – Aplicação das novas regras da Lei 14.300



FONTE: (GREENER, 2022)

Entre a REN 482/2012 e Lei 14.300/2022 existem algumas diferenças fundamentais, sendo elas:

- Valor da compensação:
 - REN 482/2012: Compensação considerando todas as componentes da tarifa de eletricidade;
 - Lei 14.300/2022: Compensação considerando todas as componentes menos a TUSD Fio B.

- Custo de disponibilidade:
 - REN 482/2012: Para o Grupo B, o custo de disponibilidade representa o mínimo que o consumidor deve pagar na conta de luz, sendo eles 30 kWh, 50 kWh e 100 kWh para ligações monofásicas, bifásicas e trifásicas, respectivamente;
 - Lei 14.300/2022: O custo de disponibilidade continua com os valores mínimos de referência 30, 50 ou 100 kWh, com a seguinte regra de aplicação:
 - * Para projetos com direito adquirido: Se o consumo medido for maior do que o valor de referência, a compensação ocorre somente até o valor de referência, que é cobrado na conta. Se for menor, o consumidor paga o custo de disponibilidade;
 - * Para projetos na regra de transição: Se o consumo medido for maior que o valor de referência, ocorre toda a compensação do consumo sem a cobrança do custo de disponibilidade. Se for menor, o consumidor paga o custo de disponibilidade.

- Comercialização de energia:
 - REN 482/2012: Comercialização vedada;
 - Lei 14.300/2022: Possibilidade de comercialização de excedentes por meio de chamada pública pela ANEEL.

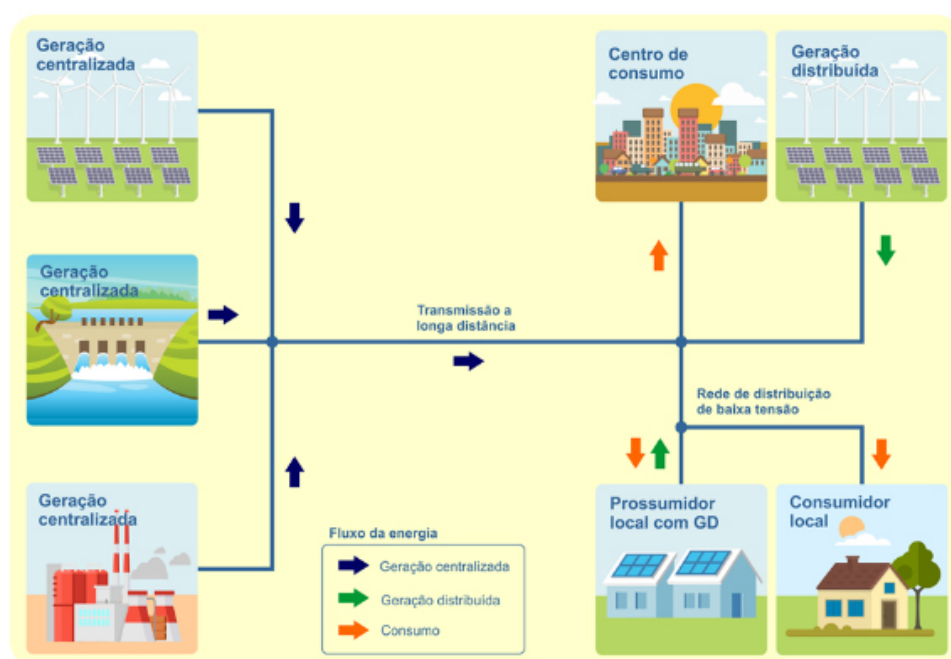
A Lei 14.300/2022 também traz mudanças na demanda contratada para o grupo A de faturamento, a opção de faturamento como B Optante e a contratação de serviços auxiliares (serviços adicionais e de suporte necessários para garantir o funcionamento estável e confiável da rede elétrica).

4.4 Integração e Impactos da Geração Distribuída na Rede Elétrica

Os sistemas solares *on-grid* são os mais populares entre os consumidores residenciais e comerciais brasileiros. Eles consistem no conjunto de módulos fotovoltaicos conectados a um inversor com potência nominal compatível que, por sua vez, é ligado ao quadro de distribuição do imóvel, permitindo que a energia gerada seja utilizada diretamente pelas cargas e que o excedente não consumido seja enviado à rede de distribuição. (CAFISSO, 2021). A energia injetada na rede é monitorada por um medidor bidirecional, instalado pela concessionária, que registra separadamente os valores de consumo e geração. Isso possibilita que, ao final de cada ciclo mensal, o consumidor utilize os créditos acumulados para abater o valor conforme o sistema de compensação vigente. (REPUBLICA, 2022) (ANEEL, 2012)

Um importante ponto a se destacar sobre a incorporação da MMGD às redes de distribuição é a consequente mudança da característica passiva da rede, isto é, o sistema de distribuição, que antes configurava-se em um fluxo de potência seguindo, de forma tradicional, uma direção única, indo da subestação de distribuição para a rede de distribuição primária em média tensão (MT), passando pelo transformador de distribuição e seguindo para a rede de distribuição secundária em baixa tensão (BT), passa a possuir unidades geradoras de energia ao longo dos alimentadores, conforme ilustrado na Figura 4. Essa dinamicidade promove desafios operacionais, aumentando a complexidade do sistema, descentralizando as fontes de energia e apresentando um comportamento não linear ao longo do dia. (VILIBOR, 2023)

Figura 4 – SEP com geração distribuída



FONTE: Canal Solar, 2021

Em um contexto de popularização e aumento expressivo do quantitativo de unidades geradoras fotovoltaicas residenciais, revela-se na rede elétrica brasileira uma relevante injeção de potência ativa na rede secundária, afetando negativamente o funcionamento de equipamentos, tais como dispositivos de proteção e reguladores de tensão, e podendo aumentar os níveis de tensão ao longo do alimentador. As consequências dessas e outras modificações podem causar prejuízos tanto para as empresas de distribuição quanto para os consumidores. Dentre os impactos técnicos visualizados nas redes de distribuição com a alta concentração de clientes com MMGD, pode-se citar:

- Elevação do perfil de tensão em regime permanente;
- Potencialização das transgressões dos indicadores de conformidade de tensão;
- Possível crescimento do número de atuações de equipamentos de controle de tensão;
- Modificação no comportamento das perdas no sistema de distribuição;
- Progressão do nível de dificuldade do planejamento e operação das redes de distribuição. (VILIBOR, 2023)

Essas alterações, cuja solução técnica é, conforme determinado pelo agente regulador, de responsabilidade das distribuidoras de energia elétrica, acarretam em custos que precisam ser considerados pela concessionária em todas as etapas da gestão da infraestrutura de distribuição.

4.5 Crescimento da MMGD no Rio Grande do Norte

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) realiza estudos anuais, através da coleta de dados junto à ANEEL, para uma melhor visualização e entendimento do SEP brasileiro. Dentre os estudos supracitados, é disponibilizado ao público o acesso ao Painel de Dados de Micro e Minigeração Distribuída (PDGD), um compilado gráfico que permite a análise personalizada por Estado, Distribuidora e Segmento, dentre outros filtros.

A ferramenta atualmente exibe os dados da pesquisa realizada em 2023, apresentando dados históricos de capacidade instalada, geração de eletricidade e projeções de expansão para o mercado de MMGD no Brasil.

Para compreender o impacto da Geração Distribuída na rede elétrica do Rio Grande do Norte, é crucial analisar a magnitude desse fenômeno no estado. As Figuras 5 e 6 esquematizam essa realidade:

Figura 5 – PDGD - Capacidade Instalada no Rio Grande do Norte até 2023.



FONTE: Publicação no Site Oficial da EPE, 2023.

A Figura 5 apresenta 3 gráficos que, da esquerda para a direita, informam os dados de crescimento da MMGD no estado do Rio Grande do Norte. Em 2023, tinham-se 563 MW de potência instalada, 56.651 sistemas instalados e 57.387 consumidores beneficiados.

Em dezembro de 2024 a ABSOLAR divulgou seu relatório mensal, trazendo o panorama atualizado da energia solar fotovoltaica no país. (ABSOLAR, 2024b) Nele, o Rio Grande do Norte ocupa a décima quinta posição do ranking de estados brasileiros com maior potência instalada de geração distribuída, com o montante de 768,7 MW, o estado apresentou um aumento de mais de 36% em relação aos dados de 2023 expostos no painel da Figura 5.

O Rio Grande do Norte se mostra um estado com alto potencial para geração com foco nas energias renováveis. No mesmo balanço de dezembro, o estado aparece em quinto lugar geral para a capacidade de potência outorgada de usinas solares fotovoltaicas para geração centralizada, com 18.546 MW, ficando em quarto lugar na região nordeste, que ocupa 7 das 10 primeiras posições nessa categoria.

Figura 6 – PDGD - Projeção Até 2034 para o Rio Grande do Norte.



FONTE: Publicação no Site Oficial da EPE, 2023.

Na projeção feita pela EPE, conforme Figura 6, é esperado que em 2034 o Rio Grande do Norte conte com 1.426 MW de potência instalada, reflexo de 94.820 consumidores adeptos à MMGD. Esses números representam um crescimento previsto de 85,51 % nos próximos 10 anos para a capacidade instalada nessa modalidade, reforçando a necessidade de adequação de rede por parte da concessionária para abarcar a demanda, mantendo os níveis de qualidade da energia elétrica.

5 DISTÚRBIOS QUE INFLUENCIAM NA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

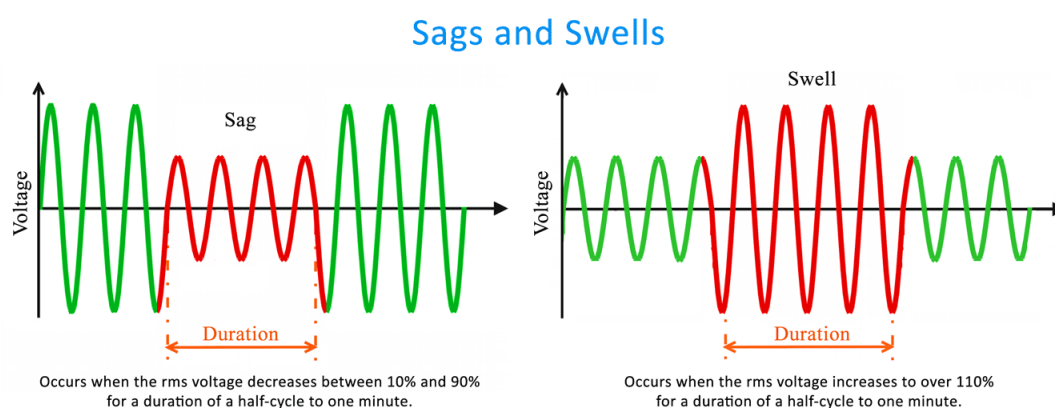
O conceito de qualidade de energia se refere a um conjunto de alterações de tensão, frequência, e forma de onda que podem ocorrer no sistema elétrico, tanto nas instalações dos consumidores quanto no sistema de distribuição da concessionária. A qualidade do fornecimento de energia é uma preocupação importante no planejamento e na operação do setor elétrico, pois afeta diretamente o desempenho e a durabilidade dos equipamentos elétricos, bem como a eficiência e confiabilidade do sistema de fornecimento de energia.

Os fatores que afetam a qualidade do produto, tanto em regime permanente quanto transitório, podem ser caracterizados de diversas maneiras: em função da duração do evento (curta, média ou longa duração), da faixa de frequências envolvidas (baixa, média ou alta frequência), dos efeitos causados (aquecimento, vibrações, cintilação luminosa, erro de medidas, perda de eficiência, redução da vida útil) ou de acordo com a intensidade do impacto (pequeno, médio ou grande impacto). Estes fenômenos serão abordados a seguir para uma melhor tipificação. (DECKMANN, 2020)

5.1 Afundamento e Elevação de Tensão

O afundamento de tensão, também conhecido como *sag*, e a elevação de tensão, ou *swell* são distúrbios temporários na magnitude da tensão elétrica, seguidos por uma recuperação, tipicamente ocorrendo em intervalos de um ciclo a alguns minutos, seus formatos de onda estão ilustrados na Figura 7. Estes fenômenos podem causar danos significativos à rede, a equipamentos e à qualidade energia entregue.

Figura 7 – Gráficos Afundamento (*sag*) e Elevação (*swell*) de Tensão



Fonte: TestGuy - Power Quality Analysis, 2019

- Afundamento de Tensão

O afundamento de tensão é um distúrbio caracterizado por uma redução temporária na tensão fornecida, que pode variar entre 10% e 90% abaixo do valor nominal, persistindo por um curto período que vai desde um ciclo até três minutos. (REPUBLICA, 1996) Esse fenômeno é comum em sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica e apresenta-se como uma preocupação para operadores de rede e consumidores, especialmente em ambientes industriais e comerciais, onde a precisão e a confiabilidade do fornecimento de energia são fundamentais.

As causas do afundamento de tensão são diversas, muitas vezes associadas a falhas nos sistemas de distribuição, como curtos-circuitos provocados por condições ambientais adversas ou defeitos nos componentes da rede. A ativação de dispositivos de proteção pode também resultar em afundamentos temporários de tensão. Ademais, o acionamento de grandes cargas, como motores de alta potência ou a energização de transformadores, pode criar uma demanda súbita de corrente que supera a capacidade instantânea da rede, levando a uma queda na tensão observada pelos consumidores. (DECKMANN, 2020)

Os impactos do afundamento de tensão podem ser extensos e significativos. Nos ambientes industriais, podem causar a parada de processos de produção, afetar a operação de motores e controladores lógicos programáveis, e até mesmo levar à perda de dados

em sistemas informatizados. Nos ambientes comerciais e residenciais, os efeitos podem ser notados no mau funcionamento de aparelhos eletrônicos e sistemas de iluminação. O custo associado a esses afundamentos pode ser elevado, incluindo não apenas as perdas de produção imediatas mas também danos a equipamentos e a necessidade de manutenção ou substituição precoce.

- Elevação de Tensão

As elevações de tensão, ou "*voltage swells*", são episódios transitórios na rede elétrica que se manifestam por aumentos na tensão efetiva de pelo menos 10% acima do valor nominal por curtos períodos, variando de um ciclo a três minutos. Este fenômeno possui raízes diversas, podendo decorrer da desconexão abrupta de cargas pesadas ou da ativação e desativação de equipamentos de compensação reativa, como capacitores. Ademais, falhas assimétricas nas linhas ou a operação inadequada de sistemas de controle automático de tensão podem contribuir para tais eventos. (DECKMANN, 2020)

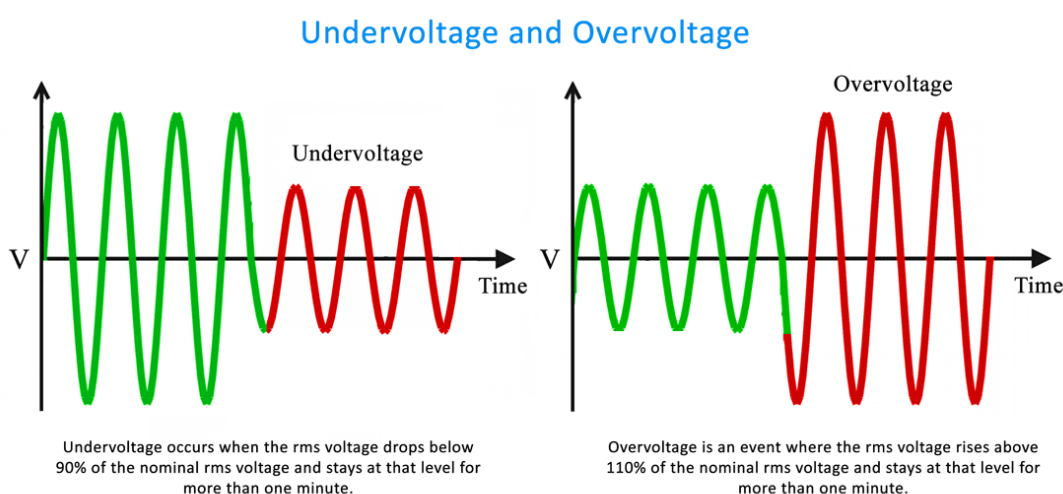
A relevância do estudo das elevações de tensão advém do fato de que elas representam riscos significativos para a integridade de equipamentos eletroeletrônicos. O estresse excessivo imposto a componentes e isolantes pode acelerar o envelhecimento e levar a falhas prematuras. Os danos são diversos, indo desde a queima de dispositivos até cenários mais graves, como incêndios. Especial atenção é demandada em ambientes industriais e residenciais onde a presença de microprocessadores, que estão em computadores e inúmeros dispositivos modernos, os torna susceptíveis a distúrbios elétricos.

Diante dos potenciais problemas, estratégias de mitigação são empregadas, destacando-se a instalação de reguladores de tensão e dispositivos supressores de surtos. Ajustes nos dispositivos de controle automático e revisões nos esquemas de proteção também são medidas preventivas eficazes. Além disso, estudos detalhados da rede elétrica, por meio de simulações de eventos, são indispensáveis para a prevenção de novos casos e para a adequação da infraestrutura existente.

5.2 Sobretensão e Subtensão

Sobretensão e subtensão são condições anômalas de tensão que desafiam a integridade dos sistemas de energia elétrica e podem causar impactos negativos significativos na operação de equipamentos e na segurança dos consumidores. Esses fenômenos estão no centro de numerosas discussões sobre qualidade de energia, uma vez que a tensão fora dos padrões normais pode levar a falhas operacionais, diminuição da vida útil de dispositivos e, em casos extremos, riscos de segurança. Seus formatos de onda estão ilustrados na Figura 8.

Figura 8 – Gráficos Sobretensão e Subtensão



Fonte: TestGuy - Power Quality Analysis, 2019

A sobretensão é uma condição onde a tensão excede o limite superior do valor nominal estipulado para um sistema de energia. Este evento não é somente um pico momentâneo, ela se configura como um prolongamento da elevação de tensão, podendo persistir por minutos ou horas. As causas são variadas e incluem descargas atmosféricas, desligamentos rápidos de grandes cargas, manobras indevidas no sistema de distribuição de energia ou, como será visto ao longo do trabalho, por influência da Geração Distribuída. O impacto das sobretensões é grave, principalmente em componentes sensíveis a variações de tensão, como semicondutores e isoladores, que podem sofrer danos irreversíveis ou ter sua vida útil reduzida.

Subtensão, por outro lado, é a condição onde a tensão cai abaixo do limite inferior da tensão nominal, menos de 90% da tensão de referência. As causas de subtensão podem ser sobrecargas no sistema de energia, falhas em equipamentos de regulagem de tensão ou condições adversas no sistema de transmissão e distribuição, como as causadas por fenômenos climáticos severos. A subtensão é particularmente problemática para equipamentos como motores elétricos, que dependem de tensões adequadas para manter

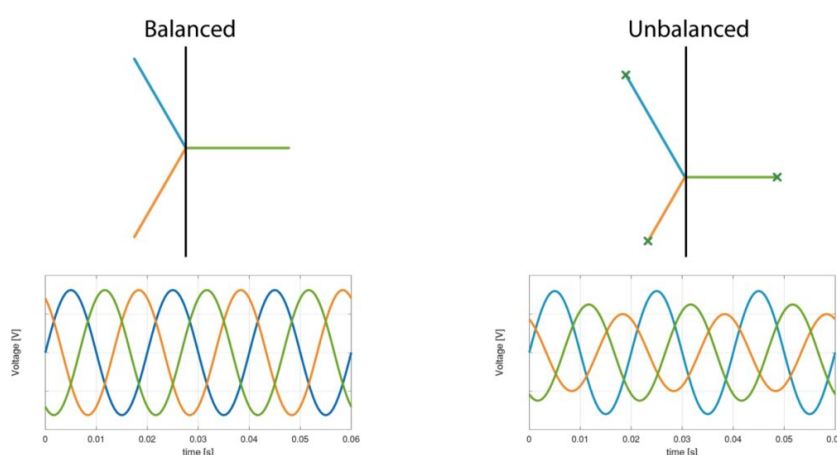
o torque e a velocidade; operar sob subtensão pode resultar em aquecimento excessivo e falhas prematuras (KUNDUR; BALU; LAUBY, 2017).

Ambos os fenômenos, sobretensão e subtensão, refletem a importância de sistemas de energia resilientes e bem regulados. A confiabilidade na distribuição de energia é um componente crítico da infraestrutura moderna de uma distribuidora, e como tal, exige uma abordagem sistemática e normatizada para garantir que todos os usuários tenham acesso à energia de qualidade e que seus equipamentos operem dentro dos parâmetros de segurança. As diretrizes fornecidas por entidades como a IEC e o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) servem como um padrão internacional para a identificação, medição e mitigação de sobretensões e subtensões, orientando as melhores práticas para o projeto e manutenção de sistemas elétricos resilientes e confiáveis.

5.3 Desequilíbrios de Tensão

O desequilíbrio de tensão é um distúrbio de qualidade de energia frequentemente encontrado em sistemas de energia elétrica, particularmente em redes polifásicas, onde a tensão em uma ou mais fases difere significativamente das outras. Este fenômeno pode ser atribuído a uma variedade de causas, incluindo distribuição desigual de cargas entre as fases, operação irregular de grandes equipamentos monofásicos ou falhas em componentes da rede, como transformadores ou linhas de transmissão. O desequilíbrio pode ser simétrico, onde as tensões em todas as fases estão fora dos níveis nominais, ou assimétrico, onde a tensão em uma ou duas fases é afetada, enquanto as outras permanecem normais ou próximas do normal, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 – Gráficos Desequilíbrio de Tensão



Fonte: TestGuy - Power Quality Analysis, 2019

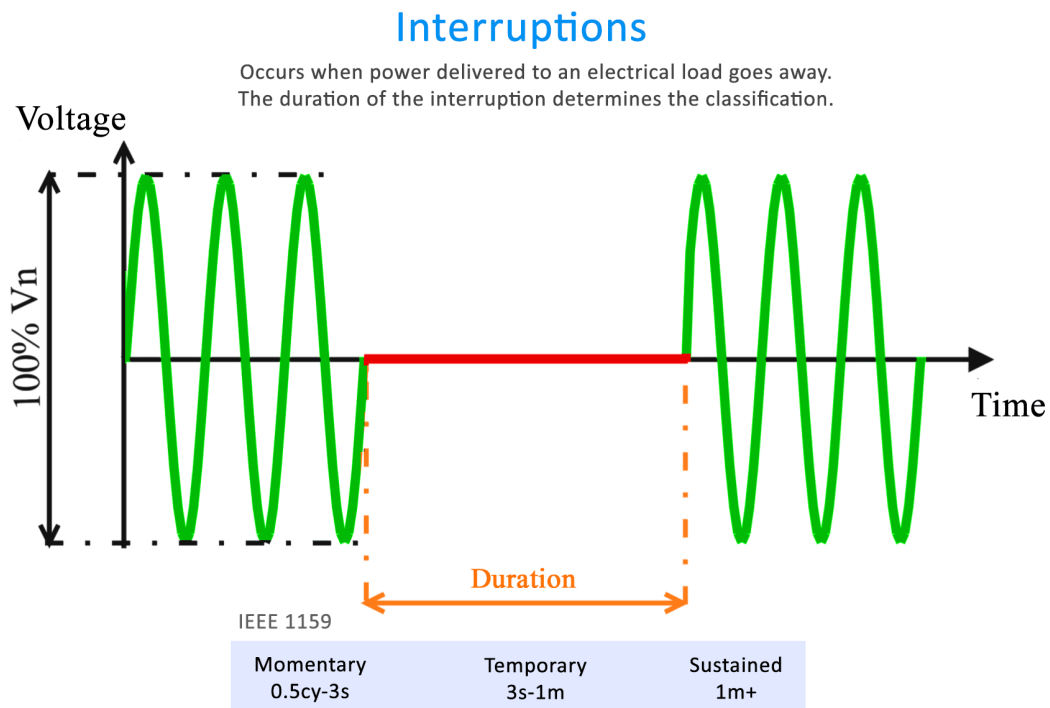
As consequências de um desequilíbrio de tensão são vastas e podem levar a problemas operacionais sérios. Por exemplo, motores trifásicos expostos a tensões desequilibradas podem experimentar aumento nos níveis de corrente, superaquecimento, vibrações anormais e perda de torque. Com o tempo, isso pode acelerar o desgaste mecânico e elétrico, reduzindo a vida útil do motor. Além disso, o desequilíbrio pode causar mau funcionamento em equipamentos eletrônicos sensíveis, como computadores e controladores lógicos programáveis (CLPs), afetando assim a automação e os processos controlados por esses sistemas.

O monitoramento contínuo e a análise da qualidade da energia são essenciais para identificar e avaliar desequilíbrios de tensão. Os sistemas de medição de energia modernos são capazes de detectar variações de tensão em tempo real e podem ajudar a diagnosticar a origem e a severidade do desequilíbrio. Isso é fundamental não apenas para a correção do problema atual, mas também para o desenvolvimento de medidas preventivas que garantam a estabilidade do sistema no futuro.

5.4 Interrupções (Momentânea, temporária e permanente)

As interrupções no fornecimento de energia elétrica são eventos nos quais a tensão cai para zero em todas as fases, conforme Figura 10. Estes eventos são comumente classificados com base em sua duração e efeitos na carga: interrupções momentâneas, temporárias e permanentes. Cada uma dessas categorias tem características distintas e impactos específicos nos consumidores e sistemas elétricos.

Figura 10 – Gráfico Interrupções



Fonte: TestGuy - Power Quality Analysis, 2019

- Interrupções Momentâneas

As interrupções momentâneas são reduções de curtíssima duração na tensão fornecida ao consumidor, com a tensão caindo para zero por um período inferior a três segundos. São causadas geralmente por falhas transitórias, como um galho de árvore tocando uma linha de transmissão ou um veículo colidindo com um poste de energia. Os sistemas de proteção do sistema elétrico, como relés automáticos, são projetados para responder a essas condições, isolando rapidamente e depois restabelecendo a tensão após a limpeza ou a passagem da condição de falha.

Apesar de breves, as interrupções momentâneas podem ser muito perturbadoras, particularmente em processos industriais ou em equipamentos sensíveis, como computadores ou sistemas de comunicação, que podem ser reiniciados ou sofrer falhas operacionais.

Para mitigar esses efeitos, dispositivos de proteção como *nobreaks* e filtros de linha são amplamente utilizados. (DECKMANN, 2020)

- Interrupções Temporárias

As interrupções temporárias são perdas de tensão que duram mais do que uma interrupção momentânea, mas são resolvidas em um período relativamente curto, geralmente não excedendo alguns minutos. Estas podem ser causadas por defeitos em componentes do sistema de energia que requerem uma intervenção manual ou automática para restaurar o serviço.

Os efeitos das interrupções temporárias variam amplamente, desde a inconveniência para consumidores residenciais até perdas significativas de produção em ambientes industriais. Além disso, essas interrupções podem causar estresse térmico em equipamentos elétricos e mecânicos, potencialmente reduzindo sua vida útil e confiabilidade.

- Interrupções Permanentes

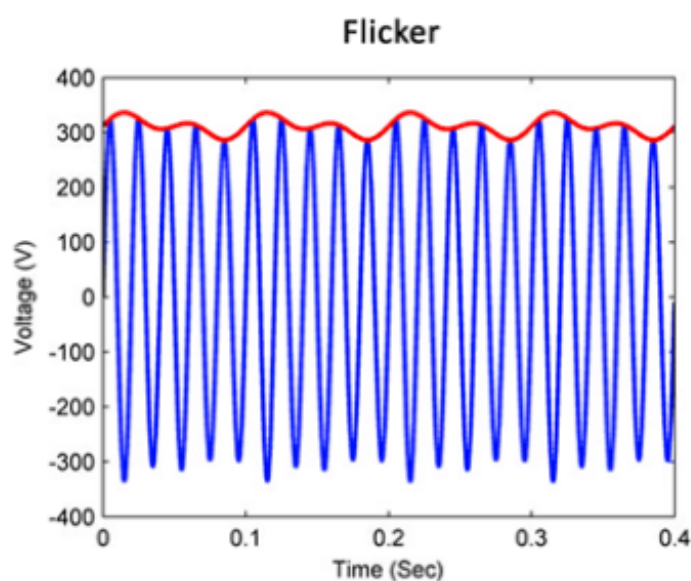
Interrupções permanentes são aquelas onde o fornecimento de energia é interrompido e não é restaurado automaticamente. O termo "permanente" não implica que o serviço nunca será restaurado, mas sim que a intervenção manual é necessária para solucionar o problema. Estas interrupções podem ser devidas a falhas graves, como danos substanciais em linhas de transmissão ou equipamentos de subestação, exigindo reparos ou substituição de componentes.

As interrupções permanentes são as mais severas para os consumidores, podendo resultar em prejuízos econômicos significativos para negócios e transtornos consideráveis para residências. As empresas muitas vezes dependem de geradores de emergência para manter as operações críticas durante esses eventos, enquanto as autoridades trabalham para reparar os danos e restabelecer o fornecimento normal de energia.

5.5 Flutuações de Tensão

Flutuações de tensão são variações na qualidade da energia elétrica que se referem a oscilações na amplitude da tensão fornecida, como ilustrado na Figura 11. Essas flutuações podem ser percebidas visualmente, principalmente através do piscar de lâmpadas, e são muitas vezes descritas como 'flicker' em inglês. Tais variações são particularmente perturbadoras quando frequentes e podem afetar tanto a eficiência dos equipamentos elétricos quanto o conforto e bem-estar dos usuários finais. (DECKMANN, 2020)

Figura 11 – Gráfico Flutuação de Tensão



Fonte: TestGuy - Power Quality Analysis, 2019

A origem das flutuações de tensão pode ser diversificada, incluindo o arranque de grandes motores industriais, ciclos operacionais de fornos a arco em siderúrgicas, ou irregularidades no fornecimento de energia devido à geração de energia renovável intermitente, como a eólica e a solar. As flutuações também podem ser causadas por ações intencionais ou falhas em dispositivos reguladores de tensão dentro da rede elétrica.

O impacto dessas flutuações não se limita apenas a incômodos visuais. Elas podem também levar a uma redução na vida útil de componentes eletrônicos e equipamentos elétricos devido ao estresse constante causado por variações de tensão. Por exemplo, equipamentos de computação e outros dispositivos eletrônicos sensíveis requerem uma alimentação estável para funcionar corretamente e podem experimentar erros operacionais ou danos a longo prazo quando expostos a flutuações.

6 ESTUDO DE CASO COM MÉTODO RTCP

6.1 Introdução

Normalmente, os reguladores de tensão são instalados afastados dos centros de consumo ou das subestações, por diversas vezes em áreas rurais, para garantir a qualidade da energia fornecida. Uma das principais razões é a compensação da queda de tensão que ocorre ao longo das linhas de transmissão devido à resistência e reatância das mesmas.

Além disso, os reguladores de tensão minimizam as perdas de energia e melhoram a estabilidade da rede elétrica, ajustando automaticamente a tensão em resposta a variações de carga e outros fatores. Logo, com a instalação de reguladores de tensão em pontos estratégicos, é possível manter a tensão dentro dos limites aceitáveis, assegurando uma distribuição o mais uniforme possível da tensão para todos os consumidores, reforçando o cumprimento das normas e regulamentações vigentes no assunto. (SHORT, 2003)

Entretanto, frente à problemática das numerosas e constantes reclamações e ocorrências abertas pelos clientes GD, concentrados nos condomínios objetos deste estudo, repensou-se o formato tradicional do regulador de tensão. O setor de Planejamento de Rede da Neoenergia Cosern realizou uma série de investimentos e estudos afim de sanar as oscilações e sobretensões no local, como a divisão e o recondutoramento de circuitos. Por fim, com a persistência do problema, foi elaborada uma nova solução, a utilização de um Banco Regulador de Tensão (BRT) próximo à carga desses condomínios, tendo sua operação e programação modificadas com relação às utilizadas em BRTs de linha comuns. Esse regulador, diferentemente do padrão explanado acima, foi instalado a uma distancia radial de menos de 6km da subestação. O novo método utilizado em sua configuração foi nomeado de "Regulação de Tensão Controlada por Potência"(RTCP) e será esclarecido neste capítulo.(JUNIOR, 2023)

6.2 Cenário de Ocorrências Anteriores à Instalação do RT

Nas Figuras 12 e 13 apresentam-se dois exemplos de ocorrências registradas por clientes que possuem sistemas fotovoltaicos em suas residências, ambos na área onde o regulador de tensão foi instalado. Nos meses que antecederam a instalação do regulador, diversos clientes relataram problemas semelhantes, muitos deles com reclamações recorrentes e abertura frequente de chamados.

Figura 12 – Ocorrência de Oscilação de Tensão em junho - Cliente 1.

FONTE: Sistema de Operação - Neoenergia Cosern, 2023.

- Unidade Geradora: Sim
- Data: 08/06/2023
- Reclamação: Oscilação de Tensão
- Descrição da Ocorrência: "CLIENTE RECLAMA DE ALTA TENSÃO EM SUA REDE QUE ESTA CAUSANDO MAU FUNCIONAMENTO NO SEU MEDIDOR SOLICITA ATENDIMENTO DA EQUIPE."

Figura 13 – Ocorrência de Oscilação de Tensão em abril - Cliente 2.

Módulo de Operação

Fechar Log UTD Rede elétrica Viaturas Áreas atingidas NDSs Sls AVL APP - COI Despacho em Lote Viaturas alocadas

Ocorrências pendentes Detalhe da OC Manobras NDSs Sls AVL APP - COI Despacho em Lote Viaturas alocadas

Vincular Alterar Imprimir Subst Medidor Reenviar OC Enviar Tarefa Vip Callback Tipo Geração TRIAGEM TEMPO

Localização / Pesquisa Ocorrência principal NR * 2023 4

Vinculadas Sequencial OC

PA / Base / Status PA NATAL Base NTL-20-NOVA PARNAMIRIM Grau ALTO Status FINALIZADO Abrangência PDF INDIVIDUAL Pt Def. NAO IDENTIFICADO Ref. Def. Instalação

Atendimento da OC Criação 27/04/2023 08:27:01 Acionamento 28/04/2023 07:25:01 0d 22h 58m Aceite 28/04/2023 07:40:50 0d 00h 15m Chegada 28/04/2023 07:45:01 0d 00h 04m Conclusão 28/04/2023 13:08:35 0d 05h 23m Tempo total 1d 04h 41m Previsão 28/04/2023 01:10:46

Dados da reclamação Município PARNAMIRIM Bairro Localidade PARNAMIRIM - AREA URBANA UTD UTD METROPOLITANA Logradouro CEP Número Apto Bloco Edifício Cliente Fone Medidor Contrato

Reclamação Reclamação real * OSCILACAO DE TENSÃO OSCLICAO DE TENSÃO Ponto de referência Número Poste

Informações adicionais CLIENTE RELATA JA A UMA SEMANA ESTA CHEGANDO ALTA TENSÃO NO LOCAL DE 240 A 245 WTS CLIENTE MICRO GERACAO CAUSANDO DESLIGAMNETO DO INVERSOR

Unidade Geradora SIM

Observações do atendimento Serviço Subst UAR Material Editar Relatório Passar essa oc entre as 12hs e 14hs, no horário de pico, para a equipe registrar a tensão máxima q está dando. RI 10mm, disjuntor 50a, dois vãos de 35mm e um de 120mm até o tf. Tf de 150kv

Manobras Encerrar OC Cancelar OC NDS SI RC Nv Tensão

Origem CONSUMIDOR Natureza INTEMPESTIVA Componente INSTALACAO DO CLIENTE Causa NIVEL DE TENSÃO EM REGIME PERMANENTE Conhecimento RECLAMACAO DO CONSUMIDOR Decorrência

Prioridade: 11. > Callback 06:02 28/04: NAO COMPLETOU.

FONTE: Sistema de Operação - Neoenergia Cosern, 2023.

- Unidade Geradora: Sim
- Data: 28/04/2023
- Reclamação: Oscilação de Tensão
- Descrição da Ocorrência: "CLIENTE RELATA JA A UMA SEMANA ESTA CHEGANDO ALTA TENSÃO NO LOCAL DE 240 A 245 VOLTS CLIENTE MICRO GERACAO CAUSANDO DESLIGAMENTO DO INVERSOR"

Na ocorrência de abril, o Cliente 2 informa que a sobretensão está acarretando no desligamento de seu inversor fotovoltaico, medida de proteção do equipamento. A atuação dessa proteção foi citada em grande parte das reclamações abertas na região, demonstrando a insatisfação dos clientes com a "perda" de geração no período em que o equipamento para de funcionar, o que ocorre geralmente nos horários com maior pico de geração.

6.3 Regulação de Tensão Controlada por Potência (RTCP)

O funcionamento do BRT estudado se baseia no método de Regulação de Tensão Controlada por Potência (RTCP), identificando o sentido e a intensidade do fluxo de potência para realizar os ajustes de tensão mais adequados às condições do determinado momento.

Nesse método, tem-se definido na programação do relé de controle grupos de regulação que são configurados por níveis e direcionalidade de potência passante no equipamento regulador de tensão, para cada um destes grupos são estabelecidas tensões de referência diferentes para a comutação automática de TAP (Terminal de Ajuste de Potência). As tensões de referência são definidas de tal forma que os clientes no final do circuito, sejam eles consumidores e/ou geradores, não tenham seus níveis de tensão de atendimento fora dos limites de qualidade permitidos.

Os grupos de ajustes são divididos em 32 TAPs, conforme Tabela 1, primeiramente pelo sentido do fluxo de potência: direto ou inverso, após isso cada um deles se divide em um percentual da potência solicitada de consumo ou injetada de geração dos clientes. Os 32 TAPs podem flutuar entre 16 TAPs até +10% e 16 TAPs até -10% da tensão nominal, significando uma variação de 0,625% em cada nível.

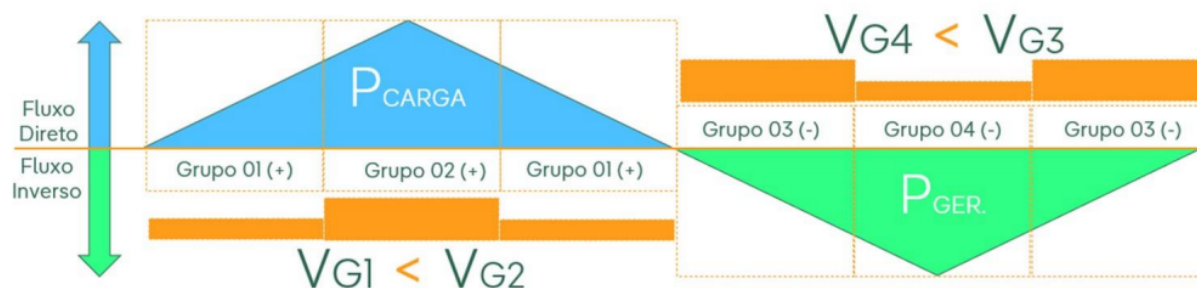
Tabela 1 – Tabela de Relação dos TAP's

RELAÇÃO DE BOBINA SÉRIE			
Posição Neg	Nominal	Posição Pos	Nominal
0	1,000	0	1,000
-1	1,006	1	0,994
-2	1,013	2	0,988
-3	1,019	3	0,981
-4	1,025	4	0,975
-5	1,031	5	0,969
-6	1,038	6	0,963
-7	1,044	7	0,956
-8	1,050	8	0,950
-9	1,056	9	0,944
-10	1,063	10	0,938
-11	1,069	11	0,931
-12	1,075	12	0,925
-13	1,081	13	0,919
-14	1,088	14	0,913
-15	1,094	15	0,906
-16	1,100	16	0,900

FONTE: (SILVA; DIAS, 2020)

A Figura 14 demonstra o comportamento do fluxo de potência no decorrer de um ciclo diário para uma rede com forte presença de GD, como a estudada.

Figura 14 – Comportamento do Método RTCP



FONTE: (JUNIOR, 2023)

Ao lado esquerdo, em azul, tem-se a situação de fluxo direto de potência, neste caso, no sentido Subestação \rightarrow Carga. Para essa configuração (fora do horário de geração solar), como a carga demanda mais potência, comuta-se o tap do regulador de forma a aumentar-se a tensão nominal proporcional à solicitação dos clientes.

Já na seção direita da ilustração, em verde, a situação de fluxo inverso de potência, neste caso, no sentido Carga \rightarrow Subestação. Para essa configuração (coincidindo com os horários de maior geração solar), verifica-se uma comutação de tap redutiva, proporcional à injeção feita pelos clientes GD.

O método RTCP pode ser aplicado em todos os equipamentos que dispõem da opção de regulação de tensão disponíveis ao longo do sistema elétrico de potência, sejam eles transformadores de subestações, bancos reguladores de tensão de média e baixa tensão, e até em transformadores de BT que dispõem de sistema de comutação automática sob carga. (JUNIOR, 2023)

6.4 Instalação e Aspectos Construtivos

6.4.1 Obra de Instalação

A obra de instalação do conjunto foi realizada em setembro de 2023 por uma equipe da Empresa Prestadora de Serviços (EPS), terceirizada responsável pela área. Na Figura 15 estão registradas as etapas inicial e final da instalação. Nela, como componentes principais, foram utilizados dois postes 12/1000 de concreto circular e 2 conjuntos de chaves seccionadoras 15 kV 630 A, além do Relé e dos bancos reguladores.

Figura 15 – Instalação do Regulador de Tensão.



(a) Início da Instalação



(b) Instalação Finalizada

FONTE: Autoral, 2023.

6.4.2 Relé RUA-01 - TAPELETRO

O Relé Único Assimétrico, RUA-01, é um controle universal que incorpora uma nova filosofia de atuação no sistema. Exibido na Figura 16, ele pode comandar até três reguladores de tensão monofásicos em um banco e executar a função de sincronismo, tendo um painel de fácil visualização para o acompanhamento de seu desempenho, conforme Figura 17. Com essas funções combinadas, o controle RUA-01 minimiza os desequilíbrios de tensão na rede e assegura níveis de qualidade durante o fornecimento de energia elétrica. Além disso, o RUA-01 permite a automação dos bancos de reguladores de tensão monofásicos através de sistemas de comunicação remota, facilitando sua operação.

Figura 16 – Relé RUA-01



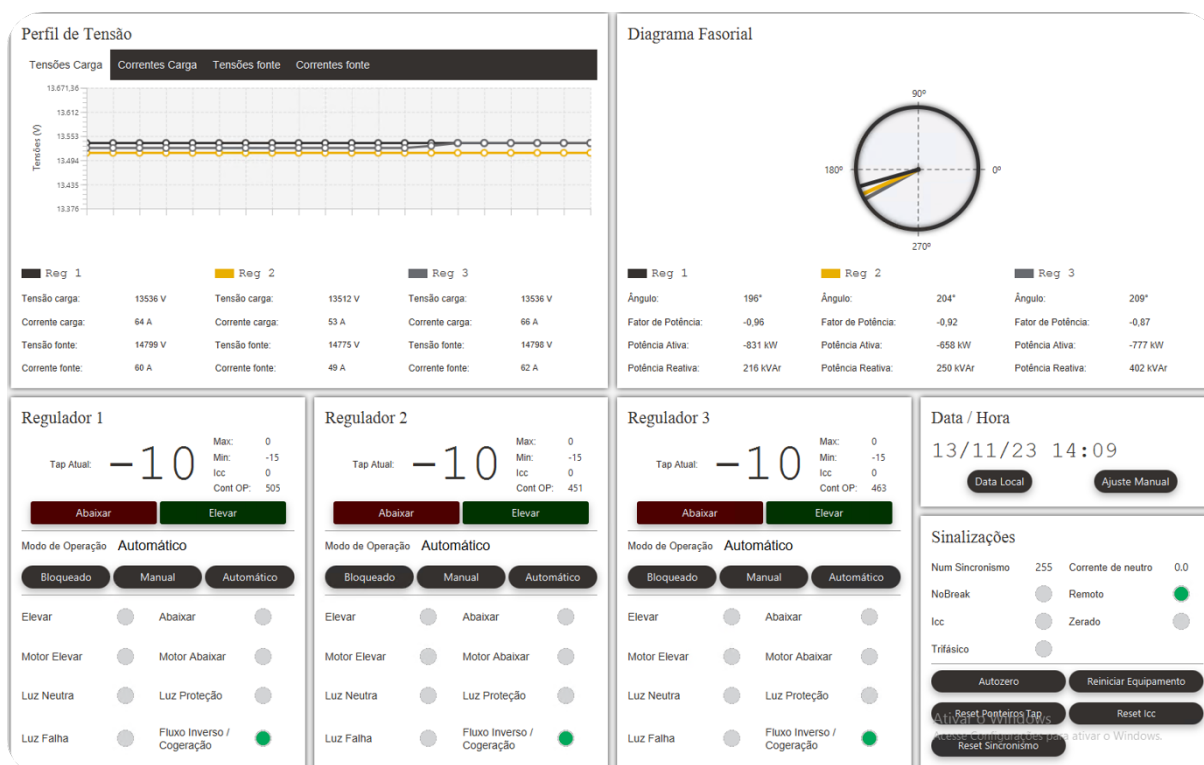
FONTE: (TAPELETRO, 2021)

O controle RUA-01 possui um módulo *nobreak* opcional. Quando ocorre uma falta de energia, os reguladores normalmente ficam em tapes elevados, o que causa sobretensão quando a rede é restabelecida, agravada pelo uso de reguladores em cascata. O sistema *nobreak* permite ao controle zerar o banco de reguladores durante esse evento, evitando sobretensões e possibilitando o uso seguro de reguladores em cascata. (TAPELETRO, 2021)

Este relé possui várias vantagens, dentre elas:

- Operação em modo Monofásico (Livre ou Assistido) ou Trifásico (Sincronizado);
- Três grupos de ajustes programados por corrente ou Data;
- Contempla operação em redes contendo CO-GERAÇÃO com ajustes específicos;
- Bloqueio do comutador por sobrecorrente ou subtensão;
- Operação rápida sob condição de tensão acima ou abaixo dos limites aceitáveis;
- Registro de operação;
- Log de eventos.

Figura 17 – Painel de Visualização do Relé RUA-01



FONTE: Apresentação Neoenergia Cosern, 2023.

6.5 Resultados

A área abrangida pelo Regulador, conforme Figura 18, tem em seu escopo um total de 2700 Unidades Consumidoras, das quais 850 possuem sistema de geração fotovoltaica em suas residências.

Figura 18 – Área abrangida pelo Regulador de Tensão



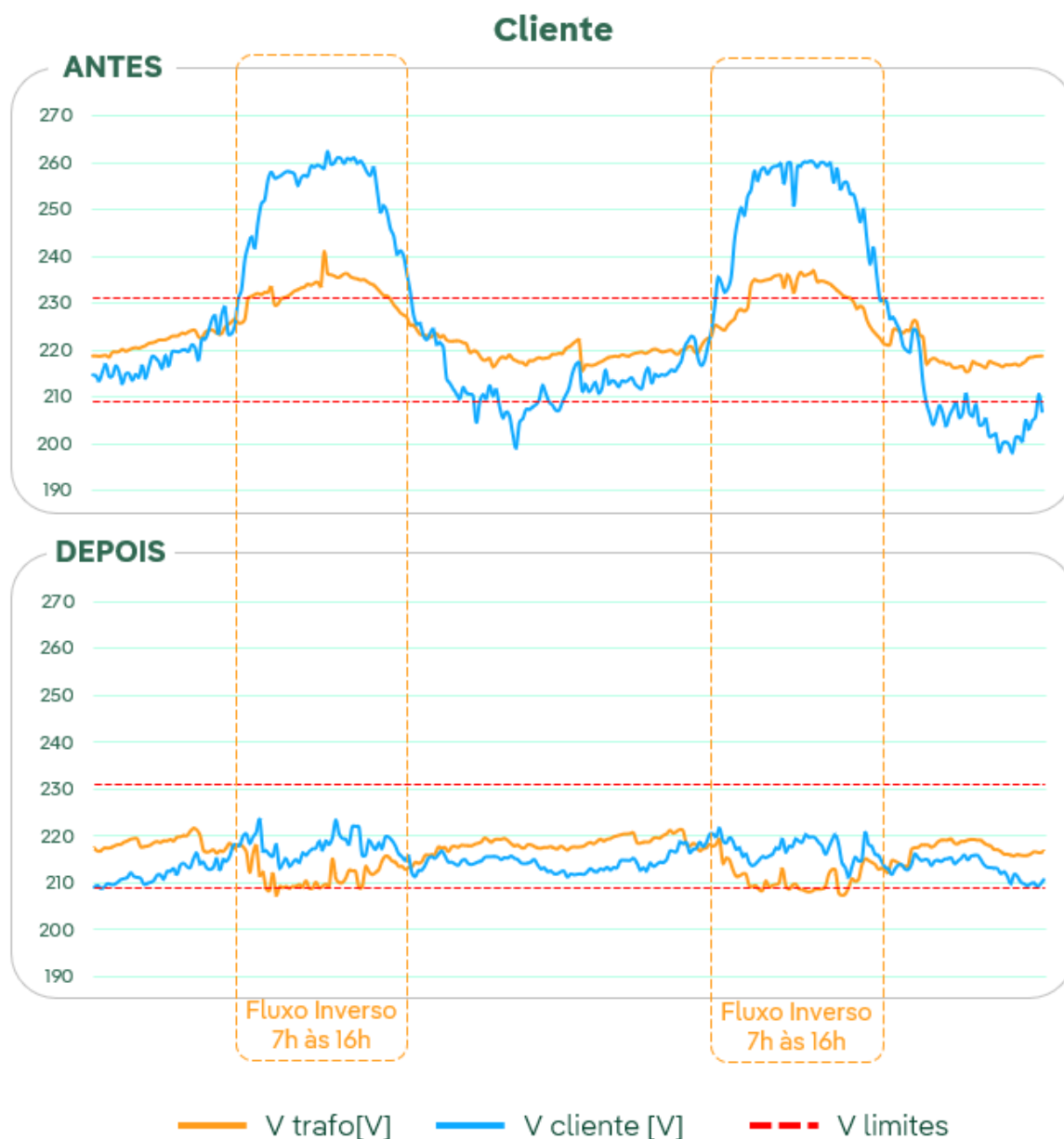
FONTE: Apresentação Neoenergia Cosern, 2023.

As medições apresentadas na Figura 19 foram coletadas de forma contínua em um período de 48h para a construção dos gráficos. No bloco superior, marcado como "ANTES" está a aferição que antecede a programação do Regulador de Tensão com o método RTCP, já no inferior, vê-se a mudança na dinâmica após a implementação da Regulação de Tensão Controlada por Potência.

O acompanhamento foi realizado com o que se define aqui como "Último Cliente", sendo ele uma residência com sistema fotovoltaico no circuito o mais afastado possível do RT, de modo a ser uma posição desfavorecida e com maior susceptibilidade às perdas ao longo da linha de distribuição. Toma-se este cliente como referência, pois, por sua posição no sistema, assume-se que ao corrigir a tensão no seu ponto de consumo, as demais residências também devem seguir o padrão.

A tensão de leitura nos pontos de conexão com tensão nominal em 220V deve situar-se entre 202V e 231V no ponto de conexão para um bom desempenho. (ANEEL, 2020)

Figura 19 – Gráfico de Resultados - Medição no Último Cliente



FONTE: Apresentação Neoenergia Cosern

- ANTES do método RTCP - Medição no Último Cliente

No período demarcado de fluxo inverso (7h às 16h), onde tem-se a presença da geração fotovoltaica mais intensamente nas unidades consumidoras, nota-se que a tensão aferida no cliente de referência chega à marca dos 260V durante o horário de pico, ultrapassando mais de 12,5% o limite máximo definido de 231V. Essa transgressão acarreta normalmente no desligamento dos inversores fotovoltaicos residenciais, uma das maiores queixas dos clientes GD, como já citado na segunda seção deste capítulo.

- DEPOIS do método RTCP - Medição no Último Cliente

Após a aplicação do método RTCP, a medição no cliente de referência demarcada em azul sofre uma brusca transformação, se enquadrando nos limites definidos por norma para um bom funcionamento de sua rede interna.

Nota-se um dinamismo com relação à medição no trafo, evidenciando os efeitos do método RTCP: Fora do horário de fluxo inverso o trafo apresenta medições de rede comuns, tendo sua tensão no secundário maior que a apresentada no cliente, entretanto, no período demarcado como pico de geração, é verificada a inversão de papéis, com a redução da tensão no secundário do trafo para níveis inferiores à tensão do cliente, ocasionada pelos ajustes no RT. Esse processo permite o enquadramento tanto do trafo quanto do cliente nos limites desejados de tensão.

7 CONCLUSÃO

O foco deste trabalho foi analisar e divulgar a eficácia de um projeto pioneiro, que visa a melhoria da qualidade de energia elétrica entregue ao consumidor final. No decorrer da pesquisa, foi possível observar a problemática da integração de uma alta concentração de clientes detentores de sistemas fotovoltaicos residenciais, introduzida no Capítulo 4 e com exemplos reais de ocorrências no Capítulo 6, na rede elétrica e como isso afeta o dia a dia dos consumidores e da concessionária.

A Regulação de Tensão Controlada por Potência (RTCP), com bancos reguladores de tensão, dá uma nova funcionalidade estratégica a um conceito já existente de comutação de TAP sob carga, mais comumente visto em transformadores. Os resultados obtidos foram promissores, revelando que o projeto foi um bom investimento por parte da distribuidora norte-rio-grandense.

Nesse sentido, vê-se que o presente trabalho contribui para evidenciar a relevância de uma análise detalhada frente às mudanças significativas pelas quais o sistema elétrico brasileiro vem passando, especialmente no que tange à integração da Geração Distribuída. Ao longo deste estudo, buscou-se promover uma reflexão sobre a expansão da MMGD no território brasileiro, com foco no estado do Rio Grande do Norte, e os impactos operacionais e econômicos da GD nas redes elétricas, destacando o desenvolvimento de soluções que atendam à necessidade de modernização da infraestrutura existente.

Conclui-se que o conhecimento exibido neste trabalho representa um avanço para o planejamento de um sistema elétrico mais sustentável, seguro e eficiente. O estudo de caso de soluções reais já implementadas incentiva um maior diálogo e investigação sobre os impactos das GDs e como mitigá-los. O avanço do conhecimento na infraestrutura do SEP brasileiro é de interesse público e torna-se cada vez mais essencial para sua manutenção sadia. Este estudo visa dar um passo à frente na construção de um conhecimento coletivo, de forma a fortalecer o vínculo entre a produção de conteúdo acadêmico e as soluções operacionais desenvolvidas nas empresas do setor elétrico brasileiro.

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. *Balanço Energético Nacional*. 2024. 07, 2024. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/noticia/https-canalsolar-com-br-participacao-da-solar-na-matriz-eletrica-sobe-de-116-para-17-em-um-ano/>><https://www.absolar.org.br/noticia/https-canalsolar-com-br-participacao-da-solar-na-matriz-eletrica-sobe-de-116-para-17-em-um-ano/>.
- ABSOLAR. *Panorama da solar fotovoltaica no Brasil*. 2024. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>><https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>.
- ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SODER, L. Distributed generation: a definition. *Electric power systems research*, Elsevier, v. 57, n. 3, p. 195–204, 2001.
- ANEEL. *RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012*. 2012.
- ANEEL. *Variáveis de Faturamento das Componentes Tarifárias*. 2021. 07, 2024.
- ANEEL, A. N. de E. E. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional–PRODIST: Módulo 8 Qualidade da Energia Elétrica*. 2020.
- BLUME, S. W. *Electric power system basics for the nonelectrical professional*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016.
- CAFISSO, H. R. *ANÁLISE DO IMPACTO DA INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE FONTE SOLAR EM CIRCUITOS DE BAIXA TENSÃO*. 2021.
- COSERN, N. *Aneel define índice de revisão das tarifas da Neoenergia Cosern*. 2023. 07, 2024. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/web/rn/w/naeel-define-indice-revisao-tarifas>><https://www.neoenergia.com/web/rn/w/naeel-define-indice-revisao-tarifas>.
- DECKMANN, J. A. P. S. M. Avaliação da qualidade da energia elétrica. *UNICAMP/FEEC/DSE*, 2020.
- GREENER. Análise do marco legal da geração distribuída. *Fórum de Energias Renováveis de Roraima*, 2022.
- IEC. Iec 61000-2-2 - compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems. *INTERNATIONAL STANDARD*, 2017.
- IEC. *International Electrotechnical Commission*. 2024. 07, 2024. Disponível em: <<https://www.iec.ch/homepage>><https://www.iec.ch/homepage>.
- JUNIOR, L. B. D. S. Valdir Lima da S. Regulação de tensão controlada por potência. *Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica*, v. 1, n. 1, 2023.
- KUNDUR, P. S.; BALU, N. J.; LAUBY, M. G. Power system dynamics and stability. *Power System Stability and Control*, McGraw-hill, v. 3, p. 27–33, 2017.

- ONS, O. N. do S. E. *O Sistema Interligado Nacional*. 2024. 07, 2024. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>><https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>.
- REPUBLICA, P. da. *LEI N^o 9.427, DE 26 DE DEZEMBRO DE 1996*. 1996.
- REPUBLICA, P. da. *LEI N^o 14.300, DE 6 DE JANEIRO DE 2022*. 2022.
- SHORT, T. A. *Electric Power Distribution Handbook*. [S.l.]: CRC press, 2003.
- SILVA, D. T.; DIAS, M. P. Ensaio qualitativo em reguladores de tensão de 32 degraus. *Caderno de Estudos em Engenharia Elétrica*, v. 2, n. 2, 2020.
- TAPELETRO. *CONTROLE PARA BANCO DE REGULADORES DE TENSÃO MONOFÁSICOS*. 2021. 07, 2024. Disponível em: <<https://tapeletro.com.br/produto/controle-para-banco-de-reguladores-de-tensao-monofasicos>><https://tapeletro.com.br/produto/controle-para-banco-de-reguladores-de-tensao-monofasicos>.
- VILIBOR, H. de O. Análise de impactos da microgeração fotovoltaica no controle de tensão, compensação de potência reativa e perdas técnicas em redes de distribuição. *Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica*, 2023.