

**UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS DE ERECHIM
ÁREA DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

GABRIEL PRIMO FRANCESCHI

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DOS SISTEMAS DE MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA
FOTOVOLTAICA NA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DAS REDES DE
BAIXA TENSÃO**

ERECHIM - RS

2024

GABRIEL PRIMO FRANCESCHI

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DOS SISTEMAS DE MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA
FOTOVOLTAICA NA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DAS REDES DE
BAIXA TENSÃO**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Elétrica como requisito parcial à obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
Elétrica, Área de Engenharias e Ciência da
Computação da Universidade Regional
Integrada do Alto Uruguai e das Missões –
Câmpus de Erechim.**

Orientador: Prof. Me. Deividi Felipe Zaions

**ERECHIM - RS
2024**

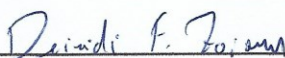
GABRIEL PRIMO FRANCESCHI

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DOS SISTEMAS DE MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA
FOTOVOLTAICA NA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DAS REDES DE
BAIXA TENSÃO**


**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Elétrica como requisito parcial à obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
Elétrica, Área de Engenharias e Ciência da
Computação da Universidade Regional
Integrada do Alto Uruguai e das Missões –
Câmpus de Erechim.**

Erechim, 13 de dezembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Deividi Felipe Zaions (Orientador)
URI Erechim



Prof. Dr. Cássio Luciano Baratieri (Examinador)
URI Erechim



Prof.^a Me. Claodomir Antonio Martinazzo (Examinador)
URI Erechim

Dedico este trabalho aos meus pais, que nunca mediram esforços para que eu pudesse chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me guiar nesse caminho, pela força, sabedoria e fé que me foram concedidos ao longo de toda trajetória acadêmica e de construção deste trabalho.

Aos meus pais, meu mais sincero agradecimento. Obrigado pelo incentivo de sempre, por não me deixarem desistir, por me encorajar nas vezes em que parecia estar tudo dando errado, sem vocês nada disso seria possível.

Aos meus colegas que me proporcionaram desfrutar dessa jornada da melhor maneira possível, pelas trocas de experiências, pelas risadas e também pelo companheirismo de sempre.

Aos professores do curso de Engenharia Elétrica, que contribuíram para meu crescimento profissional e pessoal, com os ensinamentos em sala de aula. Em especial, ao meu orientador, professor Me. Deividi Felipe Zaions que me guiou nessa fase final da minha jornada acadêmica.

Our greatest weakness is resistance. The surest path to success is always to try just one more time.

(Thomas Edison)

RESUMO

Buscando por soluções para geração de energia de forma limpa e sustentável, os avanços nas tecnologias possibilitaram a geração de energia através da radiação do sol, assim conhecida como geração solar fotovoltaica. A implementação desses sistemas de geração, por meio de pequenos geradores alocados em diversos pontos do sistema elétrico, através do que chamamos de Geração Distribuída, em que os consumidores podem gerar sua própria energia e injetar o excedente na rede das concessionárias. Entretanto, as redes de distribuição, que foram projetadas para suprir apenas a demanda de um curso unidirecional de energia, estão sendo afetadas pelo chamado fluxo bidirecional de energia, pois os consumidores além de utilizar da energia fornecida aos mesmos, também injetam energia na rede. Este trabalho se baseia no estudo de caso de um consumidor atendido em baixa tensão, onde foram aferidos os parâmetros de qualidade da energia antes e depois da conexão de uma usina de microgeração distribuída por fonte solar fotovoltaica. Da mesma forma, foi realizada uma simulação em *software* computacional, utilizando das mesmas características reais do local da unidade consumidora com geração própria. Inicialmente sem a conexão da microgeração, os parâmetros de qualidade de energia se caracterizavam como adequados, segundo o Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no sistema Elétrico Nacional), normativa regulamentadora referente a Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica, porém após a inserção da geração, notou-se um impacto extremamente negativo, excedendo dos limites normatizados o nível de tensão, se caracterizando como crítico, tanto na simulação quanto no estudo de caso. Chegou-se à conclusão de que a conexão de sistemas fotovoltaicos pode causar distúrbios nas redes de baixa tensão, com destaque para ocorrência de sobretensão, que pode danificar equipamentos dos consumidores e demandar adequações nos sistemas regulação e proteção das redes, por parte das concessionárias. A estrutura interconectada do sistema elétrico brasileiro potencializa esses impactos, tornando indispensáveis estudos e soluções para mitigar os efeitos dessa nova forma de geração de energia.

Palavras-chave: Geração distribuída; Qualidade de energia; PRODIST; Sistema elétrico; Sobretensão.

ABSTRACT

In the search for solutions for clean and sustainable energy generation, advances in technology have made it possible to generate energy through solar radiation, known as photovoltaic solar generation. The implementation of these generation systems, through small generators located at various points in the electrical system, through what we call Distributed Generation, where consumers can generate their own energy and inject the surplus into the grid of the concessionaires. However, the distribution grids, which were designed to supply only the demand of a unidirectional energy course, are being affected by the so-called bidirectional flow of energy, since consumers, in addition to using the energy supplied to them, also inject energy into the grid. This work is based on the case study of a consumer served at low voltage, where the energy quality parameters were measured before and after the connection of a microgeneration plant distributed by a photovoltaic solar source. Likewise, a simulation was performed in computer software, using the same real characteristics of the location of the consumer unit with its own generation. Initially, without the connection of microgeneration, the power quality parameters were characterized as adequate, according to Module 8 of PRODIST (Procedures for Distribution of Electric Energy in the National Electric System), a regulatory standard regarding the Quality of Electric Energy Supply. However, after the insertion of generation, an extremely negative impact was noted, exceeding the standardized limits for the voltage level, which was characterized as critical, both in the simulation and in the case study. Coming to the conclusion that the connection of photovoltaic systems can cause disturbances in low-voltage networks, with emphasis on the occurrence of overvoltage, which can damage consumer equipment and require adjustments in the regulation and protection systems of the networks, by the concessionaires. The interconnected structure of the Brazilian electric system amplifies these impacts, making studies and solutions to mitigate the effects of this new form of energy generation indispensable.

Keywords: Distributed generation; Power quality; PRODIST; Electrical system; Overvoltage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Quantidade anual de conexão de GDF no Brasil	14
Figura 2 – Diagrama da GDF	17
Figura 3 – Sistema elétrico de distribuição com GDFV	18
Figura 4 – Evolução da geração fotovoltaica no Brasil.....	22
Figura 5 – Pontos de conexão com Tensão Nominal (V_n) na faixa de $1\text{kV} < V_n < 69\text{ kV}$	23
Figura 6 – Ponto de conexão com Tensão Nominal (V_n) = 380/220 V	24
Figura 7 – Valores de referência para as harmônicas totais	24
Figura 8 – Distorção Harmônica Individual de Tensão (%): Ordens Ímpares Múltiplas de 3	24
Figura 9 – Distorção Harmônica Individual de Tensão (%): Ordens Ímpares Não Múltiplas de 3	24
Figura 10 – Distorção Harmônica Individual de Tensão (%): Ordens Pares	25
Figura 11 – Localização da UFV na propriedade.....	29
Figura 12 – Estimativa Média de Geração do SFV	31
Figura 13 – Usina fotovoltaica	32
Figura 14 – Abrigo do inversor	32
Figura 15 – Coleta de dados	33
Figura 16 – Simulação com o sistema fotovoltaico desligado	35
Figura 17 – Variação da tensão antes da conexão da GDF	37
Figura 18 – Simulação com o sistema fotovoltaico ligado.....	38
Figura 19 – Dados da rede de Baixa Tensão	38
Figura 20 – Variação da tensão antes da conexão da GDF	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tensão antes da conexão da GDF.....	36
Tabela 2 – Fator de potência antes da conexão da GDF	37
Tabela 3 – Tensão depois da conexão da GDF	39
Tabela 4 – Fator de Potência depois da conexão da GDF	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
GDF	Geração Distribuída Fotovoltaica
GD	Geração Distribuída
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	Corrente Elétrica Contínua
CA	Corrente Elétrica Alternada
UC	Unidade Consumidora
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
SFV	Sistema Fotovoltaico
MME	Ministério de Minas e Energia
FP	Fator de Potência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos.....	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Geração Distribuída	16
2.1.1	Geração Distribuída Fotovoltaica.....	17
2.1.2	Conexão à rede	18
2.2	Legislação Brasileira	19
2.2.1	Resolução Normativa ANEEL n° 482/2012.....	19
2.2.2	Resolução Normativa ANEEL n° 687/2015.....	20
2.2.3	Resolução Normativa ANEEL n° 1000/2021.....	20
2.3	Crescimento da GDF no Brasil	21
2.4	Qualidade de energia elétrica	22
2.4.1	Prodist Módulo 8	22
2.4.2	Parâmetros de conexão	23
2.5	Impactos da Geração Distribuída	25
2.6	Analisador de energia elétrica	26
2.7	Software Power World	27
3	METODOLOGIA.....	28
3.1	Caracterização do estudo.....	28
3.1.1	Características do consumidor.....	28
3.1.2	Modalidade de Geração Distribuída.....	30
3.1.3	Características do gerador fotovoltaico	30
3.1.3.1	Inversor.....	31
3.1.3.2	Módulos fotovoltaicos	31
3.1.4	Características da instalação do gerador fotovoltaico	31
3.2	Simulação	33
3.3	Coleta de dados	33
3.4	Análise dos dados obtidos	34
3.4.1	Análise da qualidade de energia antes da conexão do GDF.....	34
3.4.2	Análise da qualidade de energia depois da conexão do GDF.....	34

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1	Parâmetros de qualidade antes da conexão do GDF	35
4.2	Parâmetros de qualidade depois da conexão do GDF	38
5	CONCLUSÃO.....	41
5.1	Recursos para mitigar os impactos	42
5.2	Perspectivas futuras	42
	REFERÊNCIAS	44
	APÊNDICE A - DIAGRAMA UNIFILAR DO GDF.....	48
	APÊNDICE B - RELATÓRIO GERAL DE ANÁLISE 1	49
	APÊNDICE C - RELATÓRIO GERAL DE ANÁLISE 2.....	51

1 INTRODUÇÃO

A constante busca por soluções em geração de energia de forma limpa e sustentável, viabiliza novas tendências para o sistema elétrico brasileiro, em que os tradicionais métodos de operação, baseados em grandes usinas, principalmente hidrelétricas, situadas longe dos centros de demanda, trabalham em paralelo com sistemas de geração distribuída, onde pequenos geradores são conectados em paralelo com a rede de distribuição (CARVALHO, 2009). A GD (geração distribuída) se tornou uma atraente solução pois dispõe de benefícios que além de econômicos e sociais, favorecem o meio ambiente por se tratar de uma forma de geração de energia limpa (SOUZA, 2016).

O ponto de partida para a conexão de mini e microgeradores de geração distribuída no Brasil, se deu a partir da Resolução Normativa nº 482/2012 (ANEEL, 2012), em que o consumidor brasileiro passou a ser apto a gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis, sendo possível exportar à rede de distribuição o excedente, gerando um sistema de créditos de energia. Dessa forma, proporcionou uma nova gama de investimentos que agrega uma série de fatores benéficos à população, tais como economia financeira, consciência socioambiental e autossustentabilidade.

No Brasil, um dos fatores cruciais para a difusão dos sistemas fotovoltaicos é o alto nível de radiação solar em grande parte do território, que torna propício essa modalidade de geração de energia. Relacionando isso aos aspectos também econômicos e sustentáveis, o número de unidades consumidoras que dispõe de GD tem aumentado significativamente nos últimos anos. Segundo dados da ANEEL em maio de 2024, há 2.641.323 unidades consumidoras com geração distribuída fotovoltaica, que além de produzirem energia para seu consumo próprio, injetam o excedente na rede de distribuição (ANEEL, 2024b).

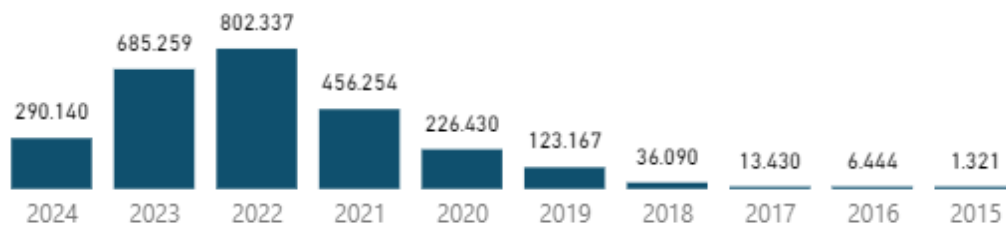
No entanto, as redes de distribuição no Brasil vêm apresentando distúrbios como fluxo de potência inverso, níveis grandes de sobretensão, distorções harmônicas além de desequilíbrio de fases, por não terem sido projetadas para suportar o fluxo bidirecional de energia, da mesma maneira, os dispositivos de segurança da rede, que não preveem essa forma de operação precisam ser revistos (ESSLINGER; WITZMANN, 2010). Isso gera uma discussão referente ao impacto que a inserção de sistemas de GD pode causar no atual modelo de configuração do sistema de distribuição brasileiro, em relação a se ele será mesmo capaz de suportar tal mudança na forma de operação ou serão necessários ajustes e investimentos para suprir essa nova demanda de operação (PRADO, 2017).

A partir do momento em que a qualidade da energia disposta aos consumidores não for considerada como adequada, os problemas advindos disso abrangem tanto as distribuidoras quanto as UC's (unidades consumidoras). Distúrbios de tensão, por exemplo, causam problemas a diversos tipos de equipamentos eletrônicos, a sobretensão pode danificar componentes desses equipamentos, causando muitas vezes danos irreversíveis. Da mesma forma, a subtensão pode afetar o funcionamento de dispositivos sensíveis à variação ou que operam apenas em determinada faixa de tensão específica (BALBINO, 2017).

A Normativa PRODIST Módulo 8 - Qualidade da energia elétrica, desenvolvida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estabelece os critérios e procedimentos para garantir a qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores. Manter os parâmetros de qualidade adequados é crucial para assegurar a eficiência e a confiabilidade do sistema elétrico (MATTAR, 2010). Cabe a cada concessionária de energia adaptar as informações contidas no PRODIST e apresentar suas próprias normas técnicas, como é o caso do GED (gerenciamento eletrônico de documentos), disponibilizado pela RGE, responsável pelo fornecimento de energia na região de São Valentim-RS, local onde será feito o estudo de caso abordado neste trabalho.

Considerando que a conexão de geradores de energia na modalidade de geração distribuída fotovoltaica tende a continuar ocorrendo, apesar da quantidade anual de conexão ter diminuído a partir de 2022, conforme apresentado na Figura 1, a preocupação com possíveis problemas de operação no sistema elétrico vêm sendo discutida, levantando questionamentos se a atual estrutura das redes de distribuição será capaz de garantir a qualidade de energia para os seus consumidores (ALMEIDA, 2024).

Figura 1 – Quantidade anual de conexão de GDF no Brasil



Fonte: Adaptado de ANEEL (2024)

Diante do exposto, este trabalho propõe analisar os impactos da conexão de GDF (geração distribuída fotovoltaica) nas redes de distribuição de baixa tensão, através de um estudo de caso, de modo a analisar os dados obtidos comparando com os parâmetros de qualidade de energia impostos no PRODIST Módulo 8 - Qualidade da energia elétrica.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral identificar os impactos na qualidade de energia das redes de distribuição de baixa tensão, resultantes da conexão de microgeradores fotovoltaicos de geração distribuída.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar um estudo de caso em um consumidor em aptas condições de realizar a conexão de um microgerador fotovoltaico à rede de distribuição.
- Refazer o estudo de caso após a conexão do microgerador fotovoltaico.
- Analisar os dados obtidos, verificando o comportamento dos parâmetros de qualidade de energia antes e depois da conexão da GDF.
- Comparar os dados obtidos no estudo de caso, com os parâmetros dispostos no Módulo 8 do PRODIST.
- Identificar a adequação dos parâmetros coletados.
- Verificar recursos que assegurem a qualidade de energia nas redes de distribuição com sistemas de microgeração fotovoltaica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, é realizada uma revisão bibliográfica sobre a GD no Brasil, abordando sua definição, regulamentações, e evolução ao longo do tempo. Inicialmente, apresenta-se o conceito e o funcionamento dos sistemas de micro e minigeração, destacando o papel das fontes renováveis, como a solar fotovoltaica, na geração descentralizada de energia. Em seguida, discute-se a legislação brasileira que regulamenta a GD, com foco nas resoluções normativas da ANEEL, que estabeleceram o marco regulatório e promoveram avanços para a expansão do setor.

2.1 Geração Distribuída

A partir da resolução normativa nº 482/2012 da ANEEL iniciou-se o processo de desenvolvimento da micro e minigeração distribuída no Brasil, ao regulamentar a conexão de sistemas de geração distribuída à rede elétrica. Esta normativa permitiu que consumidores residenciais, comerciais, industriais e rurais instalassem pequenos geradores, utilizando fontes renováveis como solar fotovoltaica, eólica, hidráulica e biomassa, entre outras. A ANEEL define a microgeração distribuída como sistemas de geração de energia elétrica com potência instalada de até 75 kW, já a minigeração distribuída abrange sistemas com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW. Esses sistemas podem ser conectados à rede de distribuição de energia elétrica, permitindo que os consumidores utilizem a energia gerada para o próprio consumo e injetem o excedente na rede (YACILA, 2024).

O excedente de energia produzida que não é utilizado pela unidade consumidora com sistema de geração, acaba sendo injetado na rede das concessionárias, gerando um sistema de acúmulo de créditos. Esses créditos são registrados pela distribuidora de energia e podem ser utilizados em até 60 meses para abater o consumo em momentos em que a geração própria não for suficiente, como em dias onde fatores climáticos contribuem para baixa produção ou a noite, no caso de sistemas fotovoltaicos. O saldo de créditos é ajustado mensalmente na fatura de energia, esse mecanismo de compensação não apenas torna a GD mais atrativa do ponto de vista financeiro, mas também pela possibilidade da geração compartilhada, em que mais consumidores podem se beneficiar da energia injetada de um único sistema (ALFONSO, 2021).

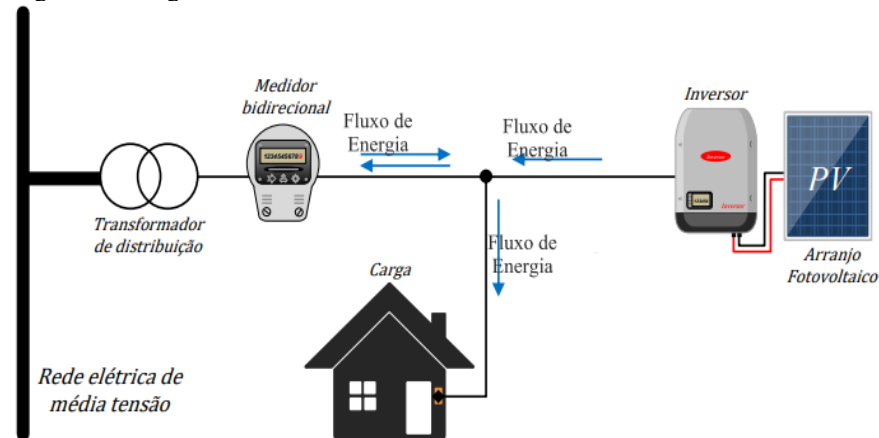
Compete ao consumidor a iniciativa da instalação do seu sistema de GD independente da fonte geradora, levando em consideração sua própria análise de custo/benefício dos componentes de cada tipo de sistema, tecnologia dos equipamentos e valores das tarifas. Sendo

que para UC's conectadas em baixa tensão (grupo B), apesar de produzir energia suficiente para seu total consumo, deverão efetuar o pagamento referente ao custo de disponibilidade equivalente ao tipo de sua instalação (mono, bi ou trifásico), além dos demais encargos legais. Já para consumidores atendidos em média ou alta tensão (grupo A), o pagamento se configura a partir da demanda contratada e demais encargos legais (ANEEL, 2022).

2.1.1 Geração Distribuída Fotovoltaica

A geração de energia elétrica por sistemas solares, basicamente se trata da conversão direta da radiação solar em eletricidade, por meio de células fotovoltaicas feitas do elemento silício, um semicondutor capaz de converter a luminosidade em energia elétrica, presente nos módulos fotovoltaicos. Quando a luz solar incide sobre as células, os fótons (partículas de luz) transferem energia para os elétrons do semicondutor, gerando uma corrente elétrica contínua (CC), que para ser utilizada e injetada na rede elétrica é transformada para corrente alternada (CA), por meio de um inversor (VILLALVA, 2010), conforme demonstrado na Figura 2.

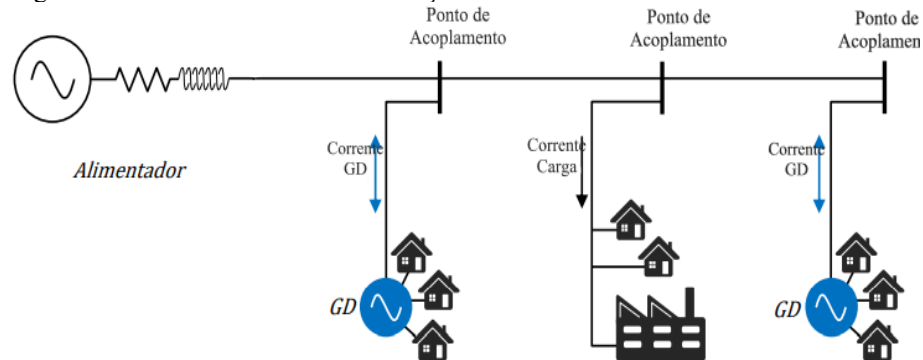
Figura 2 – Diagrama da GDF



Fonte: Adaptado de Fortes (2018)

A energia produzida pelo sistema fotovoltaico pode ser instantaneamente consumida na UC e ao mesmo tempo injetar o excedente na rede de distribuição, utilizando um sistema de compensação de créditos, o cliente garante que em momentos em que não esteja gerando, possa fazer uso da energia disposta pela concessionária utilizando de seu acumulado de sobras (ALMEIDA, 2024). A Figura 3 demonstra o funcionamento de uma rede de distribuição contemplando sistemas de GD.

Figura 3 – Sistema elétrico de distribuição com GDFV



Fonte: Adaptado de Fortes (2018)

É possível observar a presença de um alimentador principal que distribui energia elétrica a diversos pontos de acoplamento. Esses pontos representam locais onde consumidores estão conectados à rede elétrica, incluindo residências e indústrias. Os elementos destacados como "GD" indicam unidades de geração distribuída conectadas à rede. Essas unidades fornecem energia tanto para o consumo local quanto para injeção na rede de distribuição. Este diagrama evidencia como os sistemas de GD interagem com a rede elétrica, permitindo a integração de fontes renováveis e contribuindo para a diversificação e descentralização da matriz energética.

2.1.2 Conexão à rede

Para a conexão de um sistema fotovoltaico à rede de distribuição, é necessário realizar alguns procedimentos obrigatórios, no Brasil regulamentados pela ANEEL, que vão desde a solicitação até o parecer de acesso. Inicialmente deve-se ingressar com o pedido de solicitação de acesso juntamente à concessionária ou permissionária responsável pelo atendimento no local da instalação (LUIZ, 2012). Nesse processo, deverão ser apresentados documentos devidamente preenchidos que estão discriminados no Formulário presente no Anexo I da Resolução Homologatória nº 3.171/2023 (ANEEL, 2023).

Além dos documentos específicos, é necessário que um profissional seja responsável pelo projeto e execução da obra, não necessariamente sendo o mesmo para ambas etapas, sendo esse, apto segundo o conselho de classe correspondente (CREA, CAU, por exemplo) a realização desse tipo de serviço. A concessionária tem um prazo específico para analisar os documentos apresentados, entregando ao fim a aprovação ou não do projeto, para fornecer o parecer de acesso ao consumidor (ANEEL, 2023).

Com o parecer de aprovação e o sistema de geração instalado, o próximo passo é o da solicitação da vistoria, onde é verificado por uma equipe técnica os padrões da instalação dos

equipamentos do sistema fotovoltaico (SFV), se os mesmos estiverem de acordo com as normas exigidas é feita a substituição do medidor convencional do cliente para um medidor bidirecional. Os custos financeiros da instalação dos equipamentos de medição para sistemas de microgeração são de responsabilidade total da distribuidora, já para a minigeração o custo de adequação fica por conta do interessado (ANEEL, 2022).

2.2 Legislação Brasileira

A normativa que marcou o início da geração distribuída no Brasil teve atualizações pontuais em diversos aspectos, cada vez mais buscando melhorar as condições tanto para os consumidores quanto para as agências de energia.

2.2.1 Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012

A primeira normativa que possibilitou a conexão de sistema de micro e minigeração no Brasil, se deu em 17 de abril de 2012, com a Normativa nº 482/2012, representando o marco regulatório fundamental para o setor elétrico brasileiro, ao estabelecer o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). Este sistema permite que os consumidores possam gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis, como fotovoltaica e injetar o excedente na rede de distribuição local, com objetivo de incentivar a micro e minigeração distribuída de energia, promovendo maior sustentabilidade e diversificação da matriz energética nacional (SCOLARI; URBANETZ, 2018).

De acordo com a resolução, os consumidores que aderirem ao SCEE podem utilizar a energia excedente injetada na rede como um crédito, que é abatido do consumo de energia elétrica nos meses subsequentes. Esse mecanismo não só proporciona uma redução na conta de energia elétrica, mas também contribui para a eficiência energética e a descentralização da geração de energia, reduzindo perdas no sistema de transmissão e distribuição (LUIZ, 2012).

Essa normativa visou criar um ambiente regulatório favorável ao desenvolvimento de novas tecnologias e à participação ativa dos consumidores no mercado de energia elétrica. A resolução também estabeleceu diretrizes claras para o processo de conexão das unidades geradoras à rede de distribuição, definindo responsabilidades tanto para as distribuidoras quanto para os consumidores (ANEEL, 2012).

2.2.2 Resolução Normativa ANEEL n° 687/2015

A Normativa n° 687 de 24 de novembro de 2015 se trata de uma atualização visando complementar e aprimorar as diretrizes anteriores, um dos principais avanços introduzidos foi a simplificação do processo de conexão das unidades geradoras à rede de distribuição, estabelecendo prazos mais curtos e procedimentos menos burocráticos para a obtenção de autorização, facilitando o acesso dos consumidores a conexão de sistemas de GD à rede (ANEEL, 2015).

Outro avanço significativo foi a permissão para a modalidade de geração com autoconsumo remoto, onde o excedente de energia injetada na rede pode ser utilizado para abater o consumo de outras unidades consumidoras pertencentes ao mesmo titular, desde que estejam localizadas na área de concessão da mesma distribuidora. Essa medida promoveu uma maior flexibilidade e atratividade para os consumidores, especialmente para empresas com múltiplas unidades e consumidores residenciais com diversas UC's (ANEEL, 2015).

Outra mudança foi a criação das modalidades de geração compartilhada e empreendimento com múltiplas unidades consumidoras, permitindo que grupos de consumidores se organizem em consórcios ou cooperativas para a instalação de sistemas de geração distribuída, possibilitando o compartilhamento dos benefícios econômicos e ambientais da geração de energia renovável (ALFONSO, 2021). O conceito de microgeração distribuída passou a abranger sistemas com potência instalada de até 75 kW, onde anteriormente se caracterizava até 100 kW, da mesma forma a minigeração se caracteriza por instalações com potência instalada entre 75 kW e 5 MW (para geração em hidrelétricas 3 MW) (ANEEL, 2022).

Apesar dessa pequena desvantagem ao consumidor de pequeno porte com a diminuição do limite de potência que caracteriza a instalação como microgeração, uma mudança muito positiva foi o aumento no prazo para utilização dos créditos de energia acumulados, que passou de 36 para 60 meses. A atualização da normativa no geral implica em efeitos positivos, que incentivam ainda mais consumidores a investir em sistemas de GDF para sua residência, comércio e propriedade rural (CRIVELIN, 2018).

2.2.3 Resolução Normativa ANEEL n° 1000/2021

A recente alteração Normativa ANEEL n° 1000 de 7 de dezembro de 2021, entre suas principais mudanças, a mais chamativa se dá na forma como a energia elétrica é faturada no Brasil, incluindo disposições relacionadas à cobrança do componente tarifário conhecido como

"fio B", este componente refere-se aos custos relacionados à disponibilização da infraestrutura de distribuição de energia elétrica até o consumidor final. Essa mudança incentiva os consumidores a adotarem práticas mais eficientes de consumo de energia, uma vez que passam a ser diretamente responsáveis pelo seu consumo durante os períodos de maior demanda (ANEEL, 2021).

Esta alteração estabelece novos parâmetros para a qualidade do serviço de distribuição, introduzindo indicadores de desempenho mais rigorosos e mecanismos de incentivo para que as distribuidoras melhorem continuamente seus serviços, assegurando que os consumidores tenham acesso a um fornecimento de energia elétrica confiável e de qualidade, reduzindo interrupções e melhorando a resposta a falhas no sistema (ANEEL, 2021).

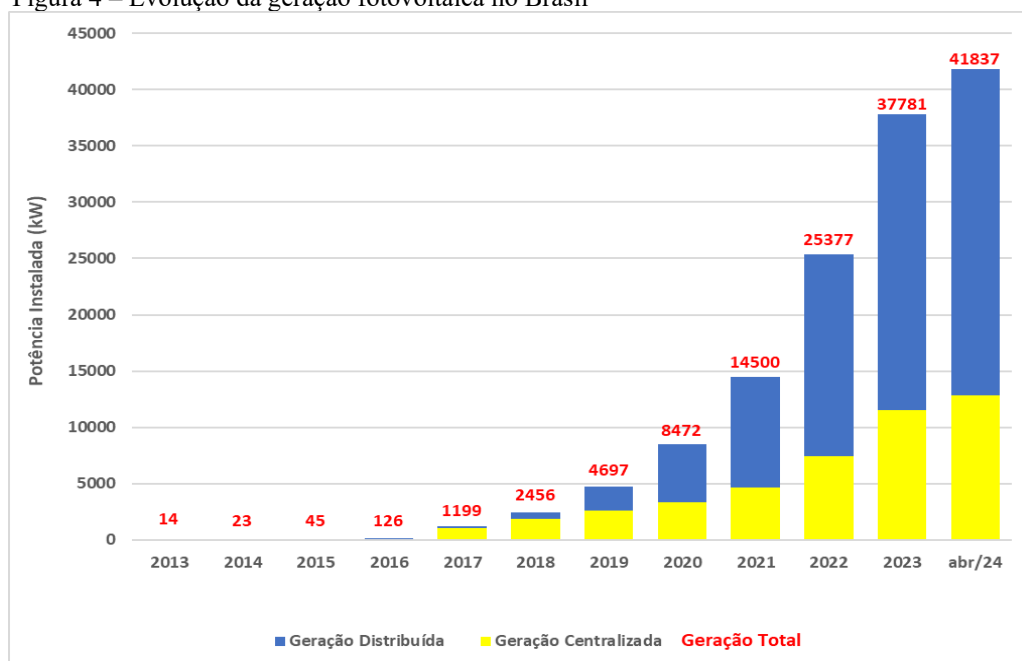
2.3 Crescimento da GDF no Brasil

A capacidade instalada de GDF continua crescendo ano após ano desde a regulamentação inicial que aprovou a conexão de centrais de GD no sistema elétrico de potência do Brasil, segundo a ANEEL, a geração de energia elétrica por fonte solar fotovoltaica é a segunda maior em potência instalada no país, perdendo apenas da tradicional geração hidrelétrica, efeito de incentivos públicos às fontes de energia renováveis e da micro e minigeração distribuída (ANEEL, 2024a).

A previsão é de que esse cenário siga crescendo, o secretário de Planejamento e Transição Energética do Ministério de Minas e Energia (MME), Thiago Barral, diz que estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032, publicados pelo MME e Empresa de Pesquisa Energética (EPE), projeta-se que a GD mantenha uma trajetória de expansão significativa nos próximos anos, alinhado a isso, demandará de contínuas melhorias de regulamentação e de políticas públicas relacionadas ao setor elétrico, para que seja cada vez mais uma alternativa inclusiva para todos consumidores (MME, 2023).

A Figura 4 mostra o crescimento da geração de energia elétrica solar fotovoltaica no Brasil. Até o mês de maio de 2024 são 41.837 GW de potência instalada, sendo 69% característica de GDF, com tendência de constante aumento para os próximos anos. Dentre as fontes de energias por GD, a GDF é a que mais se destaca, sendo 99,08% entre as centrais de micro e minigeração (ABSOLAR, 2024).

Figura 4 – Evolução da geração fotovoltaica no Brasil



Fonte: Adaptado de ABSOLAR (2024)

2.4 Qualidade de energia elétrica

Para o andamento do estudo é fundamental abordar os aspectos e características dos parâmetros analisados e da regulamentação vigente, referente a qualidade de energia elétrica das redes de distribuição, conforme estabelecido pelas normas e regulamentações vigentes. Esta seção explora aspectos como níveis de tensão, harmônicos, desequilíbrios de corrente, variações de frequência e interrupções de fornecimento, que são parâmetros essenciais para assegurar o desempenho eficiente e confiável da rede elétrica.

2.4.1 Prodist Módulo 8

A manutenção dos parâmetros de qualidade de energia definidos segundo o PRODIST - Módulo 8 (Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica), no ponto de conexão dos consumidores com a rede é de responsabilidade da distribuidora de energia. Esse documento define os critérios e padrões que devem ser observados pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica para garantir um fornecimento de qualidade às UC's (LUIZ, 2012).

As concessionárias de distribuição de energia têm a obrigação de monitorar continuamente a qualidade de energia fornecida, adotar medidas corretivas quando os parâmetros de qualidade não são atendidos, manter os consumidores informados sobre a qualidade e eventuais problemas no fornecimento, e enviar relatórios regulares à ANEEL

detalhando os níveis de qualidade medidos, ações corretivas tomadas e planos de melhoria contínua (ANEEL, 2020). Essas obrigações visam garantir um fornecimento de energia seguro, eficiente e confiável, protegendo os equipamentos dos consumidores e aumentando a satisfação geral com o serviço prestado.

2.4.2 Parâmetros de conexão

Os parâmetros seguintes devem ser assegurados no ponto de conexão com a rede das concessionárias de acordo com o PRODIST Módulo 8:

1. Tensão em Regime Permanente.
2. Fator de Potência.
3. Distorções Harmônicas.
4. Desequilíbrio de Tensão.
5. Flutuação da Tensão.

A Figura 5 caracteriza as variações na tensão contratada no ponto de conexão da UC com a rede primária, também conhecida como rede de média tensão, tensão nominal na faixa de $1 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$.

Figura 5 – Pontos de conexão com Tensão Nominal (V_n) na faixa de $1 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$

Tensão de Atendimento (TA)	Variação da Tensão de Leitura (TL) para a Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93.TR \leq TL \leq 1,05.TR$
Precária	$0,9.TR \leq TL < 0,93.TR$
Crítica	$TL < 0,9.TR$ ou $TL > 1,05.TR$

Fonte: GED 15303 (2020, p. 32)

Esses valores constituem a chamada Tensão de Atendimento (TA), que pode ser medida a qualquer momento através da Tensão de Leitura (TL) para avaliar a qualidade do serviço, o valor deve corresponder à tensão nominal de um dos terminais de derivação exigidos ou recomendados previamente para o transformador que atende a instalação.

A Figura 6 caracteriza os níveis de tensão para UC atendidas pela rede secundária (baixa tensão), nos níveis de tensão de 380 / 220 V.

Figura 6 – Ponto de conexão com Tensão Nominal (V_n) = 380/220 V

Tensão de Atendimento (TA)	Varição da Tensão de Leitura (TL)
Adequada	$348 \leq TL \leq 396 / 201 \leq TL \leq 231$
Precária	$327 \leq TL < 348$ ou $396 < TL \leq 403 /$ $189 \leq TL < 201$ ou $231 < TL \leq 233$
Crítica	$TL < 327$ ou $TL > 403 / TL < 189$ ou $TL > 233$

Fonte: GED 15303 (2020, p. 33)

O Fator de Potência no ponto de conexão com a rede da UC contemplada com central de micro ou minigeração distribuída, deverá ser mantido na faixa de 0,92 e 1 indutivo ou capacitivo.

As distorções harmônicas expressas por um conjunto de parâmetros aplicados a onda de tensão no ponto de conexão da UC com a rede de distribuição, em relação à onda senoidal de frequência fundamental 60 Hz, para o seu conteúdo total, considerando a superposição até a 25° ordem harmônica. A Figura 7 mostra os valores de referências para as harmônicas totais, já as Figuras 8, 9 e 10 expressam a referência para as harmônicas individuais.

Figura 7 – Valores de referência para as harmônicas totais

Tensão Nominal (V_n) no Ponto de Conexão	Distorção Harmônica Total de Tensão (%)
$V_n \leq 1$ kV	10
1 kV $< V_n \leq 13,8$ kV	8
$13,8$ kV $< V_n \leq 69$ kV	6

Fonte: GED 15303 (2020, p. 33)

Figura 8 – Distorção Harmônica Individual de Tensão (%): Ordens Ímpares Múltiplas de 3

Ordem Harmônica	$V_n \leq 1$ kV	1 kV $< V_n \leq 13,8$ kV	$13,8$ kV $< V_n \leq 69$ kV
3	6,5	5	4
9	2	1,5	1,5
15	1	0,5	0,5
21	1	0,5	0,5
> 21	1	0,5	0,5

Fonte: GED 15303 (2020, p. 33)

Figura 9 – Distorção Harmônica Individual de Tensão (%): Ordens Ímpares Não Múltiplas de 3

Ordem Harmônica	$V_n \leq 1$ kV	1 kV $< V_n \leq 13,8$ kV	$13,8$ kV $< V_n \leq 69$ kV
5	7,5	6	4,5
7	6,5	5	4
11	4,5	3,5	3
13	4	3	2,5
17	2,5	2	1,5
19	2	1,5	1,5
23	2	1,5	1,5
25	2	1,5	1,5
> 25	1,5	1	1

Fonte: GED 15303 (2020, p. 34)

Figura 10 – Distorção Harmônica Individual de Tensão (%): Ordens Pares

Ordem Harmônica	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$
2	2,5	2	1,5
4	1,5	1	1
6	1	0,5	0,5
8	1	0,5	0,5
10	1	0,5	0,5
12	1	0,5	0,5
> 12	1	0,5	0,5

Fonte: GED 15303 (2020, p. 34)

O desequilíbrio de tensão é um fenômeno que ocorre devido a variações nos padrões trifásicos do sistema de distribuição, caracterizado pelos valores de sequência positiva e negativa, utilizando-se apenas tensões fase-fase durante as medições para evitar os efeitos de componentes de sequência zero. Para pontos de conexão à rede de distribuição primária em UC's com GD, o valor de referência para o desequilíbrio de tensão deve ser de até 2%, já para conexões na rede secundária ainda não existem valores de referência.

A flutuação de tensão é uma alteração aleatória, repetitiva ou ocasional no valor eficaz da tensão, dependendo da intensidade dessa variação, é possível avaliar o desconforto causado pela cintilação luminosa gerada ao consumidor, especialmente em unidades com pontos de iluminação de baixa tensão. Para sua determinação e verificação dos parâmetros limites estabelecidos para garantir a qualidade no fornecimento de energia, incluindo agora a conexão de centrais de GD, devem seguir as diretrizes segundo o PRODIST - Módulo 8.

2.5 Impactos da Geração Distribuída

A conexão de sistemas de GD à rede convencional de distribuição, projetada inicialmente sem a perspectiva da utilização de um fluxo reverso de potência, gera uma complicação iminente às distribuidoras de energia, pois configura uma reviravolta no mercado energético. Causando impacto direto na receita econômica das distribuidoras, na qualidade da energia fornecida aos consumidores e nos dispositivos de proteção e medição do sistema, que precisam constantemente serem substituídos ou aprimorados (JENKINS *et al.*, 2010).

A GDF gera benefícios importantes para os consumidores no geral, em aspectos financeiros, econômicos e principalmente ambientais, até mesmo às distribuidoras de energia com a redução de perdas na distribuição devido às UC's estarem situadas próximas dos sistemas de geração de energia (ALMEIDA, 2024). Porém, o aumento no número de inserções deste tipo de fonte sem planejamento prévio, acarreta em possíveis problemas de reversão do fluxo de potência com um excesso de energia sendo exportado a rede, sub e sobretensões a nível de

regime permanente, desequilíbrios de tensão entre fases, flutuações de tensão, sobrecargas nos equipamentos de proteção, além de distorções harmônicas muito elevadas (BOLLEN; HASSAN, 2011).

Quando a produção de energia elétrica nas centrais de GD é maior do que o consumo na mesma, o excedente é injetado na rede invertendo a direção do fluxo da corrente e, conseqüentemente, aumentando o nível da tensão. Em localidades urbanas, onde há alta impedância de rede e com centrais de GD com potência nominal geralmente pequenas, o problema não é muito relevante. Porém, se considerarmos localidades rurais com baixa impedância, por diversas vezes grandes distâncias entre as UC's, a medida em que o número de conexões de GDF na rede de distribuição aumenta, os níveis de tensão tendem a exceder os limites normativos, caracterizando como precária ou crítica a situação desse parâmetro de qualidade de energia (BALBINO, 2017).

2.6 Analisador de energia elétrica

Analisador de energia se trata de um instrumento fundamental na gestão e eficiência energética de instalações e redes elétricas, esses dispositivos permitem a medição, registro e análise das grandezas elétricas a fim de oferecer ao usuário uma visão ampla e detalhada do comportamento dos parâmetros de qualquer equipamento ou grupo de equipamentos energizados. Sendo possível proporcionar uma visão detalhada sobre o consumo energético e a qualidade da energia elétrica fornecida, possibilitando a identificação de anomalias, desperdícios e oportunidades de melhoria em questão de eficiência energética, através da captação e armazenamento de dados em tempo real (KUSKO; THOMPSON, 2007).

Para análise dos parâmetros de qualidade de energia ser validada é necessário, de acordo com o PRODIST Módulo 8, a utilização de um equipamento de medição que colete as grandezas elétricas em 1008 leituras válidas, obtidas com registros consecutivos de 10 em 10 minutos (ANEEL, 2022). O equipamento escolhido para realização do estudo de caso deste trabalho foi o Analisador de Energia RE6000 da marca EMBRASUL, devido ao mesmo possuir entradas de corrente e tensão trifásicas, possibilitando analisar as tensões e suas respectivas correntes, além das potências nas formas ativa, reativa e aparente, fator de potência, desbalanceamento das fases e nível da frequência elétrica (EMBRASUL, 2015).

Desta forma, será possível visualizar o comportamento dos parâmetros de qualidade de energia no ponto de conexão com a rede, de uma UC antes da implementação de um sistema de GDF, verificando se estão de acordo com as normativas brasileiras. Na seqüência, a análise será

feita depois do SFV estar conectado, possibilitando indicar se há impactos significativos a serem estudados.

2.7 *Software Power World*

O PowerWorld Simulator é uma ferramenta amplamente utilizada para a análise e simulação de sistemas elétricos de potência. Desenvolvido pela PowerWorld Corporation, o *software* é conhecido por sua interface gráfica simples e suas funcionalidades avançadas, o que o torna uma escolha popular entre engenheiros e pesquisadores para estudar o comportamento de sistemas elétricos em diferentes condições de operação. O *software* foi projetado para facilitar a modelagem, simulação e análise de redes elétricas de maneira intuitiva, permitindo o uso tanto em análises acadêmicas quanto em aplicações práticas no setor de energia (POWERWORLD, 2024).

Uma das características do PowerWorld é sua capacidade de realizar simulações que incluam a modelagem de dispositivos como geradores, transformadores, linhas de transmissão e compensadores reativos, o que o torna adequado para estudos detalhados de redes de distribuição e transmissão. Por conta disso, o *software* é amplamente adotado por concessionárias de energia, operadores de sistemas elétricos e instituições acadêmicas em projetos que exigem uma análise aprofundada e precisa (AZEVEDO, 2023).

No Brasil, o PowerWorld também tem ganhado destaque como ferramenta de suporte para estudos de integração de GD e renováveis, além de análise de qualidade de energia e confiabilidade. Sua interface intuitiva e a possibilidade de personalização dos modelos o tornam uma escolha eficiente para simular cenários reais e avaliar o impacto da inserção de sistemas de GD, como microgeradores fotovoltaicos, em redes de baixa e média tensão. Por conta disso, o *software* tem sido frequentemente citado em estudos acadêmicos e aplicado em estudos técnicos realizados por concessionárias e órgãos reguladores (DE CARLI, 2021).

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo descrever a metodologia adotada para a realização deste trabalho, sendo a parte crucial que determina o caminho seguido para alcançar os objetivos propostos. Após a apresentação da base teórica a ser utilizada, serão apresentadas as definições abordadas para o estudo de caso, seguindo para coleta de dados que apresentam os parâmetros de qualidade de energia e por fim, a análise comparativa dos dados obtidos.

3.1 Caracterização do estudo

A metodologia deste trabalho se baseia no estudo de caso de um consumidor do grupo B, atendido em baixa tensão pela concessionária de energia RGE/CPFL, que optou por fazer a instalação de uma unidade de microgeração distribuída com fonte solar fotovoltaica, para suprir seu consumo de energia. No caso em questão, a UC a ser analisada apenas gera energia no local e injeta quase que totalmente a produção na rede de distribuição, pois faz uso de uma ferramenta da GD que permite compensar, desde que seja na mesma distribuidora de concessão e com o mesmo titular, energia em outro local de consumo.

3.1.1 Características do consumidor

A UC em questão, possui em sua propriedade apenas uma residência que consome energia elétrica da rede de distribuição, o restante se divide em áreas de produção agrícola com plantações de culturas como soja e milho em determinados momentos do ano, além de árvores frutíferas. Diante disso, a existência da possibilidade de implementação de uma UFV para gerar energia e compensar em outra instalação do cliente, por intermédio da concessionária RGE/CPFL, que atende as UC's do cliente.

O consumidor, juntamente com a empresa que vai executar a instalação e o Engenheiro Eletricista responsável pela homologação do projeto junto a concessionária, definiu o local de instalação da UFV próximo a casa da propriedade, conforme indicado na Figura 11.

Figura 11 – Localização da UFV na propriedade



Fonte: Adaptado de Google Maps (2024)

A escolha do local foi determinado pela proximidade com a casa da propriedade por questões de segurança, evitando posicioná-la longe das câmeras de monitoramento na tentativa de evitar possíveis furtos de equipamentos e materiais elétricos, que possuem bastante procura no mercado ilícito. Outro motivo se deu por conta da proximidade da UFV com o padrão de entrada de energia da propriedade, categoria C11 conforme o GED 13 - Fornecimento em Tensão Secundária de Distribuição. O padrão de entrada em questão, possui as seguintes características:

- Ramal de Ligação com condutor Quadruplex cabo 35 mm²;
- Ramal de Entrada com condutor Cu PVC 50 mm²;
- Carga instalada máxima de 75 kW;
- Disjuntor Geral 3P 125^a;
- Condutor de aterramento Cu PVC 16 mm².

Com essas características, para homologação do projeto junto à concessionária, a soma da potência nominal do inversor ou inversores fotovoltaicos utilizados não deve ser superior a 75 kW, caso fosse necessária uma UFV com potência de inversor maior, seria necessário entrar com pedido de aumento de carga.

3.1.2 Modalidade de Geração Distribuída

Como citado anteriormente, o consumidor deste estudo necessita suprir o consumo de energia em uma UC diferente de onde o sistema vai ser instalado, para isso ser possível o Engenheiro responsável pela aprovação do projeto junto a concessionária, utilizou da categoria de GD chamada de Autoconsumo Remoto, onde o titular da UC pode distribuir o excedente de energia injetado na rede para outras instalações desde que estejam em seu nome e na área de concessão da RGE/CPFL, distribuidora que atende o local da instalação da UFV (YACILA, 2024).

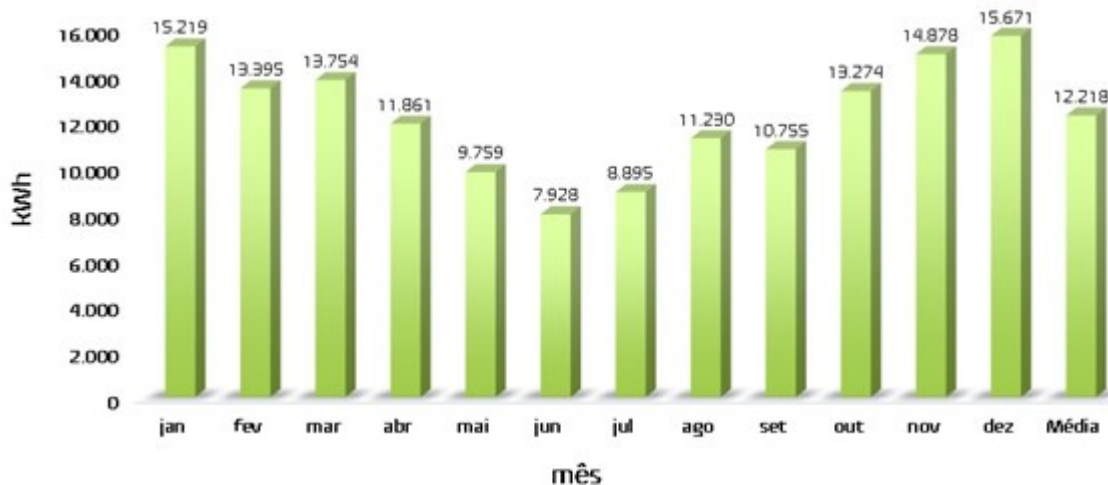
Essa modalidade de GD, permite compensar na forma de créditos de energia elétrica o excedente injetado na rede pelo mesmo titular, no caso desse consumidor, a totalidade da energia excedente é alocada em uma UC de mesma titularidade onde o consumo de energia é bem alto, devido a atuação na área da avicultura. O consumidor em questão possui seis aviários atendidos pela RGE que já possuem seu próprio sistema de GDF, porém, o mesmo não produz energia suficiente para abater todo seu consumo.

Assim, com essa modalidade de geração com a compensação de créditos de energia em Autoconsumo Remoto, permitiu ao consumidor em específico utilizar de uma área em outra propriedade para gerar energia e abater o consumo dos aviários, sem a necessidade de realizar um aumento de carga na UC onde os mesmos estão situados.

3.1.3 Características do gerador fotovoltaico

O GDF foi projetado para suprir uma demanda média mensal de consumo energético de 12.000 kWh, sendo que, para atingir essa geração foi dimensionado um sistema de 114 kWp de potência. Essa projeção de sistema foi especificamente determinada levando em consideração aspectos como a radiação média no local da instalação, ou seja, a quantidade média de horas de sol mensal/anual, possíveis perdas por aumento de temperatura, posicionamento e orientação e perdas na conversão de energia de CC para CA. Chegando em uma estimativa final de geração média mensal nos primeiros 12 meses de operação do SFV de 12.218 kWh, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Estimativa Média de Geração do SFV



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

3.1.3.1 Inversor

A escolha do inversor fotovoltaico, equipamento responsável pela conversão de CC para CA, foi o modelo SOLIS-75K-5G-PRO, da marca Solis. A escolha se deu por conta dele se enquadrar em dois quesitos, nos critérios para o sistema ser considerado como microgerador fotovoltaico e por suportar a potência em kWp do sistema. Além do mais, essa marca de inversor é bem conceituada no mercado, tem um ótimo custo benefício e excelentes características construtivas.

3.1.3.2 Módulos fotovoltaicos

Os módulos do sistema fotovoltaico a ser instalado são da marca Trina Solar, em específico modelo TSM-DE19R-570W, painel monocristalino constituído por 132 células fotovoltaicas. A escolha deste módulo se deu por suas características de eficiência serem muito boas, por ser de uma marca bem conceituada no mercado e apresentar um ótimo custo/benefício, sendo utilizadas 200 unidades totalizando uma potência total de 114 kWp.

3.1.4 Características da instalação do gerador fotovoltaico

A instalação dos módulos do GDF será executada em estrutura de solo, orientada a norte e com inclinação de aproximadamente 23°, para máxima eficiência e captação da radiação solar,

conforme apresentado na Figura 13. Essa configuração de instalação é a mais recomendada para a região sul do Brasil (SANTOS; RUTHER *et al*, 2012).

Figura 13 – Usina fotovoltaica



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A distribuição das *strings* (conjunto de módulos associados em série) será feita da seguinte forma, oito com 17 módulos e quatro com 16 módulos, ocupando as 12 entradas do inversor. Essa configuração foi dimensionada atendendo aos limites de tensão e corrente estabelecidos pelo fabricante, conforme indicado no Apêndice A - Diagrama Unifilar do GDF.

O inversor fotovoltaico ficará abrigado em construção simples de alvenaria, conforme apresentado na Figura 14, posicionado com distanciamento entre objetos e paredes conforme indicados pelo fabricante do inversor. É de suma importância respeitar as indicações do manual de instalação do equipamento, pois problemas como aquecimento por falta de ventilação pode acarretar problemas nos componentes eletrônicos e, conseqüentemente, condenar o inversor.

Figura 14 – Abrigo do inversor



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

3.2 Simulação

Apesar do foco deste trabalho ser a análise dos parâmetros de qualidade de energia de um consumidor do grupo B (atendido em baixa tensão), antes e depois da instalação de um sistema de GDF, será realizada uma simulação computacional para uma comparação com os resultados obtidos no estudo de caso. Para isso, foi escolhido o *software PowerWorld*, onde será possível verificar as grandezas elétricas antes e depois da conexão da GD.

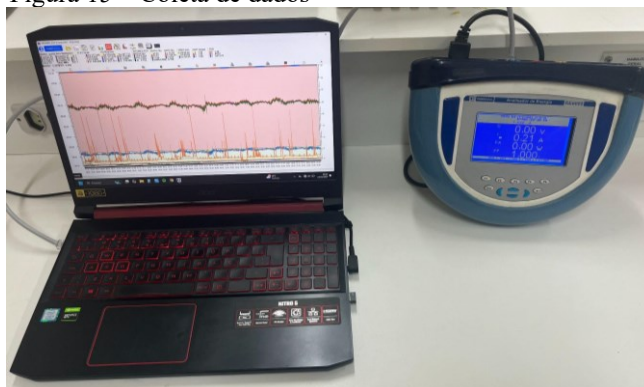
A escolha pelo *PowerWorld* se deu por conta de ser um *software* gratuito e de fácil acesso e manuseio, além de possuir uma interface intuitiva, robustez e capacidade de lidar com sistemas elétricos de grande escala de forma eficiente. Este programa é amplamente utilizado por engenheiros e pesquisadores para análises de fluxo de potência, estabilidade e contingências, oferecendo ferramentas gráficas que facilitam a visualização e a interpretação dos resultados.

3.3 Coleta de dados

A coleta de dados para o estudo será realizada utilizando o analisador de energia modelo RE6000 da fabricante Embrasul. O dispositivo será instalado no ponto de conexão da UC com a concessionária que atende a instalação, configurado para registrar parâmetros como tensão, corrente, potência ativa, potência reativa e fator de potência a intervalos de 5 segundos, durante o período de 7 dias.

Os dados ficam armazenados na memória interna do analisador e ao fim serão transferidos para o computador, onde através do software ANL6000, conforme apresentado na Figura 15, poderão ser visualizados caracterizados e classificados de acordo com a necessidade de análise.

Figura 15 – Coleta de dados



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Salienta-se que antes do início da coleta, o analisador passou por calibrações para garantir a precisão das medições, e comparações periódicas com medições manuais foram realizadas para validar a acurácia dos dados coletados.

3.4 Análise dos dados obtidos

Será necessário abordar diversas metodologias para análise das grandezas elétricas e suas variações registradas pelo analisador. Através do *software* ANL6000 é possível gerar relatórios completos de todos os registros feitos, além de filtrá-los em períodos específicos e remover quaisquer leituras anômalas ou inconsistências causadas por ruídos elétricos ou interferências externas, que possam indicar ineficiências ou falhas no sistema elétrico.

Serão gerados alguns gráficos que abordam grandezas elétricas específicas, indicadoras dos parâmetros de qualidade de energia, para possibilitar analisar em detalhes cada parâmetro. A partir disso, os dados obtidos serão comparados com as diretrizes do PRODIST - Módulo 8, para indicar se houve alteração significativa que indica a piora da qualidade da energia depois da conexão do GDF.

3.4.1 Análise da qualidade de energia antes da conexão do GDF

O analisador de energia deve ser instalado no ponto de conexão do cliente com a rede de distribuição de energia, onde registrou durante os dias 09 e 16 de maio de 2024, as grandezas elétricas da UC, a partir disso, os dados armazenados na memória interna do aparelho foram verificados através do software específico da Embrasul.

3.4.2 Análise da qualidade de energia depois da conexão do GDF

Novamente, o analisador de energia deverá ser instalado no mesmo consumidor, no mesmo ponto de conexão, onde registrou durante os dias 19 e 27 de setembro de 2024, agora com o sistema fotovoltaico em operação, com intuito de comparar os dados obtidos entre a primeira e a segunda parte do estudo de caso. Assim, possibilitando verificar se houve impactos significativos nos parâmetros de qualidade de energia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

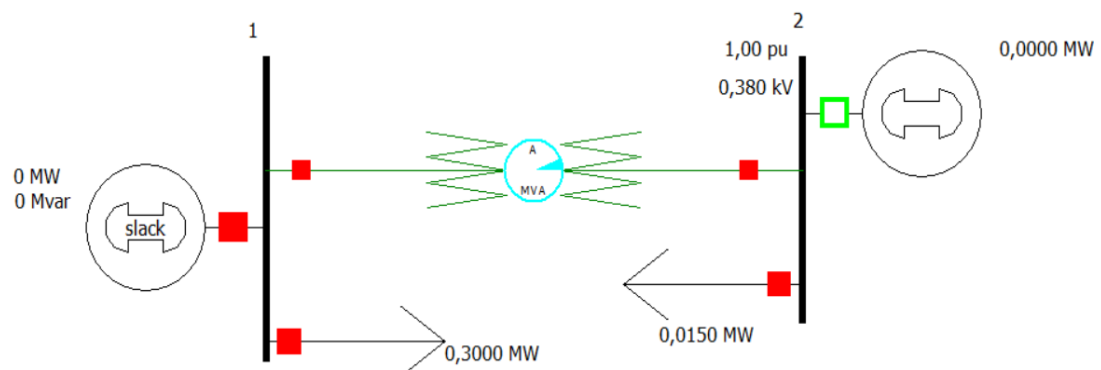
A partir do estudo de caso completo com análise antes e depois da conexão da GDF, será possível determinar se os parâmetros de qualidade de energia são influenciados negativamente ou não com a presença do sistema fotovoltaico.

4.1 Parâmetros de qualidade antes da conexão do GDF

Na simulação realizada no *software Power World*, foi levado em consideração os parâmetros nominais das grandezas elétricas, tanto na unidade consumidora quanto na rede de distribuição da concessionária, incluindo dados de consumidores atendidos na mesma rede de média tensão. Como a concessionária não disponibiliza os dados das características de carga dos consumidores utilizados na simulação, foram utilizados valores aproximados, estabelecidos levando em consideração as especificações de padrão de entrada de energia e tamanho das instalações.

Inicialmente, foi desenvolvido um circuito que representa a rede de média tensão na barra 1, o transformador de 75kVA que atende apenas o cliente em estudo, a conexão em baixa tensão da UC com a concessionária representada pela barra 2, além das cargas indicadas pelas flechas, conforme a Figura 16. O gerador conectado na barra de média tensão representa a geração referente a energia distribuída pela concessionária, já o que está acoplado na barra 2, neste momento desligado, se trata do sistema fotovoltaico.

Figura 16 – Simulação com o sistema fotovoltaico desligado



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Com a GDF desligada, o comportamento da tensão no consumidor de estudo representa os valores nominais estabelecidos, nesse caso, pela característica própria do *software*, o valor

se dá representando a ligação trifásica em 380V e será estudado nesse formato quando se tratar da simulação.

Como esperado, na simulação realizada ao levarmos em consideração um sistema elétrico de distribuição equilibrado, o nível de tensão no consumidor sem a presença de sua própria fonte de geração, sempre será o nominal estabelecido pelas diretrizes da concessionária, nesse caso 220V se considerado a tensão monofásica e 380V por ser uma ligação trifásica.

Com os dados obtidos na primeira parte do estudo de caso, foi possível gerar um relatório completo para facilitar na análise de alguns parâmetros de qualidade, conforme anexado no Apêndice B - Relatório Geral de Análise 1. A tensão média na UC antes da conexão da GDF se caracteriza como adequada conforme as diretrizes do PRODIST, em ambas as fases de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Tensão antes da conexão da GDF

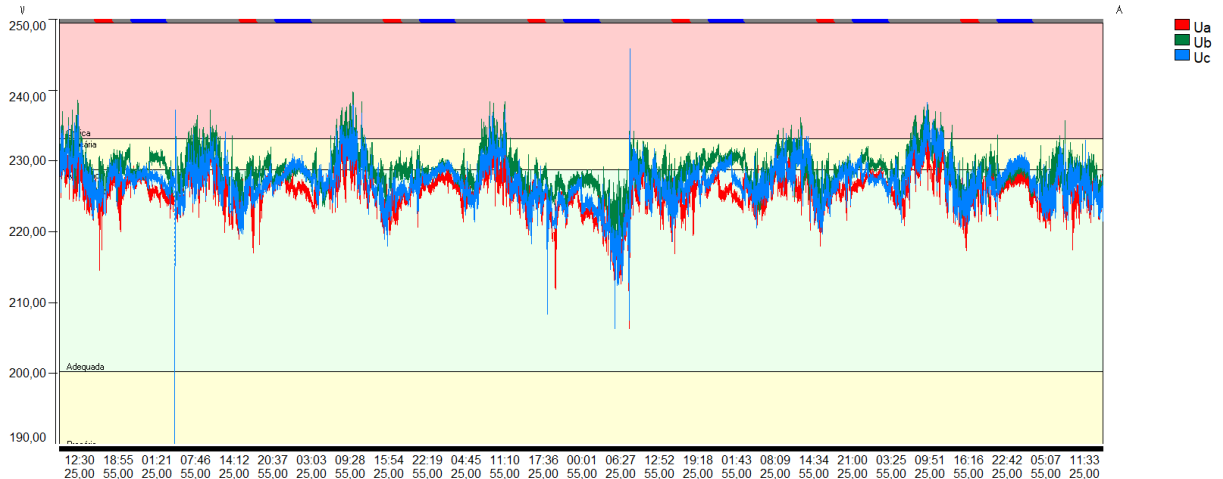
Fases	Tensão Mínima	Tensão Máxima	Tensão Média
A	206,37	244,91	226,83
B	210,40	242,75	228,83
C	206,40	245,84	227,20

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Vale ressaltar também que na questão de desequilíbrio de tensão entre as fases antes da conexão da GDF, não foi significativa para caracterizá-la como inadequada, porém, em determinados momentos a tensão apresentou certo nível de desbalanceamento nas fases B e C. Essa distorção na tensão dessas fases não foi duradoura, alguns picos de sub e sobretensão apenas, que podem ter ocorrido devido a desproporção dos consumidores conectados nestas fases e das cargas nas mesmas.

Apesar de que em alguns momentos a tensão passe de adequada para precária e em raros episódios para crítica, conforme indicado na Figura 17, sendo possível identificar que na totalidade dos casos precários, os surtos de tensão resultam em sobretensão. Na faixa verde estão estabelecidos os valores que caracterizam como adequada a tensão, na faixa amarela como precária e na vermelha crítica.

Figura 17 – Variação da tensão antes da conexão da GDF



Fonte: Elaborada pelo autor no *software* ANL6000 (2024)

Em relação ao Fator de Potência (FP) na instalação, observa-se que levando em consideração o total diário no período de análise não apresenta estar de acordo com o ideal, conforme apresentado na Tabela 2 na faixa de 0,92 e 1. Porém, esse parâmetro não tem grande significância pela característica da carga instalada na UC, levando em consideração que para um consumidor do grupo B não é cobrada multa caso o FP esteja fora do padrão normatizado e exigido pelas concessionárias.

Tabela 2 – Fator de potência antes da conexão da GDF

Fator de Potência (Indutivo)	09/05	10/05	11/05	12/05	13/05	14/05	15/05	16/05
Ponta	0,869	0,914	1,000	1,000	0,875	0,927	0,886	1,000
Fora de Ponta	0,849	0,815	0,813	0,850	0,833	0,912	0,889	0,877
Reservado	1,000	0,781	0,814	0,774	0,779	0,792	0,736	0,765
Total	0,855	0,827	0,813	0,838	0,828	0,893	0,860	0,848

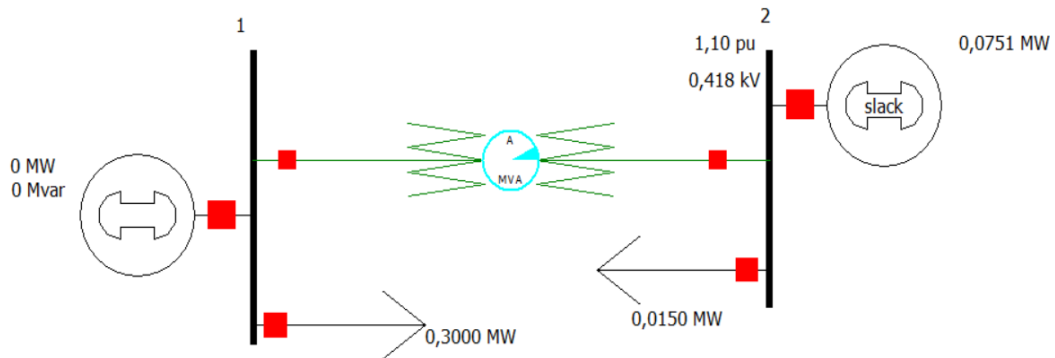
Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Os parâmetros de qualidade de energia sem a presença da GDF no consumidor estudado, apresentam níveis de tensão em regime permanente levemente alterados, demonstrando um comportamento específico em determinados momentos do dia. Referente ao fator de potência, os dados coletados apontam que está fora da faixa indicada nas normativas. Idealmente os valores devem ficar entre 0,92 e 1, porém foi constatado que os valores estão variando entre 0,813 e 0,893.

4.2 Parâmetros de qualidade depois da conexão do GDF

Ao simular o mesmo circuito também no aplicativo *Power World*, porém agora com o sistema fotovoltaico operando conforme apresentado na Figura 18, é possível verificar uma alteração no nível de tensão.

Figura 18 – Simulação com o sistema fotovoltaico ligado



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O que inicialmente sem o sistema fotovoltaico indicava o nível de tensão nominal em 380V, agora sofre uma alteração, conforme apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Dados da rede de Baixa Tensão

Bus Number	<input type="text"/>	Find By Number	<input type="text"/>
Bus Name	<input type="text"/>	Find By Name	<input type="text"/>
Nom. Voltage	0,3800	Status	<input type="radio"/> Disconnected <input checked="" type="radio"/> Connected
Labels ...	no labels	View Area Dialog View Zone Dialog View Island Dialog View Substation Dialog View Owner Dialog	
Area	1	Number	1
Zone	1	Name	1
Substation			
Owner	1		
Voltage (p.u.)	1,1000	Voltage (kV)	0,418
Angle (deg)	-1,171	Angle (rad)	-0,02044
Data Maintainer	<input type="text"/>		
Device Info	OPF	Geography	Custom GIC Branches Stability
Generator Information		Switched Shunt Information	
Total MW	0,1	Actual	Nominal
Total Mvar	0,0	G (MW)	
View/Edit Generators		B (Mvar)	
Load Information		View/Edit Switched Shunts	
Current MW	0,0	Bus Shunt Admittance	
Current Mvar	0,0	Actual	Nominal
View/Edit Bus Loads		G (MW)	
		B (Mvar)	
Bus Voltage Regulation			
Desired PU Voltage 1,1000			
Regulated by :			
Generator: 2 (2_ 0,4) #2			
View All Flows at Bus			
OK	Save	Save to Aux	Cancel Help Print

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Esse comportamento na barra 2, representando o nível de tensão na UC em estudo chegando a 418V, categoria classificada como crítica segundo as normativas brasileiras. Como mencionado anteriormente, a simulação não possui todas características da rede, por conta da indisponibilidade de dados da média tensão que atende o consumidor, mas é possível verificar uma consonância entre o resultado indicado no *software* e o estudo de caso realizado.

Com o sistema instalado, deu-se seguimento para a segunda parte do estudo de caso, a partir dos dados obtidos foi possível visualizar a variação da tensão na UC conforme apresentado no Apêndice C - Relatório Geral de Análise 2. A tensão média na instalação apresentou os seguintes valores, conforme a Tabela 3.

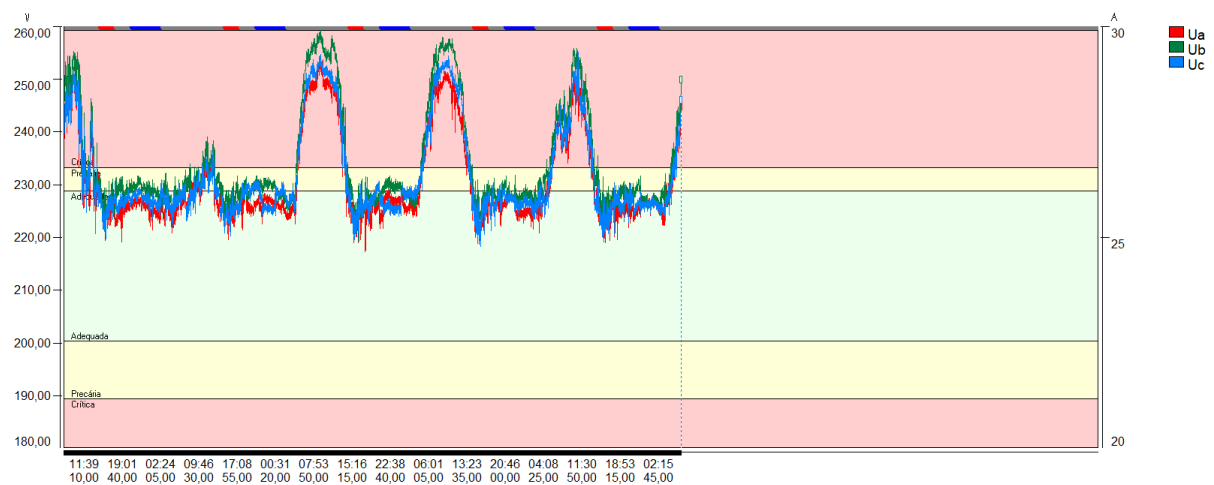
Tabela 3 – Tensão depois da conexão da GDF

Fases	Tensão Mínima	Tensão Máxima	Tensão Média
A	217,21	253,84	231,52
B	219,36	259,75	235,01
C	218,25	255,06	232,48

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Ao comparar com os níveis de tensão da primeira parte da análise, é possível identificar algumas mudanças, principalmente ao considerarmos o gráfico do seu comportamento, apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Variação da tensão antes da conexão da GDF



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

No período entre as 09 e 15 horas, é possível observar a elevação da tensão acompanhando a eficiência maior do sistema fotovoltaico nesse intervalo de tempo, em que o inversor trabalha com a máxima eficiência devido a maior ocorrência da radiação solar. Da mesma forma, em dias sem a incidência do sol, dias chuvosos, a característica da tensão tende a não se elevar demasiadamente.

Essa característica observada se trata de um conjunto de elementos que fazem com que o nível da tensão permaneça, durante um grande período de tempo na faixa caracterizada como Crítica pelo PRODIST. São eles, a influência do sistema fotovoltaico conectado à UC em questão, os demais GDF que fazem parte da mesma rede de média tensão que atende a instalação além dos fatores climáticos.

O FP registrado depois da conexão do GDF teve também algumas mudanças significativas, conforme apresentado na Tabela 4. Antes a variação ficava entre 0,813 e 0,893, já com o sistema em operação agora se enquadra nos limites estabelecidos, entre 0,92 e 1. Isso se deu por conta do consumo específico da UC, onde nela não constam equipamentos com características de cargas indutivas, somado ao fato do inversor ser configurado para que em sua saída CA o FP seja 1.

Tabela 4 – Fator de Potência depois da conexão da GDF

Fator de Potência (Indutivo)	19/09	20/09	21/09	22/09	23/09	24/09
Ponta	0,932	0,978	1,000	1,000	0,947	1,000
Fora de Ponta	0,998	0,989	0,998	0,998	0,998	0,998
Reservado	1,000	0,937	0,897	0,903	0,901	0,938
Total	0,998	0,988	0,998	0,998	0,998	0,997

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Essa melhora mostra que no ponto onde foi realizado a coleta das grandezas elétricas para o estudo de caso, o fator de potência assumiu os valores de saída do inversor fotovoltaico. Em consumidores que possuem características de carga maiores e com equipamentos como motores elétricos, por exemplo, a tendência é de piora no FP, sendo necessário monitorar tal comportamento para evitar possíveis multas advindas da concessionária.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo identificar os impactos na qualidade de energia das redes de distribuição de baixa tensão, resultantes da conexão de microgeradores fotovoltaicos de geração distribuída, realizando uma simulação computacional e um estudo de caso de um consumidor do grupo B, antes e depois da conexão de um sistema fotovoltaico em sua unidade consumidora. Para tal, foi utilizado o analisador de energia RE 6000 da marca Embrasil, visando a coleta de dados das grandezas elétricas no ponto de conexão do cliente com a rede de concessionária.

Tanto a simulação quanto o estudo de caso foram divididos em duas etapas, antes e depois da conexão do microgerador distribuído, para assim possibilitar a análise de características elétricas como nível de tensão e verificar se houve alterações negativas nas mesmas. Além disso, foi possível caracterizar se estão adequadas ou não, as grandezas elétricas conforme as normativas brasileiras vigentes.

Em relação a simulação, não foi possível realizá-la com exatidão por conta da falta de dados das características de carga dos consumidores, atendidos pela mesma rede de média tensão que o cliente em estudo. Esse tipo de informação interna das concessionárias não é disponibilizado para esse tipo de estudo, sendo necessário estimá-las a partir das especificações de padrão de entrada de energia e tamanho das instalações. Apesar disso, foi possível visualizar características de alterações, principalmente no nível de tensão na UC a partir da conexão do sistema fotovoltaico.

Em relação ao estudo de caso, enfoque principal deste trabalho, foi possível verificar a partir dos dados obtidos, algumas alterações nas grandezas elétricas da unidade consumidora em estudo. O mais significativo foi o nível de tensão, que sem a conexão do microgerador fotovoltaico se caracterizava como adequado e após a inserção da geração, notou-se um impacto extremamente negativo, chegando a valores próximos de 260V, passando a se caracterizar como inadequada.

A longa permanência do nível de tensão na faixa determinada como crítica pelo PRODIST – Módulo 8, demonstra um grande problema da conexão do microgerador fotovoltaico, impondo a concessionária a realizar adequações necessárias para estabilizar a sobretensão da rede. Ainda assim, as ações corretivas por parte da distribuidora de energia podem solucionar o impacto no local específico da unidade onde está a GD, no entanto, pela forma como o sistema elétrico brasileiro é estruturado de maneira interconectada, os problemas podem continuar ocorrendo em outros pontos da rede de distribuição.

Esse aumento no nível da tensão é decorrente da grande injeção de energia na rede da concessionária, onde apenas é injetado potência ativa conforme configuração de saída CA do inversor fotovoltaico, com fator de potência 1. Uma das características de injetar energia sem que haja consumo instantâneo, na unidade consumidora onde está conectado o microgerador e nas unidades vizinhas, é essa elevação da tensão verificada no estudo.

Por fim, conclui-se que esse aumento no nível de tensão pode provocar distúrbios nas redes de baixa tensão, principalmente se levarmos em consideração a grande inserção de microgeradores distribuídos a partir de fonte solar fotovoltaica, em diversos pontos do sistema elétrico brasileiro. Assim, gerando problemas tanto aos consumidores, ocasionando danos em seus equipamentos elétricos/eletrônicos, quanto às concessionárias, que precisarão adequar os componentes dos seus sistemas de proteção/distribuição de energia.

5.1 Recursos para mitigar os impactos

Uma forma de mitigar o aumento excessivo de tensão nas redes de distribuição de baixa tensão, advindos da conexão de microgeradores fotovoltaicos de geração distribuída é a implementação de sistemas de controle de tensão nos inversores. Dessa forma, com o ajuste no Fator de Potência, controlando a injeção ou absorção de potência reativa direto no inversor, poderá controlar os níveis de tensão adequados com as diretrizes estabelecidas pelas normativas brasileiras.

Outra forma de controlar os parâmetros de tensão das redes de distribuição, seria abordar alguns conceitos de redes inteligentes (AGUIAR, 2016). Sendo através do uso de sensores que permitam o monitoramento em tempo real das grandezas elétricas, equipamentos como reguladores de tensão, compensadores estáticos de reativos (*STATCOM*) e transformadores com *tap-changers* automáticos.

Portanto, a adoção de tecnologias de controle de tensão, seja por meio da atuação direta nos inversores dos microgeradores fotovoltaicos ou pela implementação de dispositivos avançados em redes inteligentes, é essencial para garantir a estabilidade e a qualidade do fornecimento de energia elétrica. Essas estratégias não apenas mitigam problemas associados às variações dos parâmetros de qualidade de energia, mas também promovem maior eficiência, confiabilidade e segurança no sistema elétrico, possibilitando uma integração mais sustentável e harmônica das fontes renováveis na matriz energética nacional.

5.2 Perspectivas futuras

Como sugestões de continuação ou melhoria deste trabalho, propõe-se os seguintes tópicos:

- Realizar o estudo na rede de média tensão, para poder visualizar os impactos com a inversão de fluxo de potência;
- Pesquisar a viabilidade de soluções como baterias e armazenamento de energia integrados aos sistemas fotovoltaicos;
- Apresentar conceitos de redes inteligentes com monitoramento e controle em tempo real das características elétricas.

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil - Infográfico**. 01 jun. 2024. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 01 jun. 2024.
- AGUIAR, J. P. A. **Estratégias de controlo de tensão em redes de distribuição de baixa tensão**. 2016. 106 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores Major Energia), Universidade do Porto, 2016.
- ALFONSO, T. O. da. S. **Análise sistêmica do impacto da geração distribuída no sistema de distribuição de energia**. 2021. 149 f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.
- ALMEIDA, L. R. de. **Contribuições à análise dos impactos da microgeração distribuída por fonte fotovoltaica nos sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2024. 225 f. Tese (Doutorado em Ciências), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.
- ANEEL. **Geração Distribuída**. 29 mai. 2024a. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiY2VmMmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>. Acesso em: 29 mai. 2024.
- ANEEL. **Relação de empreendimentos de Mini e Micro Geração Distribuída**. 23 nov. 2021. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/relacao-de-empreendimentos-de-geracao-distribuida>. Acesso em: 31 mai. 2024.
- AZEVEDO, P. E. B. **Fundamentos teórico-metodológicos sobre fluxo de potência ótimo e aplicações com o *power world simulator***. 99f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica), Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Garanhuns – PE, 2023.
- BALBINO, I. M. **Análise de um sistema fotovoltaico conectado à rede em Mossoró/RN**. 2017. 96f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Comunicação e Automação), Universidade Federal do Semi-Árido, Mossoró, 2017.
- CARVALHO, R. C. **Conexão da Geração Distribuída de Consumidores Industriais em Paralelo com o Sistema de Distribuição e de Transmissão de Concessionárias de Energia Elétrica**. 2009. 202 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- CPFL. **Norma Técnica GED 15303 - Conexão de Micro e Minigeração Distribuída sob Sistema de Compensação De Energia Elétrica**. GED 153030, 2020. Disponível em: <https://www.cpfl.com.br/sites/cpfl/files/2021-12/GED-15303.pdf>.
- CRIVELIN, L. C. C. **Regulação da geração de energia elétrica por fontes alternativas: impactos da atuação da ANEEL na diversificação da matriz energética brasileira e na construção de um modelo de desenvolvimento sustentável**. 2018. 181 f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Direito), Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2018.
- DE CARLI, L. G. S. **Simulação e análise de um sistema de geração distribuída por meio do *software powerworld simulator***. 95f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de

Engenharia Elétrica), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

EMBRASUL. **Analizador de Energia RE6000**. [s.d.]. Disponível em: <https://embrasul.com.br/re6000-2/>. Acesso em: 09 jun. 2024.

EPRI. **What is OpenDSS?** [s.d.]. Disponível em: <https://www.epri.com/pages/sa/openss>. Acesso em: 02 jun. 2024. Acesso em: 02 jun. 2024.

ESSLINGER; WITZMANN. **Increasing grid transmission capacity and power quality by new solar inverter concept and inbuilt data communication**. 4th International Telecommunication - Energy Special Conference, TELESCON 2009, , p. 1–7, 2010.

FORTE, R. R. A. **Propagação de harmônicas produzidas por inversores fotovoltaicos e transformadores assimetricamente magnetizados na geração distribuída**. 2018. 203f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2018.

GOV.BR. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Micro e minigeração distribuída apresenta acréscimo de 7,4 GW em 2023**. 03 jan. 2024b. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/micro-e-minigeracao-distribuida-apresenta-acrescimo-de-7-4-gw-em-2023#:~:text=Pot%C3%Aancia%20instalada%20total%20ultrapassa%20os,conectados%20%C3%A0%20rede%20de%20distribui%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 01 jun. 2024.

GOV.BR. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Micro e Minigeração Distribuída**. 01 jun. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/aceso-a-informacao/perguntas-frequentes/micro-e-minigeracao-distribuida>. Acesso em: 26 mai. 2024.

GOV.BR. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Micro e Minigeração Distribuída**. 10 fev. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>. Acesso em: 26 mai. 2024.

JENKINS, N.; EKANAYAKE, J. B.; STRBAC, . **Distributed Generation**. 1. ed. London: The Institution Of Engineering And Technology, 2010.

KUSKO, A.; THOMPSON, M. T. **Power Quality in Electrical Systems**. 1. ed. Estados Unidos: McGraw Hill, 2007.

LUIZ, C. M. **Avaliação dos impactos da geração distribuída para proteção do sistema elétrico**. 2012. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

M. H. Bollen e F. Hassan. **Integration of distributed generation in the power system**. 1. ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2011.

MATAR, C. C. A. **Da gênese à implantação dos procedimentos de distribuição - PRODIST: Desafios e oportunidades**. 2010. 200 f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia da Energia), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

NOTA TÉCNICA 0057/2014 - Aprimoramento da metodologia de cálculo de perdas na distribuição regulamentada no Módulo 7 - Cálculo de Perdas na Distribuição do

PRODIST. ANEEL, 2014. Disponível em: https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/audiencias-publicas-antigas?p_p_id=participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_ideDocumento=5527&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_tipoFaseReuniao=fase&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_jspPage=%2Fhtml%2Fpp%2Fvisualizar.jsp.

PALUDO, J. A. Avaliação dos Impactos de Elevados Níveis de Penetração da Geração Fotovoltaica no Desempenho de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica em Regime Permanente. 2014. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

POWERWORLD. Simulator. Disponível em: <https://www.powerworld.com/products/simulator/overview>. Acesso em: 19 nov. 2024.

PRADO, C. C. do. Metodologia para análise da influência de pequenas centrais de geração síncrona na margem de estabilidade de tensão. 2017. 97 f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST - Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica. ANEEL, 2020. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020888_prodist_modulo_8_v11.pdf.

RESOLUÇÃO HOMOLOGATÓRIA - Formulário de Orçamento de Conexão de centrais de microgeração e minigeração distribuída e os valores de referência dos custos de investimento. ANEEL, 2023.

RESOLUÇÃO NORMATIVA 1000/2021 - Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica. ANEEL, 2021.

RESOLUÇÃO NORMATIVA 182/2012 - Condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. ANEEL, 2012

RESOLUÇÃO NORMATIVA 482/2015 - Condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica - Alteração da Resolução Normativa 482/2012. ANEEL, 2015.

SCOLARI, B. S.; URBANETZ, J. J. Panorama dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica amparados pela REN nº 482/2012 da ANEEL no Brasil. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 9, n. 2, p. 151-160, 2018.

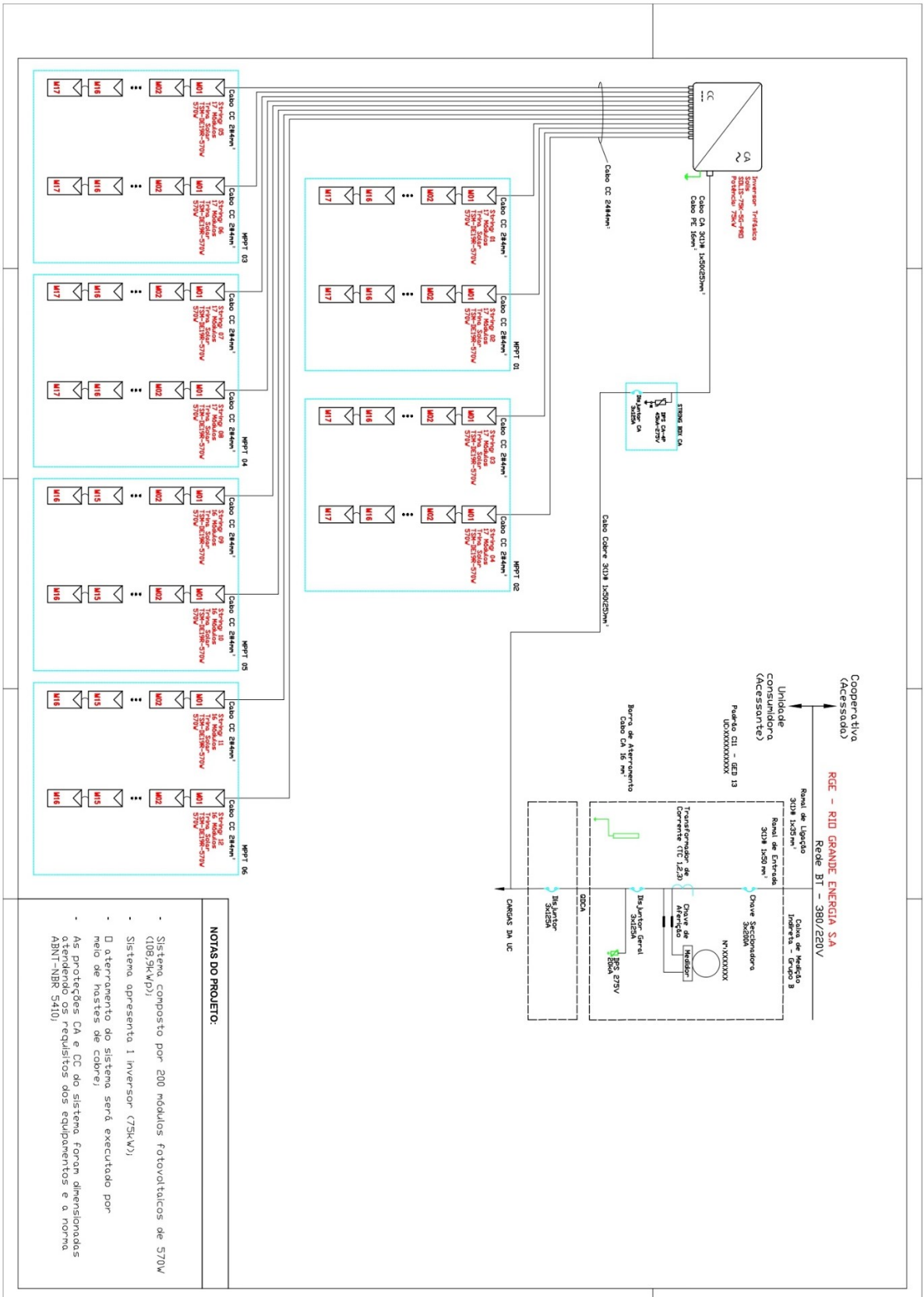
SEXAUER, Jason. **Introdução ao OpenDSS.** [S.l.: s.n.], 2016. 33 f. Disponível em: https://docplayer.com.br/56214033-Introducao-ao-openss.html#google_vignette. Acesso em: 02 jun. 2024.

SOUZA, A. C. de. Análise dos impactos da geração distribuída por fonte solar fotovoltaica na qualidade da energia elétrica. 2016. 160 f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

VILLALVA, M. G. **Conversor Eletrônico de Potência Trifásico para Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica**. 2010. 292 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

YACILA, P. I. N. V. **Alocação ótima de unidades de geração distribuída fotovoltaica em redes elétricas**. 2024. 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

APÊNDICE A - Diagrama Unifilar do GDF



APÊNDICE B - Relatório Geral de Análise 1

EMBRASUL RE6000/B/H/T/N N.S:96001652 V.S.2,20 ANL 3,04 (5 segundos)

Tecnomil Engenharia Industrial LTDA CNPJ: 990 547 510 -20 IE:157 152 325 2222 - 2

Almirante Tamandaré, 207 CEP: 9904746 Porto Alegre RS - Brasil

Tel: 124 45 45 125 47 47 FAX 474 25 22

www.tecnomil.com.br , tecnomil@ig.com.br

ANÁLISE GERAL (Integração = 5 segundos)

Intervalo considerado:

quinta-feira 09/05/2024 11:41:15,00 até quinta-feira 16/05/2024 17:17:20,00

Faixas de horário estabelecidas no software

Intervalo - Fora de ponta: 06:00 - 18:00 21:00 - 24:00

Intervalo - Ponta: 18:00 - 21:00

Intervalo - Reservado: 00:00 - 06:00

Máximos, médios e mínimos de tensões e correntes por fase.

Não considerados registros em queda e volta de energia. Tensão zero: 44,00 V

Fase A: tensões [V]

Média	226,10		
Mínimo	206,37	10:22:20,00	13/05/2024
Máximo	244,91	10:27:35,00	13/05/2024

Correntes [A]

Média	2,43		
Mínimo	0,35	10:30:10,00	14/05/2024
Máximo	29,23	21:57:55,00	12/05/2024

Fase B: tensões [V]

Média	228,83		
Mínimo	210,40	20:49:50,00	12/05/2024
Máximo	242,75	10:27:35,00	13/05/2024

Correntes [A]

Média	0,50		
Mínimo	0,00	11:41:15,10	09/05/2024
Máximo	0,76	18:24:40,00	14/05/2024

Fase C: tensões [V]

Média	227,20		
Mínimo	206,40	07:52:25,00	13/05/2024
Máximo	245,84	10:27:35,00	13/05/2024

Correntes [A]

Média	0,01		
Mínimo	-0,20	10:02:45,00	15/05/2024
Máximo	0,46	21:58:05,00	12/05/2024

Fora de ponta

FASE	kWh	kWh(g)	kVArh	kVAh	FP	Ponta	kWh	kWh(g)	kVArh	kVAh	FP
A	48,162	0,000	43,185	64,688	0,744	7,584	0,000	5,658	9,462	0,801	
B	1,576	0,000	-12,677	12,775	-0,123	0,205	0,000	-1,837	1,848	-0,111	
C	0,007	0,017	0,099	0,100	0,231	0,002	0,000	0,040	0,040	0,062	
Total	49,745	0,017	30,607	58,392	0,852	7,792	0,000	3,861	8,696	0,896	

Reservado

FASE	kWh	kWh(g)	kVArh	kVAh	FP	Total	kWh	kWh(g)	kVArh	kVAh	FP
A	11,900	0,000	15,175	19,285	0,617	67,646	0,000	64,018	93,136	0,726	
B	0,615	0,000	-5,205	5,241	-0,117	2,396	0,000	-19,719	19,864	-0,121	
C	0,001	0,000	0,135	0,135	0,005	0,010	0,017	0,274	0,274	0,097	
Total	12,516	0,000	10,106	16,086	0,778	70,053	0,017	44,574	83,017	0,844	

Potências médias, por fase e trifásicas, no intervalo

FASE	kW	kVAr	kVA	FP
A	0,386	0,368	0,533	0,724
B	0,014	-0,112	0,113	-0,120
C	-0,000	0,001	0,001	-0,024
Total	0,400	0,257	0,475	0,841

Potências aparentes por fase, segundo máximos e mínimos trifásicos

FASE	kVA(max)	Horário	kVA(min)	Horário
A	6,213	12/05/2024 21:57:55,00	0,084	14/05/2024 10:30:25,00
B	0,170	12/05/2024 21:57:55,00	0,064	14/05/2024 10:30:25,00
C	0,103	12/05/2024 21:57:55,00	0,000	14/05/2024 10:30:25,00
3f	6,315	12/05/2024 21:57:55,00	0,042	14/05/2024 10:30:25,00

Demandas máximas por horário**Fora de ponta [kW]**

12/05/2024 21:57:55,00 6,273
 12/05/2024 21:58:05,00 6,270
 12/05/2024 21:58:10,00 6,268

Fora de ponta [kVAr]

12/05/2024 12:20:35,00 1,107
 11/05/2024 12:19:15,00 1,106
 11/05/2024 19:12:45,00 1,015

Ponta [kW]

14/05/2024 18:25:15,00 5,376
 14/05/2024 18:25:10,00 5,369
 14/05/2024 18:25:20,00 5,368

Ponta [kVAr]

09/05/2024 19:24:40,00 0,987
 13/05/2024 19:38:35,00 0,944
 13/05/2024 19:15:40,00 0,934

Reservado [kW]

12/05/2024 04:10:50,00 1,917
 12/05/2024 04:11:00,00 1,916
 12/05/2024 04:10:45,00 1,914

Reservado [kVAr]

12/05/2024 04:10:40,00 0,927
 12/05/2024 04:10:50,00 0,780
 12/05/2024 04:11:00,00 0,766

Demandas máximas por horário Fase A**Fora de ponta [kW]**

12/05/2024 21:57:55,00 6,163
 12/05/2024 21:58:05,00 6,158
 12/05/2024 21:58:10,00 6,158

Fora de ponta [kVAr]

12/05/2024 12:20:35,00 1,228
 11/05/2024 12:19:15,00 1,222
 11/05/2024 19:12:45,00 1,141

Ponta [kW]

14/05/2024 18:25:15,00 5,299
 14/05/2024 18:25:20,00 5,291
 14/05/2024 18:25:10,00 5,289

Ponta [kVAr]

09/05/2024 19:24:40,00 1,106
 13/05/2024 19:38:35,00 1,072
 13/05/2024 19:15:40,00 1,063

Reservado [kW]

12/05/2024 04:10:50,00 1,886
 12/05/2024 04:11:00,00 1,884
 12/05/2024 04:10:45,00 1,882

Reservado [kVAr]

12/05/2024 04:10:40,00 1,049
 12/05/2024 04:10:50,00 0,903
 12/05/2024 04:11:00,00 0,891

Demandas máximas por horário Fase B**Fora de ponta [kW]**

15/05/2024 09:54:35,00 0,141
 15/05/2024 09:26:35,00 0,139
 15/05/2024 09:21:00,00 0,136

Fora de ponta [kVAr]

15/05/2024 12:04:55,00 -0,165
 15/05/2024 12:04:45,00 -0,165
 15/05/2024 12:04:50,00 -0,165

Ponta [kW]

09/05/2024 18:21:20,00 0,065
 09/05/2024 18:22:30,00 0,065
 09/05/2024 18:22:05,00 0,065

Ponta [kVAr]

15/05/2024 20:30:35,00 -0,165
 15/05/2024 20:30:40,00 -0,165
 15/05/2024 20:31:05,00 -0,165

Reservado [kW]

15/05/2024 02:01:55,00 0,132
 15/05/2024 04:04:50,00 0,131
 15/05/2024 02:33:25,00 0,131

Reservado [kVAr]

16/05/2024 04:05:50,00 -0,142
 16/05/2024 04:06:05,00 -0,142
 16/05/2024 04:05:40,00 -0,142

Demandas máximas por horário Fase C**Fora de ponta [kW]**

12/05/2024 21:58:10,00 0,036
 12/05/2024 21:58:15,00 0,036
 12/05/2024 21:58:05,00 0,036

Fora de ponta [kVAr]

12/05/2024 21:58:10,00 0,099
 12/05/2024 21:58:15,00 0,099
 12/05/2024 21:58:05,00 0,099

Ponta [kW]

14/05/2024 18:24:50,00 0,024
 13/05/2024 20:59:10,00 0,023
 13/05/2024 20:59:00,00 0,022

Ponta [kVAr]

14/05/2024 18:24:50,00 0,068
 14/05/2024 18:25:00,00 0,056
 13/05/2024 20:59:10,00 0,055

Reservado [kW]

15/05/2024 02:33:05,00 -0,002
 15/05/2024 05:57:50,00 0,002
 15/05/2024 05:57:00,00 0,002

Reservado [kVAr]

15/05/2024 05:54:10,00 0,045
 15/05/2024 05:49:25,00 0,045
 15/05/2024 05:52:05,00 0,043

Tempo líquido com carga na FASE A: 173,581944444572 horas. É o acúmulo de tempo em que a corrente é diferente de zero.

Tempo líquido com carga na FASE B: 173,337888889016 horas. É o acúmulo de tempo em que a corrente é diferente de zero.

Tempo líquido com carga na FASE C: 16,663888888912 horas. É o acúmulo de tempo em que a corrente é diferente de zero.

APÊNDICE C - Relatório Geral de Análise 2

EMBRASUL RE6000/B/H/T/N N.S:96001652 V.S.2,20 ANL 3,04 (5 segundos)

ANÁLISE GERAL (Integração = 5 segundos)

Intervalo considerado:

quinta-feira 19/09/2024 10:42:46,00 até sexta-feira 27/09/2024 17:57:11,00

Faixas de horário estabelecidas no software

Intervalo - Fora de ponta: 06:00 - 18:00 21:00 - 24:00

Intervalo - Ponta: 18:00 - 21:00

Intervalo - Reservado: 00:00 - 06:00

Máximos, médios e mínimos de tensões e correntes por fase.

Não considerados registros em queda e volta de energia. Tensão zero: 33,01 V

Fase A: tensões [V]

Média 231,52
Mínimo 217,21 20:42:15,00 21/09/2024
Máximo 253,84 12:03:20,00 21/09/2024

Correntes [A]

Média 27
Mínimo -99 12:17:55,00 19/09/2024
Máximo 22 21:14:40,00 23/09/2024

Fase B: tensões [V]

Média 235,01
Mínimo 219,36 19:18:15,00 21/09/2024
Máximo 259,75 12:04:05,00 21/09/2024

Correntes [A]

Média 28
Mínimo -103 12:17:55,00 19/09/2024
Máximo 2 18:42:55,00 19/09/2024

Fase C: tensões [V]

Média 232,48
Mínimo 218,25 18:50:00,00 22/09/2024
Máximo 255,06 13:44:20,00 23/09/2024

Correntes [A]

Média 27
Mínimo -102 14:00:35,00 22/09/2024
Máximo 1 07:48:00,00 20/09/2024

Fora de ponta

FASE	kWh	kWh(g)	kVArh	kVAh	FP	kWh	kWh(g)	kVArh	kVAh	FP
A	9,743	664,781	26,718	655,583	0,999	3,672	0,174	1,877	3,969	0,899
B	0,537	714,128	46,209	715,086	0,998	0,226	0,425	-0,919	0,940	-0,578
C	0,042	698,303	58,165	700,679	0,996	0,007	0,580	0,631	0,852	0,681
Total	10,321	2,077 k	131,091	2,071 k	0,998	3,905	1,180	1,589	3,155	0,954

Ponta

Reservado

FASE	kWh	kWh(g)	kVArh	kVAh	FP	kWh	kWh(g)	kVArh	kVAh	FP
A	7,853	0,000	7,626	10,946	0,717	21,267	664,956	36,221	644,707	0,999
B	0,481	0,000	-4,040	4,069	-0,118	1,245	714,554	41,249	714,501	0,998
C	0,002	0,000	0,031	0,031	0,058	0,050	698,883	58,827	701,304	0,996
Total	8,336	0,000	3,617	9,087	0,917	22,562	2,078 k	136,298	2,060 k	0,163

Total

Potências médias, por fase e trifásicas, no intervalo

FASE	kW	kVAr	kVA	FP
A	-6,234	0,327	6,242	-0,999
B	-6,857	0,390	6,868	-0,998
C	-6,711	0,548	6,734	-0,997
Total	-19,802	1,265	19,842	-0,998

Potências aparentes por fase, segundo máximos e mínimos trifásicos

FASE	kVA(max)	Horário	kVA(min)	Horário
A	24,320	22/09/2024 14:24:20,00	0,095	21/09/2024 06:24:10,00
B	25,958	22/09/2024 14:24:20,00	0,018	21/09/2024 06:24:10,00
C	25,327	22/09/2024 14:24:20,00	0,068	21/09/2024 06:24:10,00
3f	75,596	22/09/2024 14:24:20,00	0,069	21/09/2024 06:24:10,00

Demandas máximas por horário

Fora de ponta [kW]			Ponta [kW]			Reservado [kW]		
23/09/2024	21:14:40,00	5,049	20/09/2024	20:58:10,00	5,036	22/09/2024	01:27:35,00	1,996
23/09/2024	21:14:30,00	5,037	20/09/2024	20:58:05,00	5,032	22/09/2024	01:27:45,00	1,993

23/09/2024 21:14:35,00 5,037	20/09/2024 20:58:15,00 5,030	22/09/2024 01:28:00,00 1,990
Fora de ponta [kVAr]	Ponta [kVAr]	Reservado [kVAr]
21/09/2024 12:52:05,00 16,751	20/09/2024 18:07:40,00 1,183	22/09/2024 01:28:35,00 0,910
19/09/2024 10:44:00,10 8,872	23/09/2024 18:19:10,00 1,032	22/09/2024 01:27:45,00 0,826
19/09/2024 10:43:41,80 7,139	23/09/2024 18:19:15,00 1,026	22/09/2024 01:27:35,00 0,822

Demandas máximas por horário Fase A

Fora de ponta [kW]	Ponta [kW]	Reservado [kW]
23/09/2024 13:33:25,00 -24,444	20/09/2024 20:58:10,00 5,040	22/09/2024 01:27:35,00 1,970
23/09/2024 13:32:35,00 -24,437	20/09/2024 20:58:05,00 5,036	22/09/2024 01:27:45,00 1,967
23/09/2024 13:33:30,00 -24,431	20/09/2024 20:58:15,00 5,034	22/09/2024 01:28:00,00 1,964
Fora de ponta [kVAr]	Ponta [kVAr]	Reservado [kVAr]
21/09/2024 12:52:05,00 13,164	23/09/2024 18:40:10,00 0,798	22/09/2024 01:28:35,00 0,982
19/09/2024 10:44:00,10 6,250	20/09/2024 19:07:35,00 0,777	22/09/2024 01:27:30,00 0,877
21/09/2024 07:56:30,00 3,910	23/09/2024 19:46:05,00 0,730	22/09/2024 01:27:35,00 0,874

Demandas máximas por horário Fase B

Fora de ponta [kW]	Ponta [kW]	Reservado [kW]
22/09/2024 13:59:05,00 -26,068	23/09/2024 18:00:15,00 -1,300	22/09/2024 04:45:10,00 0,026
22/09/2024 14:00:20,00 -26,060	23/09/2024 18:00:20,00 -1,300	22/09/2024 04:36:55,00 0,026
22/09/2024 14:00:25,00 -26,055	23/09/2024 18:00:10,00 -1,299	22/09/2024 04:37:00,00 0,026
Fora de ponta [kVAr]	Ponta [kVAr]	Reservado [kVAr]
19/09/2024 10:43:41,80 4,180	23/09/2024 18:00:10,00 0,471	21/09/2024 05:39:05,00 -0,154
22/09/2024 15:10:30,00 2,725	23/09/2024 18:00:15,00 0,468	21/09/2024 05:38:05,00 -0,154
19/09/2024 10:52:02,50 2,236	23/09/2024 18:00:05,00 0,465	21/09/2024 05:38:55,00 -0,154

Demandas máximas por horário Fase C

Fora de ponta [kW]	Ponta [kW]	Reservado [kW]
22/09/2024 14:00:35,00 -25,605	23/09/2024 18:00:05,00 -1,368	20/09/2024 05:51:00,00 0,014
22/09/2024 13:28:15,00 -25,603	23/09/2024 18:00:10,00 -1,365	20/09/2024 05:50:55,00 0,012
22/09/2024 13:28:20,00 -25,601	23/09/2024 18:00:15,00 -1,363	20/09/2024 05:50:45,00 0,012
Fora de ponta [kVAr]	Ponta [kVAr]	Reservado [kVAr]
24/09/2024 08:40:50,00 5,069	23/09/2024 18:06:25,00 0,421	22/09/2024 01:27:45,00 0,088
19/09/2024 10:47:52,70 3,647	23/09/2024 18:06:20,00 0,417	22/09/2024 01:27:50,00 0,086
19/09/2024 10:52:02,50 2,576	23/09/2024 18:06:10,00 0,415	22/09/2024 01:27:35,00 0,084

Tempo líquido com carga na FASE A: 118,901388888973 horas. É o acúmulo de tempo em que a corrente é diferente de zero.

Tempo líquido com carga na FASE B: 118,895833333417 horas. É o acúmulo de tempo em que a corrente é diferente de zero.

Tempo líquido com carga na FASE C: 77,8388888889399 horas. É o acúmulo de tempo em que a corrente é diferente de zero.