



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus Experimental de Rosana

WILLIAN PAULINO BARATELI

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA INSERÇÃO MASSIVA DA GERAÇÃO SOLAR
FOTOVOLTAICA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

ROSANA – SP

2021

WILLIAN PAULINO BARATELI

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA INSERÇÃO MASSIVA DA GERAÇÃO SOLAR
FOTOVOLTAICA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenadoria do Curso de Engenharia de
Energia do Campus Experimental de Rosana,
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para
obtenção do diploma de Graduação em
Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Teles de Faria

ROSANA – SP

2021



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus Experimental de Rosana

WILLIAN PAULINO BARATELI

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA DE ENERGIA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Prof. Dr. JOSÉ FRANCISCO RESENDE DA SILVA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. LUCAS TELES DE FARIA
Orientador/UNESP-Rosana

Prof. Dr. JOSÉ FRANCISCO RESENDE DA SILVA
UNESP-Rosana

Prof. Dr^a. LETÍCIA SABO BOSCHI
UNESP-Rosana

Agosto
2021

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida, e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho, e durante a jornada na faculdade.

A minha família que sempre me apoiaram e deram suporte para chegar até aqui, os puxões de orelha, mas que eram para o meu bem.

A minha noiva pelo amor e carinho, que sempre esteve do meu lado durante a realização deste trabalho, me consolando nos momentos difíceis, e me ajudando a ser uma pessoa melhor.

Agradeço à experiência adquirida durante o estágio e como funcionário da empresa ENGPONTAL. Essa experiência foi valiosa para a execução deste trabalho. A todos os colaboradores dela e de outras empresas que trabalhamos juntos na realização de algum serviço, que foram peças de extrema importância para todo aprendizado prático e teórico que adquiri e agregou muito para minha carreira profissional.

Agradeço a todos os professores por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender. A palavra mestre, nunca fará justiça aos professores dedicados aos quais sem nominar terão os meus eternos agradecimentos.

RESUMO

A rede de distribuição de energia elétrica deve possuir um grau de qualidade que permita o funcionamento dos inversores dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Esses inversores são chamados de *on-grid* e monitoram a rede elétrica de forma que fornecem energia somente se a rede estiver presente e com seus níveis de tensão e frequência dentro dos limites de parâmetros dos inversores. Este trabalho apresenta um estudo de caso real realizado no distrito de Primavera Município de Rosana SP sobre como a qualidade da energia da rede de distribuição local impacta no mau funcionamento de inversores de energia solar fotovoltaica conectados à rede. Os sistemas fotovoltaicos deste estudo se desconectavam da rede várias vezes por ela estar com os limites de tensão fase-neutro acima dos parâmetros dos inversores devido à inserção de grande potência de GSF no mesmo ponto de conexão. Problema que foi solucionado alterando configuração de conexão dos inversores.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema Fotovoltaicos Conectados à Rede. Geração Distribuída. Qualidade de Energia. Inversores.

ABSTRACT

The electricity distribution network must have a quality level that allows the operation of the inverters of photovoltaic systems connected to the grid. These inverters are called on-grid and they monitor the electrical grid so that they only supply energy if the grid is present and with its voltage and frequency levels within the inverter limits. This work presents a real case study carried out in the district of Primavera Município de Rosana SP on how the energy quality of the local distribution network impacts the malfunction of photovoltaic solar energy inverters connected to the grid. The photovoltaic systems in this study were disconnected from the grid several times because the voltage limits were above the inverter parameters due to the insertion of large GSF power at the same connection point. Problem that was solved by changing the inverter connection configuration.

KEYWORDS: Grid connected PV Systems. Distributed generation. Power Quality. Inverters.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Ilustração de uma Usina Heliotérmica.</i>	22
<i>Figura 2: Insolação diária média anual do território brasileiro (horas).</i>	23
<i>Figura 3: Aumento na Geração Distribuída.</i>	24
<i>Figura 4: Célula de silício monocristalino e de silício policristalino.</i>	25
<i>Figura 5: Ilustração sistema fotovoltaico off-grid.</i>	26
<i>Figura 6: Ilustração sistema fotovoltaico on-grid.</i>	26
<i>Figura 7: Influência da radiação solar no comportamento do módulo fotovoltaico.</i>	27
<i>Figura 8: – Influência da temperatura no módulo fotovoltaico.</i>	28
<i>Figura 9: Caixa de conexões com diodos by-pass.</i>	29
<i>Figura 10: Local das Instalações no Distrito de Primavera.</i>	34
<i>Figura 11: Vista dos inversores da entidade.</i>	35
<i>Figura 12: Disposição dos Módulos Fotovoltaicos da entidade.</i>	35
<i>Figura 13: Vista frontal dos módulos fotovoltaicos da entidade.</i>	36
<i>Figura 14: Vista lateral dos módulos da residência (telhado oeste).</i>	37
<i>Figura 15: Vista frontal dos módulos da residência (telhado leste e oeste).</i>	37
<i>Figura 16: Vista dos módulos da residência (telhado leste e oeste ao fundo e norte à frente).</i>	38
<i>Figura 17: Vista dos módulos da residência de cima (telhado norte).</i>	38
<i>Figura 18: Vista de um dos inversores da residência.</i>	39
<i>Figura 19: Tensão de fase no inversor 3 da entidade.</i>	40
<i>Figura 20: Tensão de linha no inversor 3 da entidade.</i>	40
<i>Figura 21: Sistema da entidade 2020.</i>	41
<i>Figura 22: Sistema da residência 2020.</i>	41
<i>Figura 23: Sistema da entidade no pico de potência no dia.</i>	43
<i>Figura 24: Sistema da residência pico de potência no dia.</i>	43
<i>Figura 25: Sistema da entidade após correção.</i>	44
<i>Figura 26: Sistema da residência após correção.</i>	44

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de interrupção individual por unidade consumidora
DICRI	Duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora
DMIC	Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora
DRC	Duração relativa da transgressão de tensão crítica
DRP	Duração relativa da transgressão de tensão precária
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FIC	Frequência de interrupção individual por unidade consumidora
GD	Geração Distribuída
GSF	Geração Solar Fotovoltaica
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
MPPT	Rastreador de Máximo Ponto de Potência
MW	Megawatt
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
SFCR	Solar Fotovoltaica Conectada à Rede
THDi	Distorção Harmônica Total da corrente elétrica
THDv	Distorção Harmônica Total da tensão elétrica
W/m ²	Watts por metro quadrado

SUMÁRIO

1	ESCOPO DO TRABALHO	11
1.1	CONTEXTO E JUSTIFICATIVA _____	11
1.2	OBJETIVO _____	12
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO _____	12
2	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA COM FONTES LIMPAS E RENOVÁVEIS	14
2.1	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA _____	14
2.1.1	Energia Solar Fotovoltaica	15
2.1.2	Energia Solar Térmica	16
2.1.3	Energia Eólica	16
2.1.4	Biomassa	16
2.1.5	Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH	17
2.2	VANTAGENS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA PARA O SETOR ELÉTRICO, PARA O CONSUMIDOR E PARA A SOCIEDADE _____	17
2.2.1	Redução na Conta de Energia do Usuário	17
2.2.2	Sistema de Compensação de Energia	17
2.2.3	Redução das Perdas	18
2.2.4	Redução dos Impactos Ambientais	18
2.3	DESVANTAGENS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA PARA O SISTEMA ELÉTRICO ____	18
2.3.1	Flutuação da Geração	18
2.3.2	Distorções Harmônicas	18
2.3.3	Fluxo de Potência Reverso	19
2.4	DEFICIÊNCIAS DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO QUE IMPACTAM DIRETAMENTE NO FUNCIONAMENTO DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA _____	19
2.4.1	Afundamento de Tensão ou Subtensão	20
2.4.2	Elevação de Tensão ou Sobretenção	20
2.4.3	Distorções Harmônicas	20
3	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	21
3.1	CONCEITOS SOBRE ENERGIA SOLAR _____	21
3.1.1	Radiação Solar	22
3.1.2	Irradiância	22
3.1.3	Insolação	22

3.1.4	Massa de Ar	23
3.2	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	23
3.3	FATORES QUE INFLUENCIAM NA INTERMITÊNCIA DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA	27
3.3.1	Influência da Radiação Solar	27
3.3.2	Influência da Temperatura	27
3.3.3	Efeito de Sombreamento	28
4	QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	30
4.1	INTRODUÇÃO	30
4.2	PRODIST	30
4.3	QUALIDADE DO PRODUTO	30
4.3.1	Indicadores de Conformidade do Nível de Tensão em Regime Permanente	30
4.4	QUALIDADE DO SERVIÇO	31
4.4.1	Indicadores Coletivos de Continuidade	31
4.4.2	Indicadores Individuais de Continuidade	32
5	ANÁLISE DOS IMPACTOS DA QUALIDADE DE ENERGIA DEFICITÁRIA SOBRE OS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS	33
5.1	INTRODUÇÃO	33
5.2	DESCRIÇÃO DAS INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS	33
5.3	DESCRIÇÃO DAS INTERRUPÇÕES NA geração solar fotovoltaica	39
5.4	SOLUÇÃO DOS PROBLEMAS DE DESCONEXÕES	43
6	CONCLUSÕES	46
6.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	46
7	REFERÊNCIAS	47

1 ESCOPO DO TRABALHO

De acordo com REN21 (2016), hoje os sistemas solares fotovoltaicos são as principais fontes de energia para os sistemas de geração distribuída. Entre os anos de 2015 e início de 2016, a energia solar e a energia eólica combinadas corresponderam a cerca de 77% dos novos sistemas de geração distribuída no mundo inteiro (apud Naruto, 2017). No Brasil de 2019 para 2020 houve 137% de aumento na geração de energia elétrica com as GDs segundo o BEN (2021).

Ao longo deste trabalho, será tratado como a qualidade da energia deficitária da rede de distribuição local impacta nos inversores de energia solar fotovoltaica conectados à rede.

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

Geração distribuída (GD) é o termo dado à energia elétrica gerada no local de consumo ou próximo a ele, sendo válida para diversas fontes de energia renováveis como a energia solar, eólica e hídrica.

Além de proporcionar maior eficiência energética, pois mitiga as perdas da transmissão e distribuição, a GD possibilita aos consumidores diminuir seus custos com energia elétrica, colaborando para a robustez da matriz elétrica. Essas vantagens incluem trazer maior segurança energética e contribuição para o uso de uma energia limpa e renovável.

Na GD, a redução da necessidade de linhas de transmissão de energia e o caráter descentralizado do sistema fazem com que os custos e os impactos ambientais próprios da geração convencional sejam evitados. Como desvantagem a inserção da GD no sistema elétrico principal modifica os parâmetros que já estavam estabelecidos e modelados para os procedimentos de operação e manutenção da rede convencional. A GD também pode ocasionar sobretensões e fluxos de potência reverso em locais onde a proteção não está ainda dimensionada na forma direcional adequada.

Os tipos de GD são:

- Cogeneradores;
- Geradores de emergência;
- Geradores para operação no horário de ponta;
- Energia solar fotovoltaica;
- Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCHs.

Dentre esses tipos falaremos sobre a energia solar fotovoltaica neste trabalho. Uma usina solar fotovoltaica é um sistema de grande ou pequeno porte onde a energia dos raios solares é convertida através dos painéis fotovoltaicos em energia elétrica para ser vendida para a rede no caso dos grandes sistemas e convertida em créditos para os sistemas de pequeno porte. Uma usina solar térmica é aquela que utiliza coletores solares para absorver a energia do sol e aquecer um fluido, armazenar o calor e utilizar para gerar vapor e alimentar uma turbina a vapor acoplada a um gerador elétrico.

Os impactos da alta penetração fotovoltaica na rede de distribuição são: sobretenção, distorção harmônica, perdas elétricas e alteração no fator de potência (DANTAS, 2019).

A falta de atendimento a certos parâmetros de qualidade da energia elétrica que flui pela rede pode interferir no funcionamento da geração solar fotovoltaica (GSF) do tipo *on-grid*, fazendo o inversor se desconectar da rede elétrica e assim impedindo a geração de energia pelo sistema fotovoltaico.

1.2 OBJETIVO

A maioria dos estudos focam nos impactos ocasionados pela geração solar fotovoltaica (GSF) na rede de distribuição tais como: sobretenção, sobrecorrente, aumento das perdas elétricas, fluxo reverso, etc. Esses aspectos também serão abordados neste estudo. No entanto, pretende-se dar ênfase no sentido contrário, isto é, no mau funcionamento dos sistemas fotovoltaicos devido à falta de atendimento de alguns parâmetros de qualidade da energia elétrica da rede de distribuição. Isso é feito através da análise de exemplos reais com unidades consumidoras (UCs) residenciais e comerciais do distrito de Primavera, Rosana, SP.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A organização deste trabalho será feita da seguinte forma:

No capítulo 2 abordará a GD com fontes limpas e renováveis. Serão apresentadas as vantagens e desvantagens da GD para o sistema elétrico e como a qualidade da energia elétrica da rede de distribuição impacta diretamente na GSF.

No capítulo 3 serão apresentados os conceitos de energia solar, os sistemas fotovoltaicos *on-grid* e *off-grid* e os fatores que influenciam na intermitência da GSF.

No capítulo 4 serão apresentados conceitos fundamentais sobre a qualidade da energia elétrica.

No capítulo 5 é feita a análise dos impactos da qualidade de energia deficitária sobre os sistemas solares fotovoltaicos reais e instalados em UCs residenciais e comerciais pertencentes ao distrito de Primavera, Rosana, SP.

Em último, no capítulo 6, têm-se as conclusões deste estudo.

2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA COM FONTES LIMPAS E RENOVÁVEIS

Neste capítulo serão apresentados alguns aspectos introdutórios sobre a GD: definição, como funciona, como são classificadas as fontes energéticas, suas vantagens e desvantagens, como a GD afeta a rede elétrica de distribuição e como ela é afetada pela rede elétrica no caso da inserção massiva da GSF.

2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A GD é considerada um novo modelo de produção de energia elétrica, gerada pelo agente no local do consumo ou próximo de onde a energia será consumida. É um meio de produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras que utilizam fontes de energia renováveis, como energia solar fotovoltaica, por exemplo, energia eólica ou biomassa (ESCRICH, 2020). A produção fotovoltaica ocorre no Ambiente de Contratação Regulada, onde as unidades são conectadas à rede da distribuidora, que será a responsável por emitir desde os pareceres de acesso (permitindo que a Usina entre em operação), até os documentos de faturamento (que irão informar os créditos gerados pela usina) (ESCRICH, 2020).

No Brasil, a definição de GD é feita pelo Artigo 14º do Decreto Lei nº 5.163 de 2004.

Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004

Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências.

Art. 14. Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo aqueles tratados pelo art. 8º da Lei nº 9.074, de 1995, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento:

I - Hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e

II - Termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento, conforme regulação da ANEEL, a ser estabelecida até dezembro de 2004.

Parágrafo único. Os empreendimentos termelétricos que utilizem biomassa ou resíduos de processo como combustível não estarão limitados ao percentual de eficiência energética prevista no inciso II do caput.

Mais à frente, em 2012, foi criada a Resolução Normativa 482 que estabelece as condições regulatórias para a inserção da GD na matriz energética brasileira, apresentando as seguintes definições:

Microgeração distribuída: Sistemas de geração de energia renovável ou cogeração qualificada conectados à rede com potência de até 75 kW;

Minigeração Distribuída: Sistemas de geração de energia renovável ou cogeração qualificada conectados à rede com potência superior a 75 kW e inferior a 5 MW.

2.1.1 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico). A célula fotovoltaica é um dispositivo fabricado com material semicondutor que é a unidade fundamental desse processo de conversão.

Segundo Pinho *et al* (2014) são classificadas em três gerações as principais tecnologias aplicadas na produção de células e módulos fotovoltaicos. Sendo a primeira geração dividida em duas cadeias produtivas: Silício Policristalino (p-Si) e Silício Monocristalino (m-Si). As células de silício representam mais de 85% do mercado, por ser considerada uma tecnologia consolidada e confiável, e por possuir a melhor eficiência comercialmente disponível.

Comercialmente conhecida como filmes finos, a segunda geração é dividida em três cadeias produtivas: Silício Amorfo (a-Si), Disseleneto de cobre e índio (CIS) ou Disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e Telureto de cádmio (CdTe). Apresentam menor eficiência do que a primeira geração e têm uma modesta participação do mercado, competindo com a tecnologia c-Si (Silício cristalino). Alguns fatores que afetam sua utilização em grande escala são: disponibilidade dos materiais, rendimento das células, vida útil e a toxicidade do cádmio.

Por fim a terceira geração também é dividida em três cadeias produtivas, ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento que são: célula fotovoltaica multijunção e célula fotovoltaica para concentração (CPV – *Concentrated Photovoltaics*), células orgânicas ou poliméricas (OPV – *Organic Photovoltaics*) e células sensibilizadas por corante (DSSC – *Dye-Sensitized Solar Cell*).

A indústria solar fotovoltaica tem o desafio de desenvolvimento de acessórios e equipamentos complementares, com qualidade e durabilidade comparáveis às dos módulos fotovoltaicos de silício cristalino têm garantia de 25 anos em média.

2.1.2 Energia Solar Térmica

A energia solar é captada através de painéis solares térmicos, também chamados de coletores solares. São os sistemas mais simples, econômicos e conhecidos de aproveitar o sol, sendo utilizados em casas, hotéis e empresas para o aquecimento de água para chuveiros ou piscinas, aquecimentos de ambientes ou até em processos industriais. Os painéis são simples e têm a função de transferir o calor da radiação solar para a água ou óleo que passa por dentro deles para então ser utilizado como fonte de calor.

2.1.3 Energia Eólica

A Energia eólica é a transformação da energia do vento em energia útil. Exemplos:

- Aerogeradores: Para produzir eletricidade (a partir do século XIX);
- Moinhos de vento: Para produzir energia mecânica (moagem de grãos, bomba para irrigação, etc.) ou velas para impulsionar veleiros.

Até o século XIX, todos os moinhos de vento produziam somente energia mecânica. Com o advento da eletricidade, os engenheiros rapidamente perceberam que os moinhos de vento podiam ser usados como geradores elétricos e que a potência gerada poderia ser usada para iluminação e aquecimento Oliveira (2013).

2.1.4 Biomassa

Biocombustível: substância derivada de biomassa renovável, tal como biodiesel, etanol e outras substâncias estabelecidas em regulamento da ANP, que pode ser empregada diretamente ou mediante alterações em motores a combustão interna ou para outro tipo de geração de energia, podendo substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil Brasil (2020).

Biomassa (matéria orgânica) de origem vegetal ou compostos de origem animal. As fontes mais conhecidas são cana-de-açúcar, milho, soja, semente de girassol, madeira, resíduos. A partir dessas fontes é possível produzir biocombustíveis como etanol e biodiesel. Os gases gerados na queima do biocombustível são absorvidos no crescimento da safra seguinte, assim há um equilíbrio entre a emissão e a absorção de poluentes. Além disso, os biocombustíveis que contêm oxigênio em sua composição, ajudam a reduzir as emissões de monóxido de carbono (CO) quando adicionados aos combustíveis fósseis.

O cultivo da biomassa como fonte energética tem uma grande importância para a matriz energética, um fator é a sua sazonalidade, que contribui ao reforço da diversificação energética no país. O período de safra da biomassa é complementar ao período de baixa

capacidade hídrica das grandes hidrelétricas, nas quais o período seco (de maio a outubro) é compensado pelo período da safra da biomassa de cana, por exemplo.

2.1.5 Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH

As pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) são usinas hidrelétricas menores em tamanho e em potência, conforme classificação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) de 1997. A ANEEL estabelece todas as normas que regem as PCHs no Brasil.

Tais usinas usam a força e a pressão da água para gerar energia, devem ter entre 5 e 30 megawatts de potência (quantidade de energia gerada por hora de funcionamento com a usina operando com capacidade máxima) e menos de 13 km² em área total de reservatório.

2.2 VANTAGENS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA PARA O SETOR ELÉTRICO, PARA O CONSUMIDOR E PARA A SOCIEDADE

A GD traz inúmeros benefícios para o setor elétrico e para a sociedade. Além de reduzir a necessidade de linhas de transmissão e a sobrecarga do sistema elétrico, pois a geração está próxima a carga, também ameniza impactos ambientais e fortalece as fontes de energia renováveis, diversificando a matriz energética.

2.2.1 Redução na Conta de Energia do Usuário

Na GD existe a possibilidade de redução parcial dos custos do gasto energético. O consumidor torna-se mais independente da energia fornecida pela distribuidora e pode pagar apenas o custo mínimo obrigatório da fatura de energia, denominado de “Custo de Disponibilidade”, e que inclui as despesas para disponibilizar energia mesmo quando o consumidor não a utiliza.

2.2.2 Sistema de Compensação de Energia

Na GD quando a quantidade de energia gerada em determinado mês for superior à energia consumida naquele período, o consumidor fica com créditos que podem ser utilizados para diminuir a fatura dos meses seguintes. Esses créditos têm validade de 60 meses, e podem ser usados para abater o consumo de UCs do mesmo titular situadas em outro local, que sejam atendidos pela mesma distribuidora. Essa utilização dos créditos é denominada “autoconsumo remoto”.

2.2.3 Redução das Perdas

A GD está mais próxima da carga; portanto, temos redução das perdas. As perdas Joule são diretamente proporcionais ao comprimento dos cabos e inversamente proporcionais à área da seção reta dos mesmos.

2.2.4 Redução dos Impactos Ambientais

As GD do tipo solar (fotovoltaica e térmica), eólica, biomassa, PCH são renováveis, pois, ao contrário dos combustíveis fósseis (petróleo, carvão mineral, gás), podem gerar energia indefinidamente. Não emitem gases poluentes, não alagam grandes áreas como nas grandes centrais hidrelétricas e não necessitam da construção de longas linhas de transmissão.

2.3 DESVANTAGENS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA PARA O SISTEMA ELÉTRICO

A inserção da GD no sistema elétrico principal modifica os parâmetros que já estavam estabelecidos e modelados para os procedimentos de operação e manutenção da rede convencional.

Em horários de baixa carga e alta geração pode ocorrer o surgimento de fluxo reverso da potência produzido pela inserção da geração próxima à região de carga. Deve-se considerar o eventual aumento na dificuldade de controle de frequência e da tensão da rede produzida pelos novos geradores que não são despachados pelos operadores na região de carga e GD.

2.3.1 Flutuação da Geração

No caso da GD em que a potência disponibilizada pelas fontes de energia pode ser afetada por variações de maior amplitude relativa, como no caso das fontes eólicas e fotovoltaicas, a intermitência da geração em relação a energia demandada pode causar alterações na tensão e na frequência relativamente maiores, mesmo que por um curto período de tempo, afetando o sistema elétrico principal e, principalmente, os consumidores, estejam eles conectados direta ou indiretamente à geração referida.

2.3.2 Distorções Harmônicas

Com a expansão dos sistemas de GD, especialmente a fotovoltaica e a eólica que se utilizam de inversores, ocorre um aumento no número de conversores que são fontes de alimentação chaveadas e, conseqüentemente, um aumento no conteúdo harmônico injetado no sistema elétrico.

Segundo Naruto (2017), a presença de distorções harmônicas compromete a qualidade da energia e pode provocar diversos impactos negativos como o aparecimento de tensões ressonantes, vibrações em máquinas rotativas ocasionando desgaste, superaquecimento, perda de rendimento e da vida útil, erros na medição das grandezas elétricas e inadequação do sistema de proteção, além dos distúrbios de compatibilidade eletromagnética, superaquecimento dos bancos de capacitores devido aos efeitos de ressonância, sobrecarga nos condutores de neutro e danos em equipamentos conectados fase-neutro.

2.3.3 Fluxo de Potência Reverso

O sistema elétrico convencional foi projetado e implementado para um fluxo de potência unidirecional proveniente das grandes usinas de geração, passando pelos sistemas de transmissão e pela rede de distribuição que é, então, enraizado para os centros de consumo por meio das subestações. Por toda a extensão desse complexo sistema elétrico, existe um conjunto de proteções dimensionado, coordenado e redundante a fim de garantir a segurança elétrica da rede e assegurar a confiabilidade e estabilidade do sistema no fornecimento de energia de qualidade aos centros de carga conectados Naruto (2017).

Entretanto, a interligação de outros sistemas de geração próximos aos consumidores e de maneira cada vez mais expansiva pode acarretar fluxos de potência em direções contrárias às projetadas para os sistemas de proteção usual, interferindo na sua funcionalidade e colocando em riscos os equipamentos conectados à rede e os atendidos nos próprios centros consumidores Naruto (2017).

2.4 DEFICIÊNCIAS DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO QUE IMPACTAM DIRETAMENTE NO FUNCIONAMENTO DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA

Segundo Junior (2010) a falta de atendimento a certos parâmetros de qualidade da energia no ponto de conexão de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFGRs) pode levar o inversor a rejeitar a rede elétrica, impedindo a geração de energia pelo sistema fotovoltaico.

Distúrbios são uma série de fenômenos que afetam a qualidade da energia elétrica, que vão desde problemas na continuidade do fornecimento; níveis de tensão; oscilações de tensão e de frequência e distorções harmônicas na tensão e na corrente.

2.4.1 Afundamento de Tensão ou Subtensão

Em redes rurais ou nas redes residenciais que ficam mais afastadas dos transformadores de distribuição “Fins de rede”, a tensão fica mais de 5% abaixo do valor nominal e em alguns casos ocorrem afundamentos na tensão quando cargas pesadas entram em operação e fazem os inversores se desconectarem da rede se o nível de tensão ficar abaixo do limite que está configurado em seus parâmetros, mesmo que seja por um curto período de tempo.

2.4.2 Elevação de Tensão ou Sobretensão

A sobretensão pode ser transitória ou permanente e trata-se de uma elevação brusca na tensão do sistema elétrico, que ultrapassa os limites mencionados na resolução nº 395, da ANEEL, que regula os parâmetros de fornecimento de energia e diz que para tensões nominais de 220/127 V a tensão de leitura para estar adequada deve estar entre 202 e 231 V, e entre 117 e 133 V. O primeiro tipo é de curta duração (da ordem de microssegundos) e pode ser provocado por descargas atmosféricas ou por manobras na rede. Já a sobretensão permanente é de longa duração e consequência de grandes manobras e avarias na rede de distribuição por conta de queda de árvores, ventanias e outros Prodist (2021).

Os inversores se desconectam da rede se a tensão estiver maior do que o limite estabelecido em seus parâmetros, isso acontece geralmente em locais próximos aos transformadores de distribuição, instalação com cabos mal dimensionados para a potência do sistema, grandes sistemas de geração fotovoltaica, potência de geração muito maior que a carga.

2.4.3 Distorções Harmônicas

Distorção harmônica é um fenômeno gerado por dispositivos não lineares. Isto significa que variam a relação entre sua corrente e sua tensão por conta da variação irregular das diferentes reatâncias, tanto capacitivas, quanto indutivas de um circuito. Este fenômeno permite que harmônicos das frequências fundamentais, existentes nos sinais de entrada dos dispositivos, sejam criados dentro do próprio circuito.

As instalações com alta potência de curto-circuito, por possuírem baixa impedância, apresentam baixa Distorção Harmônica Total da tensão elétrica (THDv) (JUNIOR, 2010). Porém, se houver a presença de muitas cargas não lineares, a Distorção Harmônica Total da corrente elétrica (THDi) será elevada, podendo inclusive impedir a conexão dos inversores, sendo que os mesmos rejeitam a rede elétrica, acusando falha no lado de corrente alternada (CA).

3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Neste capítulo são apresentados conceitos introdutórios sobre energia solar fotovoltaica: os sistemas fotovoltaicos *on-grid*, *off-grid* e híbridos, seus componentes e os fatores que influenciam na intermitência da GSF.

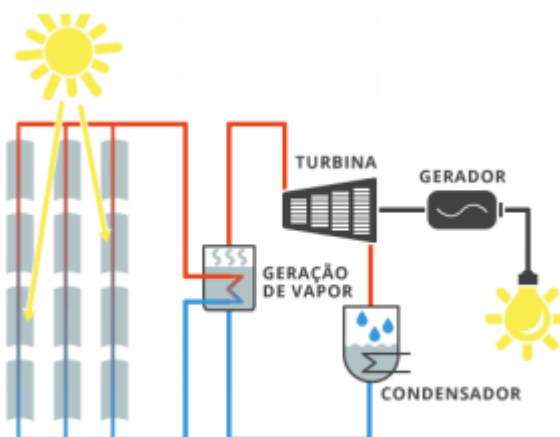
3.1 CONCEITOS SOBRE ENERGIA SOLAR

O sol é a principal fonte de energia para a terra. Além de ser responsável pela manutenção da vida no planeta, a radiação solar é uma fonte energética praticamente inesgotável, com grande potencial de sua utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia, como a térmica e a elétrica.

Do ponto de vista energético o Brasil possui características naturais favoráveis para a geração de energia solar fotovoltaica, por possuir alto nível de insolação, possuindo assim durante o ano todo grande aproveitamento de radiação solar (FARRET, 2010). O sistema fotovoltaico converte a radiação solar em energia elétrica utilizando um conjunto de equipamentos para captura e absorção dos fótons. A luz solar incide sobre uma célula fotovoltaica e a energia dos fótons da luz é transferida para os elétrons que, então, ganham a capacidade de se movimentar, que por sua vez, geram a corrente elétrica (ALMEIDA *et al.*, 2017).

A geração de energia heliotérmica acontece de forma indireta. Nesse processo são usados espelhos para refletir a luz solar concentrando-a em um único ponto. Primeiramente o calor captado aquece um fluido que passa pelo receptor (componente que recebe a radiação solar). Este fluido armazena o calor e aquece a água dentro da usina heliotérmica gerando vapor. O vapor gerado movimenta uma turbina e aciona um gerador, produzindo assim a energia elétrica, conforme a ilustração da Figura 1.

Figura 1: Ilustração de uma Usina Heliotérmica.



Fonte: Plataforma *online* de Energia Heliotérmica (2016).

3.1.1 Radiação Solar

Uma das possíveis formas de conversão da energia solar é conseguida através do efeito fotovoltaico que ocorre em dispositivos conhecidos como células fotovoltaicas. Essas células são componentes optoeletrônicos que convertem diretamente a radiação solar em eletricidade. São basicamente constituídas de materiais semicondutores, sendo o silício o material mais empregado Pinho *et al.* (2014).

3.1.2 Irradiância

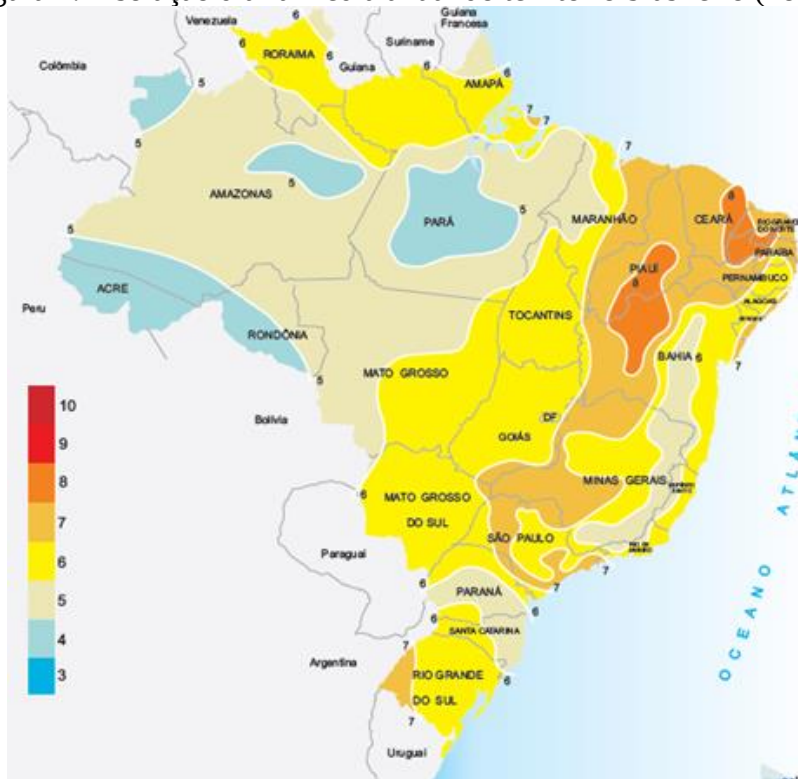
Segundo Pinho *et al.* (2014), a irradiância solar medida acima da atmosfera da Terra é da ordem de $1,3 \text{ kW/m}^2$. A atmosfera age como um filtro (parte dessa radiação é refletida, parte é absorvida), e assim a quantidade de radiação que efetivamente chega ao solo é menor. A intensidade da radiação incidente direta depende da localização, a média fica em torno de 1.000 W/m^2 . Este é o valor utilizado nos testes de módulos fotovoltaicos.

3.1.3 Insolação

A insolação é expressa em Wh/m^2 e corresponde a energia solar que incide em uma área em um determinado intervalo de tempo. De uma forma geral, a insolação é a densidade de energia por área. Os dados da insolação podem ser obtidos a partir de mapas solarimétricos por exemplo. A insolação de um local é diferente em cada mês do ano. É influenciada pelas mudanças climáticas, ocorrências de chuvas e presença de mais ou menos nuvens no céu.

O mapa de insolação conforme Figura 2 é fundamental no dimensionamento de plantas fotovoltaicas, pois mostra o tempo médio de insolação diária em uma determinada área.

Figura 2: Insolação diária média anual do território brasileiro (horas).



Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil (2000).

Analisando o Atlas da Figura 2 vemos que a média anual da insolação no território brasileiro oferece uma boa uniformidade, com valores de irradiância muito maiores do que os países que fazem o uso de sistemas fotovoltaicos em grande escala, como no caso a Alemanha, por exemplo.

3.1.4 Massa de Ar

As características da radiação solar dependem da espessura e da composição da camada de ar. A massa de ar conhecida por AM (*Air Mass*) é considerada AM 1,5 tornando padrão para o estudo e a análise dos sistemas fotovoltaicos.

3.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Na figura 3 segundo o BEN 2021 ano-base 2020 podemos analisar o quanto a Micro e Minigeração Distribuídas cresceram nos últimos anos, principalmente a fonte solar fotovoltaica com 90,4% de participação na GD em 2020. De 2019 para 2020 houve 137% de aumento na geração de energia elétrica com as GDs.

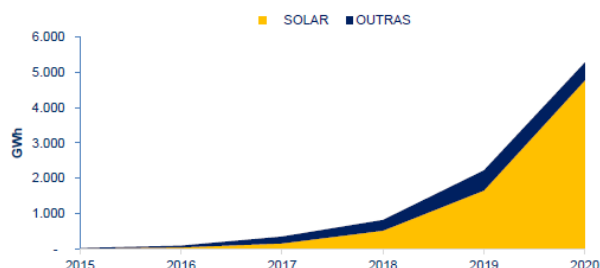
Figura 3: Aumento na Geração Distribuída.

BEN 2021 | Micro e Minigeração Distribuídas¹

Geração total em GWh:

2015	2016	2017	2018	2019	2020
35	104	359	828	2.226	5.269

Destaque para a fonte solar fotovoltaica, com **4.764GWh** e **4.635 MW** de geração e potência instalada respectivamente.



¹ Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012

² Inclui biogás proveniente de resíduos agrícolas e urbanos, casca de arroz, gás de alto-forno (biomassa) e resíduos florestais.

49

BEN 2021 | Relatório Síntese | ano base 2020

MINISTÉRIO
DE ENERGIA

PÁTRIA AMADA
BRASIL

epe

Fonte: (<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>).

Dessa forma, trataremos neste trabalho especialmente a GD do tipo solar fotovoltaica.

A expansão da GSF em sistemas de GD ocorreu devido a diversos fatores como os incentivos governamentais, a disseminação da tecnologia da célula fotovoltaica e consequentemente, a diminuição do preço dos equipamentos do sistema fotovoltaico, além da maior facilidade para a emissão de certificações ambientais necessárias às obras de geração, além do baixo custo operacional e de manutenção e, devido a sua característica modular que permite uma instalação gradual e simples.

A Figura 4 apresenta o detalhe de uma célula de silício monocristalino e de uma célula de silício policristalino, respectivamente.

Figura 4: Célula de silício monocristalino e de silício policristalino.



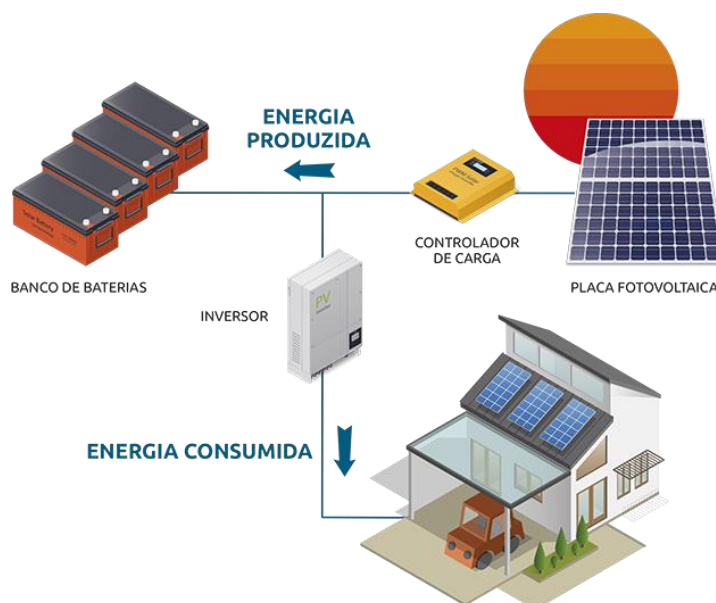
Fonte: (SOUZA, 2018).

São nítidas as diferenças estruturais entre esses dois tipos de fabricação. Na célula composta pelo silício monocristalino, temos um único cristal de silício e na célula composta pelo silício policristalino, temos diversos cristais fundidos e solidificados para dar origem a uma única célula. Como a célula de silício monocristalino tem um grau de pureza maior, sua eficiência em comparação à célula de silício policristalino também é maior, porém com um custo de fabricação mais elevado.

Os sistemas fotovoltaicos são classificados pela forma da aplicação da energia gerada: sistemas conectados à rede de distribuição elétrica (*on-grid*), sistemas isolados (*off-grid*) e sistemas híbridos (SILVA, 2014).

O sistema isolado (*off-grid*) é caracterizado por não ter conexão à rede elétrica da distribuidora. Nesse caso, a energia gerada é utilizada para a alimentação de equipamentos elétricos ou para armazenamento em baterias. Nesse caso, pode-se utilizar a energia armazenada durante o período em que o sistema não está gerando energia elétrica. Algumas vantagens desse tipo de sistema são: uso da energia em locais remotos ou sem rede de distribuição disponível e a independência energética, já que as falhas de energia na rede de serviços públicos, em teoria, não afetam os sistemas solares fora da rede (GUIMARÃES, 2015).

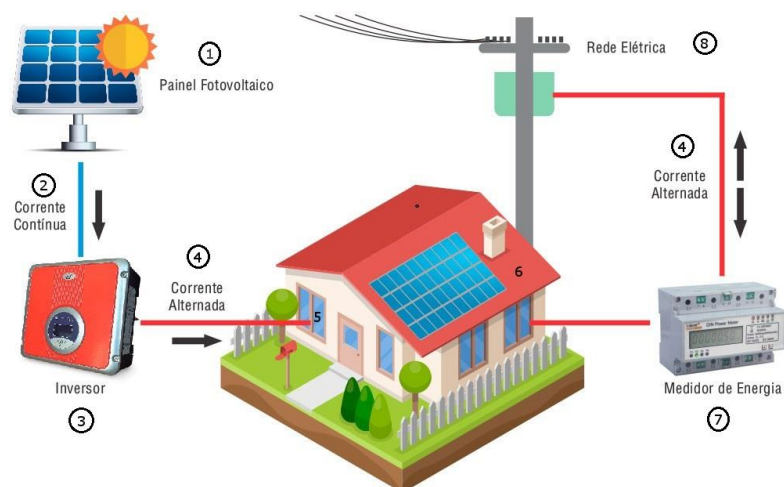
Figura 5: Ilustração sistema fotovoltaico *off-grid*.



Fonte: ECOAQUECEDORES (2021)

O sistema do tipo *on-grid* é interligado à rede elétrica de distribuição (TAVARES et al, 2012) operando em paralelo com ela. A energia gerada pelos módulos fotovoltaicos passa pelo inversor, que faz a conversão da corrente contínua em corrente alternada com parâmetros definidos e necessários para atender as condições impostas pela rede elétrica de distribuição (NOGUEIRA, 2016). As vantagens desse tipo de sistema são: Menor custo em comparação com o sistema *off-grid*, energia não consumida no local é exportada para a rede e gera créditos. Desvantagens: para de funcionar se a rede de energia da concessionária desligar.

Figura 6: Ilustração sistema fotovoltaico *on-grid*.



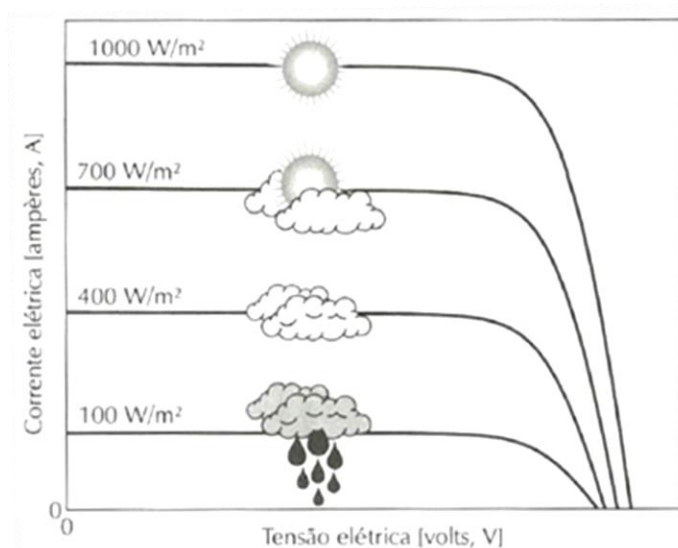
Fonte: ECOAQUECEDORES (2021).

3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA INTERMITÊNCIA DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA

3.3.1 Influência da Radiação Solar

A corrente de um módulo fotovoltaico é diretamente proporcional à radiação solar incidente sobre as células fotovoltaicas. Com uma irradiância de 1000 W/m^2 e temperatura de 25°C , padrões de ensaio em laboratório o módulo fornece a corrente máxima disponível na placa do fabricante, e ela vai diminuindo conforme as condições do tempo interferem na radiação solar que chega até o módulo fotovoltaico. Isso é mostrado na Figura 7.

Figura 7: Influência da radiação solar no comportamento do módulo fotovoltaico.

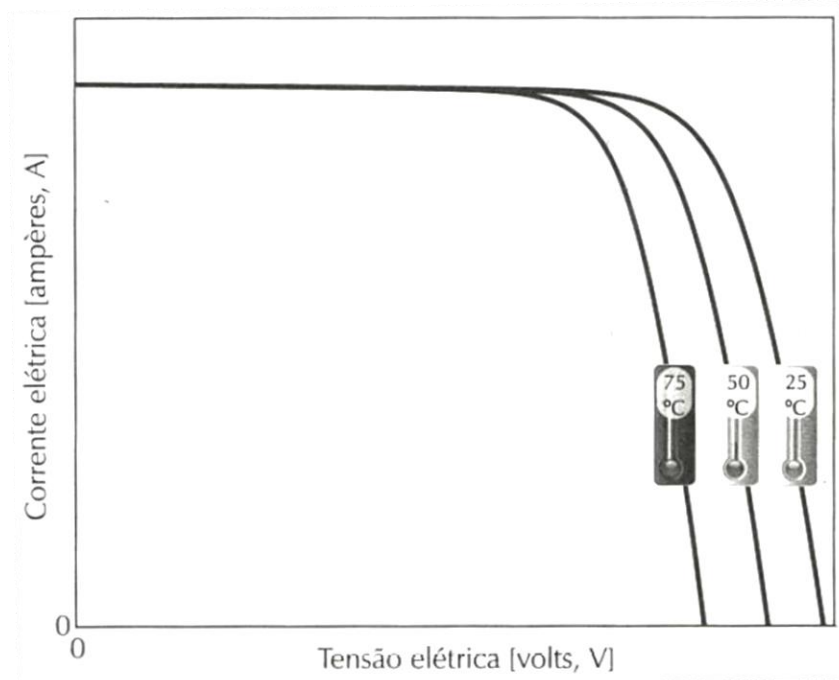


Fonte: (VILLALVA, 2015, p. 77).

3.3.2 Influência da Temperatura

A temperatura da célula é inversamente proporcional à tensão de saída do módulo fotovoltaico, não alterando consideravelmente a corrente fornecida pelo módulo (VILLALVA, 2015, p. 77).

Figura 8: – Influência da temperatura no módulo fotovoltaico.



Fonte: (VILLALVA, 2015, p. 78).

3.3.3 Efeito de Sombreamento

Os sistemas de energia solar fotovoltaica geram eletricidade em função da radiação solar que incide sobre os módulos. O sombreamento pode ser causado, por edificações, árvores, vegetação e até mesmo por outros módulos que foram mal dimensionados.

Quando alguma célula do módulo fotovoltaico se encontra sombreada, ocorrem perdas elevadas na geração de energia, devido ao tipo de ligação. Para minimizar esse efeito de sombreamento, a maioria dos módulos possuem diodos de desvio que é o diodo *by-pass*, servindo como um caminho alternativo para a corrente elétrica “escapar” da célula defeituosa, não limitando a potência dos módulos ligados em série.

Figura 9: Caixa de conexões com diodos by-pass.



Fonte: (PINHO, 2014, p. 155).

4 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Este trabalho pretende avaliar o impacto da qualidade da energia deficitária sobre o mau funcionamento dos sistemas solares fotovoltaicos. Portanto, neste capítulo será tratado sobre a qualidade da energia elétrica com a descrição dos principais indicadores de qualidade da energia elétrica.

4.1 INTRODUÇÃO

A qualidade de energia elétrica (QEE) é uma característica de um sistema elétrico que se apresenta isento ou com número restrito de distúrbios manifestados através de desvios de tensão, em sua forma de onda, amplitude, frequência ou fase angular, que poderiam ocasionar em falha ou operação inadequada de um equipamento consumidor.

4.2 PRODIST

Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) são documentos elaborados pela ANEEL, em conjunto com os agentes de distribuição e de outras associações e entidades do Setor Elétrico Nacional. Eles normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica, estabelecendo os procedimentos relativos à qualidade da energia, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado.

4.3 QUALIDADE DO PRODUTO

A qualidade do produto se refere à conformidade de tensão em regime permanente e as perturbações na forma de onda de tensão. Destacam-se nesse quesito os indicadores coletivos Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária Equivalente (DRPE) e Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica Equivalente (DRCE), obtidos a partir da campanha de medição amostral instituída pela ANEEL.

4.3.1 Indicadores de Conformidade do Nível de Tensão em Regime Permanente

Os indicadores de tensão em regime permanente são apurados trimestralmente, a partir de medições amostrais realizadas pelas distribuidoras em UCs sorteadas dentro de sua área de concessão ou permissão. Para cada UC, durante uma semana a tensão é medida, e são

apurados os indicadores duração relativa da transgressão de tensão precária (DRP) e duração relativa da transgressão de tensão crítica (DRC), que expressam o percentual do tempo no qual a UC permaneceu com tensão precária e com tensão crítica.

A ANEEL estabelece limites para os indicadores de tensão em regime permanente: 3% para o DRP e 0,5% para o DRC.

Na Tabela 1 são apresentadas as faixas de variação da tensão de leitura para tensões adequadas, precárias e críticas.

Tabela 1 – Tensão de Atendimento e Variação da Tensão de Leitura. (220/127 V)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) / (110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$

Fonte: Adaptado de PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica (2021).

4.4 QUALIDADE DO SERVIÇO

A qualidade dos serviços prestados compreende a avaliação das interrupções no fornecimento de energia elétrica.

4.4.1 Indicadores Coletivos de Continuidade

Visando manter a qualidade na prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica, a ANEEL exige que as distribuidoras mantenham um padrão de continuidade e, para tal, edita limites para os indicadores coletivos de continuidade Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) Aneel (2021).

Os indicadores são apurados pelas distribuidoras e enviados periodicamente para a ANEEL para verificação da continuidade do serviço prestado, representando, respectivamente, o tempo e o número de vezes que uma UC ficou sem energia elétrica para o período considerado (mês, trimestre ou ano), o que permite que a Agência avalie a continuidade da energia oferecida à população.

4.4.2 Indicadores Individuais de Continuidade

Da mesma forma, também são acompanhados os indicadores individuais de continuidade, DIC, FIC, DMIC e DICRI, que apuram a qualidade do serviço em cada UC:

- Duração de interrupção individual por unidade consumidora (DIC): Intervalo de tempo que, no período de apuração, em cada unidade consumidora ou ponto de conexão, ocorreu descontinuidade da distribuição de energia elétrica;
- Frequência de interrupção individual por unidade consumidora (FIC): Número de interrupções ocorridas, no período de apuração, em cada unidade consumidora ou ponto de conexão;
- Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou ponto de conexão (DMIC): Tempo máximo de interrupção contínua de energia elétrica, em uma unidade consumidora ou ponto de conexão; e
- Duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão (DICRI): Corresponde à duração de cada interrupção ocorrida em dia crítico, para cada unidade consumidora ou ponto de conexão.

5 ANÁLISE DOS IMPACTOS DA QUALIDADE DE ENERGIA DEFICITÁRIA SOBRE OS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS

Neste capítulo é feita uma análise em detalhes a respeito de sistemas fotovoltaicos reais que apresentaram mau funcionamento devido à qualidade da energia elétrica deficitária. A maioria dos estudos avaliam o impacto na rede elétrica da inserção massiva da GSF. No entanto, nesse estudo avalia-se também o sentido contrário, ou seja, a importância do atendimento aos indicadores de qualidade de energia elétrica para o funcionamento adequado dos sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede.

Neste capítulo analisam-se problemas reais de sistemas fotovoltaicos instalados em UCs residenciais e comerciais do distrito de Primavera, Rosana, SP.

5.1 INTRODUÇÃO

Dentre os sistemas de GSF que foram instalados durante estágio e trabalho, alguns casos demandam uma análise adicional devido às desconexões dos inversores com a rede de energia da concessionária, em todos os casos os inversores eram trifásicos e com potência igual ou superior à 10 kW, todos da marca Fronius, empresa de origem austríaca com 75 anos de mercado e 29 anos que fabricou seu primeiro inversor fotovoltaico conectado à rede o “Sunrise”. No anexo A segue catálogo com os inversores Fronius.

5.2 DESCRIÇÃO DAS INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS

Os dois sistemas fotovoltaicos analisados neste trabalho estão alocados em UCs próximas e localizadas em Primavera distrito de Rosana, SP. Um sistema é de uma unidade comercial que é a sede de uma entidade do município com 45 kW de inversores e o outro trata-se de uma residência de grande porte com potência instalada de 28 kW. A figura 10 mostra a imagem de satélite das duas instalações. O círculo azul, o sistema da entidade e o vermelho, o sistema da residência.

Figura 10: Local das Instalações no Distrito de Primavera.



Fonte: (Google Maps).

Na entidade estão instalados três sistemas idênticos com inversores Fronius modelo SYMO de 15 kW cada. Esse modelo de 15 kW possui um rastreador de ponto máximo de potência, ou seja, todos os módulos fotovoltaicos conectados a ele devem estar posicionados com o mesmo sentido e inclinação para ter melhor eficiência.

Eles são 220 V trifásico e tem a opção de conectar o neutro. Segundo o manual o modelo 380 V é obrigatório o uso do neutro, já nesse 220 V o uso do neutro é opcional. No nosso caso, a princípio utilizamos o neutro nos inversores da entidade e nos dois inversores da residência.

Na parte CA e CC dos sistemas da entidade e da residência foram utilizados cabos de 6 mm² de bitola, com isolamento de 1 kV, proteção UV e temperatura operacional de 120° C. Disjuntor tripolar de 50 A para cada inversor da entidade e dispositivo de proteção contra surto (DPS).

O quadro CC dos sistemas da entidade recebe os cabos positivo e negativo dos arranjos dos módulos que são três *strings* com 18 módulos ligados em série para cada inversor, tensão de 685,8 V (38,1 V por módulo) passando pelos fusíveis, seccionadora CC e pelo DPS Solar. Neste quadro as três *strings* são ligadas em paralelo, com corrente total de 26,37 A (8,79 A por *string*) e por fim conectadas no inversor.

Figura 11: Vista dos inversores da entidade.



Fonte: Elaboração do próprio autor (2021).

Os módulos fotovoltaicos são da marca BYD feitos de silício policristalino com 335 Wp cada e com um total de 162 módulos, sendo 54 módulos para cada inversor. Com 18,09 kWp para cada inversor e um total de 54,27 kWp. Todos os módulos estão voltados para o norte, o mais adequado para a GSF durante o ano no hemisfério sul.

Figura 12: Disposição dos Módulos Fotovoltaicos da entidade



Fonte: Elaboração do próprio autor (2021).

Figura 13: Vista frontal dos módulos fotovoltaicos da entidade.



Fonte: Elaboração do próprio autor (2021).

Na residência estão instalados três sistemas diferentes conectados na mesma UC: são duas casas no mesmo terreno e endereço. Contém inversores Fronius, dois modelos SYMO de 10 kW e 12 kW com tensão de 220 V trifásico e um modelo PRIMO de 6 kW, 220 V monofásico que está na residência menor.

Os modelos trifásicos foram conectados com o neutro também no princípio. Os módulos estão dispostos nas direções norte, leste e oeste. Os modelos SYMO de 10 e 12 kW possuem 2 MPPTs, dessa maneira tivemos 4 MPPTs para melhor distribuir a conexão dos arranjos de acordo com a quantidade de telhado disponível para a instalação dos módulos em cada orientação, para o norte, leste e oeste. Na residência maior são 88 módulos fotovoltaicos de silício policristalino de 335 Wp também da marca BYD sendo 28 direcionados para o oeste, 20 para o norte e 40 para o leste.

Os módulos para o oeste e norte estão conectados no inversor de 12 kW e os orientados para o leste no inversor de 10 kW. Na casa menor são 20 módulos, 12 orientados para o norte e 8 para o leste. O inversor PRIMO de 6 kW também possui 2 MPPTs.

Nesta instalação com um total de 108 módulos poderia utilizar somente 2 inversores de 15 kW, porém teria disponível somente 2 MPPTs contra os 6 disponíveis nessa configuração de 3 inversores de diferentes potências, o que resultou num melhor aproveitamento dos telhados disponíveis.

Figura 14: Vista lateral dos módulos da residência (telhado oeste).



Fonte: Elaboração do próprio autor (2021).

Figura 15: Vista frontal dos módulos da residência (telhado leste e oeste).



Fonte: Elaboração do próprio autor (2021).

Figura 16: Vista dos módulos da residência (telhado leste e oeste ao fundo e norte à frente).



Fonte: Elaboração do próprio autor (2021).

Figura 17: Vista dos módulos da residência de cima (telhado norte).



Fonte: Elaboração do próprio autor (2021).

Figura 18: Vista de um dos inversores da residência.



Fonte: Elaboração do próprio autor (2021).

5.3 DESCRIÇÃO DAS INTERRUPÇÕES NA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA

Quando o sistema da entidade entrou em operação estava gerando normalmente, sem desconexões com a rede elétrica e sem redução da potência pelos inversores. A rede secundária de distribuição estava absorvendo a geração total da entidade que chegou a ficar com a potência máxima em todos os inversores (45 kW) dependendo do dia no verão.

Quando o sistema da residência entrou em operação, durante os dias de sol pleno, e em dias que a rede não tinha muita carga, começou a ocorrer a desconexão dos inversores tanto da residência como os da entidade, acusando alta tensão no lado da rede CA. Ora em uma fase, ora em outra e o problema se estendeu por dias.

Foram alterados os parâmetros de tensão, dos inversores a fim de tentar sanar o problema, mas não adiantou, pois, a tensão chegava a passar o limite de 139,7 V novamente, e assim ocorriam novamente os desligamentos e redução de potência de saída.

Foram feitas leituras de tensão localmente nos inversores e remotamente pelo SOLAR.WEB a plataforma de monitoramento dos inversores da Fronius.

A figura 19 apresenta a tensão de fase de um dos inversores da entidade no dia 4 de janeiro de 2021.

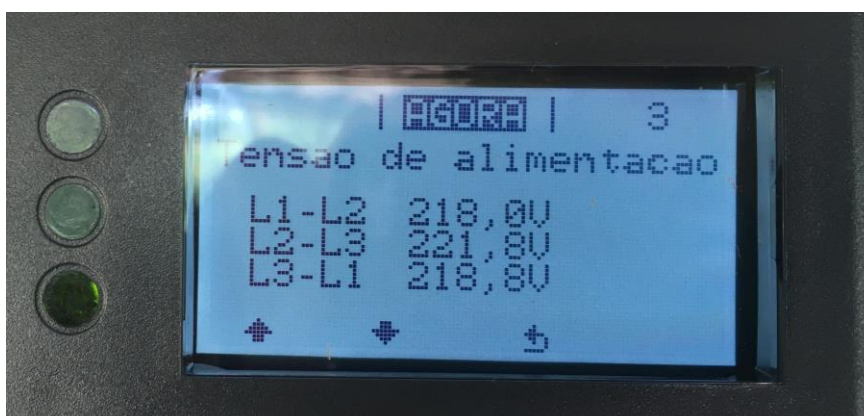
Figura 19: Tensão de fase no inversor 3 da entidade.



Fonte: Elaboração do próprio autor (2021).

Nota-se uma grande diferença entre as tensões em cada fase onde a nominal é 127 V, já a tensão de linha (220 V nominal) como mostra a figura 20, essa diferença é bem menor.

Figura 20: Tensão de linha no inversor 3 da entidade.



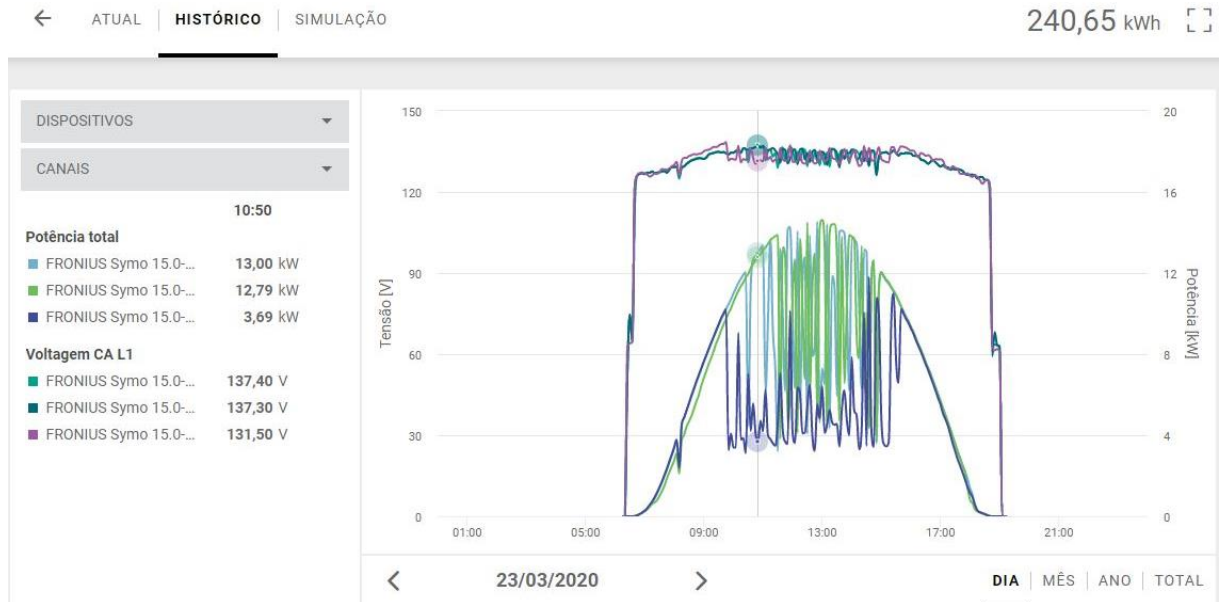
Fonte: Elaboração do próprio autor (2021).

Na plataforma de monitoramento do SOLAR.WEB podemos analisar melhor o comportamento dos sistemas durante um dia a partir dos gráficos que ele disponibiliza. São apresentados neste estudo os gráficos de Potência total e da Tensão CA em uma das fases.

Foram selecionadas as datas de 23 de março de 2020 e 23 de março de 2021. Nessas datas nos dois anos o céu estava limpo e a energia gerada era para ser a mesma ou bem próxima,

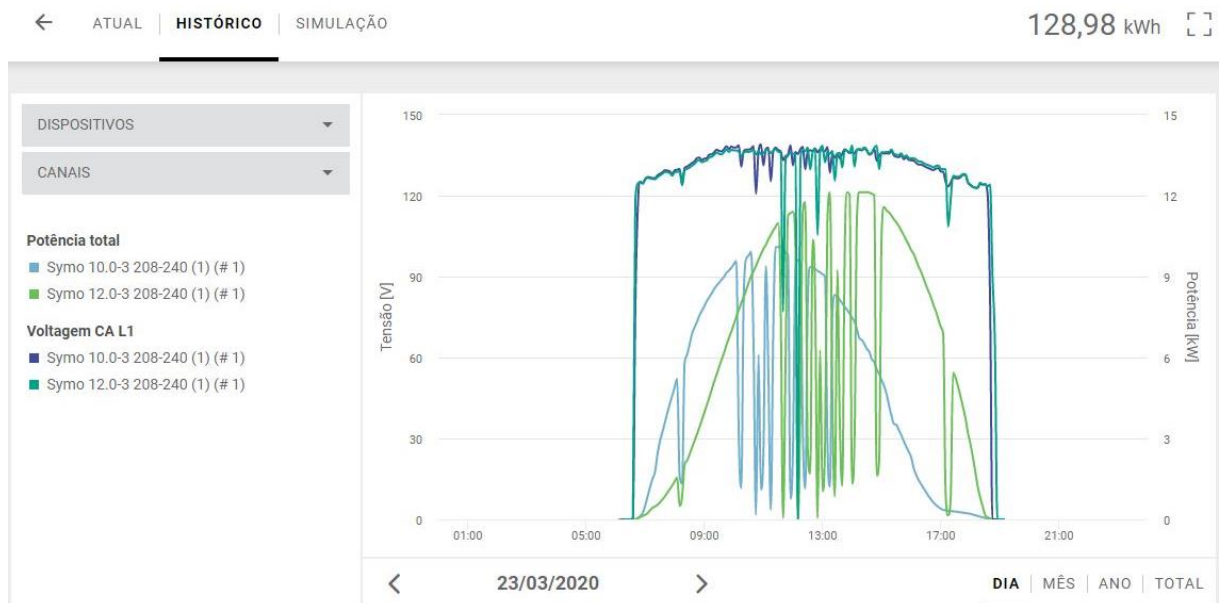
porém no ano de 2020 ocorriam os problemas de desligamento e redução na potência. No ano de 2021 os problemas estavam corrigidos.

Figura 21: Sistema da entidade 2020.



Fonte: (Monitoramento Fronius Solar Web, 2020).

Figura 22: Sistema da residência 2020.



Fonte: (Monitoramento Fronius Solar Web, 2020).

A curva de potência assemelha-se a uma parábola, com vários “buracos” ao longo do dia. Nos horários que teriam as maiores potências de geração os inversores se desconectavam

ou reduziam sua potência, devido aos picos de tensão na rede por causa da alta potência sendo injetada nela pelos dois sistemas de GD.

Nos dois inversores trifásicos da residência as desconexões eram com maior frequência. As duas curvas de potência são com os picos em horários diferentes devido ao sentido dos módulos fotovoltaicos que estão conectados a eles. Inversor de 10 kW leste com pico de geração ao meio dia, e inversor de 12 kW norte e oeste com pico de geração a partir das 13h. O gráfico de geração do inversor de 6 kW 220 V bifásico, não foi inserido devido ao fato de não ter ocorrido esses problemas nele.

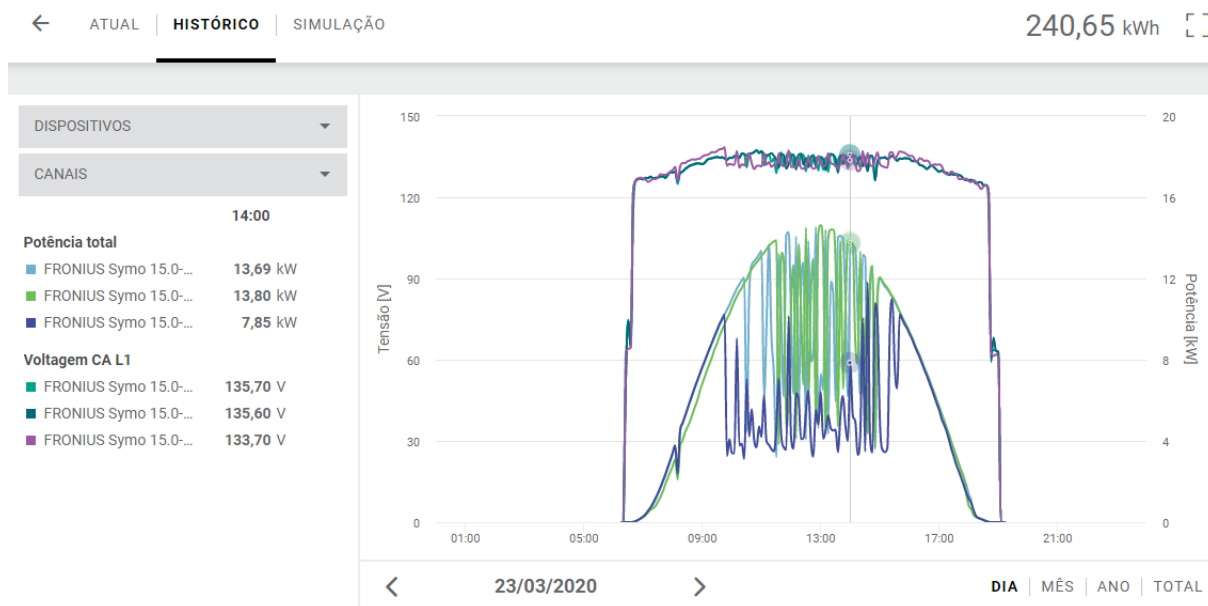
As figuras 23 e 24 apresentam os horários que ocorreram os picos de potência dos sistemas no dia. Na entidade o pico foi de 35,34 kW às 14h, ainda dentro do normal seria do meio dia às 13h o pico de potência, mas nesse horário foi onde mais ocorreram as desconexões. No sistema da residência o pico de potência foi de 20,96 kW às 11h25m, e após esse horário ocorreu a maior frequência de desconexões.

A tensão de fase estava em torno dos 135 V, ainda dentro dos limites do inversor, porém os dados do gráfico possuem um intervalo de 5 minutos a cada medição, nesse período a tensão passava do limite mesmo se fosse por alguns segundos e o inversor já se desconectava e quando ele gravava a outra medição o inversor já tinha se conectado e estava voltando a subir sua potência.

A produção de energia durante o dia na entidade com as desconexões foi de 240,65 kWh, na residência a produção foi de 128,98 kWh. Essa quantidade de energia pode ser maior sem essas várias desconexões dos inversores com a rede. A solução para esse problema será detalhada na próxima seção.

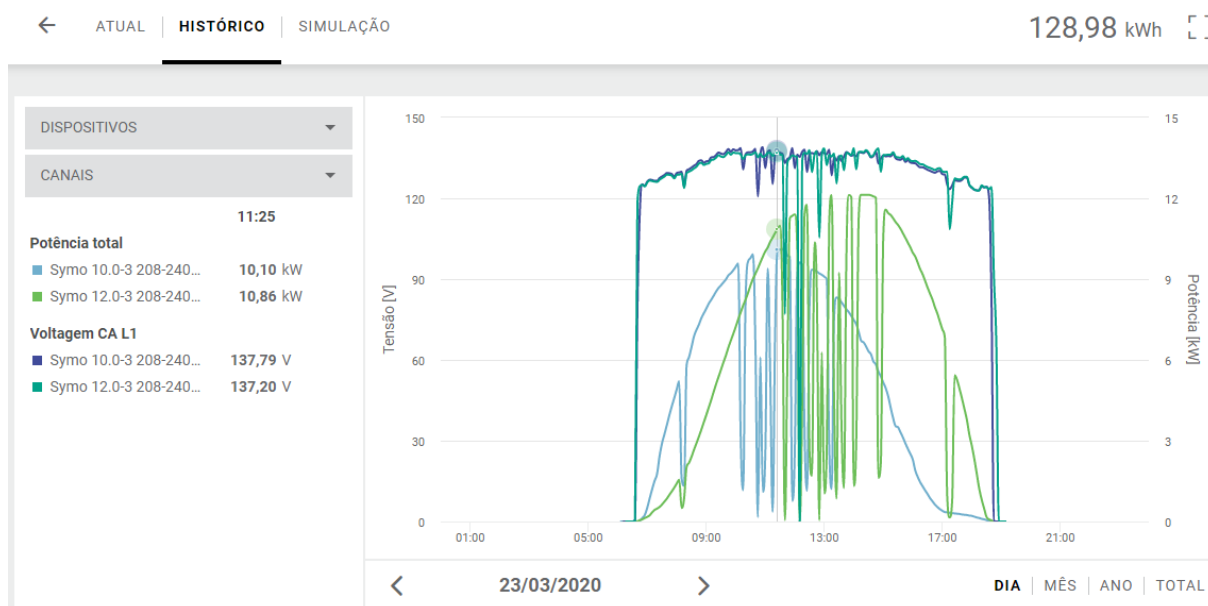
Esses problemas ocorreram devido à potência instalada dos sistemas fotovoltaicos das duas UCs próximas serem elevadas para a rede local de distribuição, por não ter carga local consumindo toda essa energia gerada.

Figura 23: Sistema da entidade no pico de potência no dia.



Fonte: (Monitoramento Fronius Solar Web, 2020).

Figura 24: Sistema da residência pico de potência no dia.



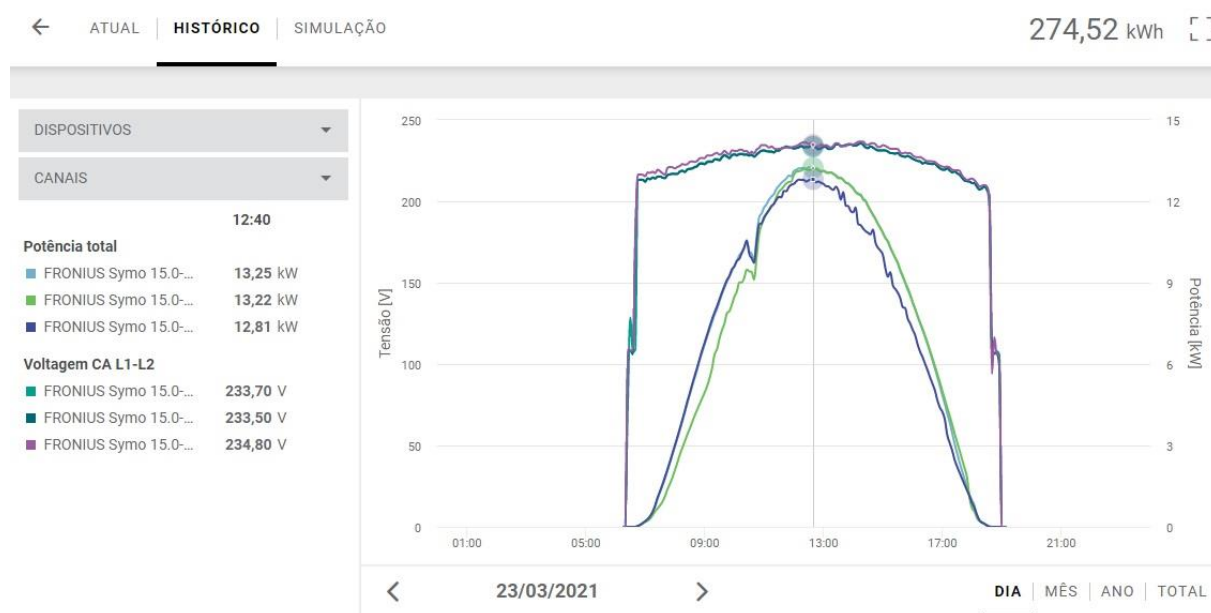
Fonte: (Monitoramento Fronius Solar Web, 2020).

5.4 SOLUÇÃO DOS PROBLEMAS DE DESCONEXÕES

Após alguns meses realizando testes, entrando em contato com o suporte técnico da Fronius, alterando alguns parâmetros avançados da rede como aumentar o limite do tempo que a tensão fica acima da tensão máxima do inversor que em outros sistemas, esses são os

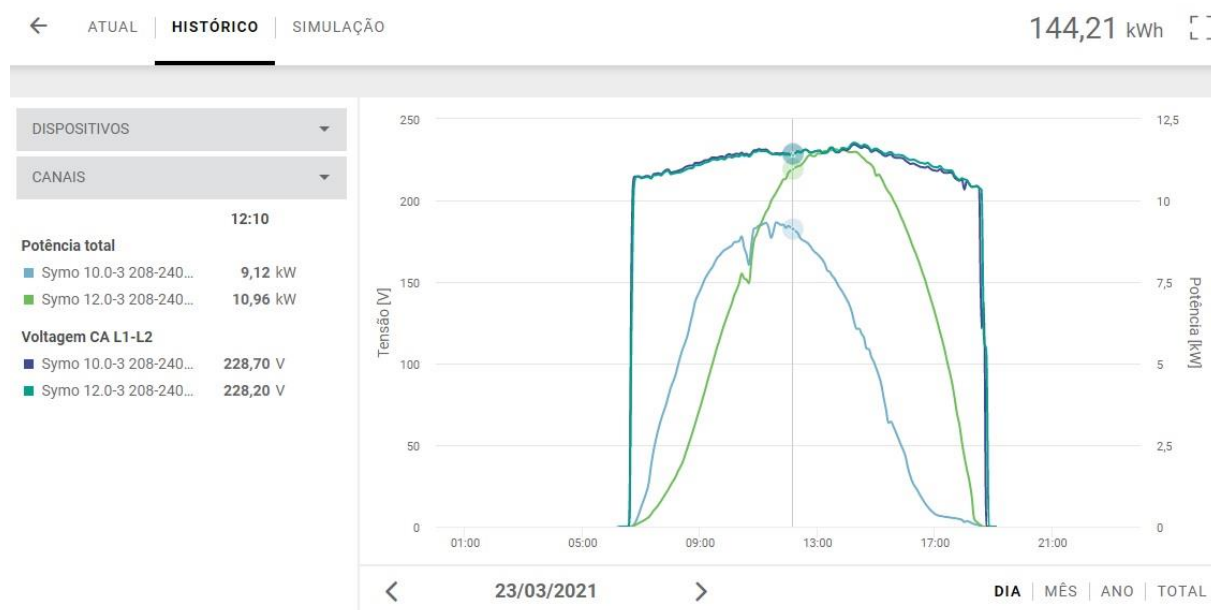
procedimentos padrão para solucionar esse tipo de problema; no entanto, foi ineficaz para essa situação específica. O problema foi solucionado com a remoção do cabo de neutro e alteração das configurações do inversor para o *setup* de 220 V sem neutro. Que devido aos valores das tensões de fase muito diferentes um do outro, o inversor se desconectava por uma fase estar com a tensão muito alta enquanto que sem o neutro ele só lê a tensão de linha entre as fases que permanece próximas uma da outra, não ocorrendo então a desconexão.

Figura 25: Sistema da entidade após correção.



Fonte: (Monitoramento Fronius Solar Web, 2021).

Figura 26: Sistema da residência após correção.



Fonte: (Monitoramento Fronius Solar Web, 2021).

Após as correções observa-se que as curvas de potência estão sem aqueles vários “buracos” que tinham no ano de 2020, a potência máxima dos sistemas aumentou, a quantidade de energia gerada também aumentou, agora o pico de potência da entidade no mesmo dia e mês dos outros gráficos foi de 39,28 kW, 3,94 kW a mais do que em 2020. A energia gerada foi para 274,52 kWh no dia. 33,87 kWh a mais, isso é o tanto de energia aproximadamente que a entidade deixava de produzir por conta dos desligamentos.

Na residência a potência de pico foi de 20,96 kW para 20,08 kW, houve uma redução, mas a energia produzida aumentou bastante saltou de 128,98 kWh para 144,21 kWh. 15,23 kWh.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram analisados sistemas fotovoltaicos reais que apresentaram mau funcionamento (desconexões) devido à qualidade da energia deficitária da rede de distribuição de energia elétrica. Portanto, é de extrema importância o atendimento aos indicadores de qualidade de energia elétrica para o funcionamento adequado dos sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede elétrica (*on-grid*).

As várias desconexões dos inversores reduziram a produção de energia das UCs. Se continuasse com essas desconexões durante o dia a vida útil dos componentes internos dos inversores iriam diminuir devido ao estresse que eles estavam submetidos.

Esses problemas ocorreram devido à potência instalada dos sistemas fotovoltaicos das duas UCs próximas serem elevadas para a rede local de distribuição, por não ter carga local consumindo toda essa energia gerada. A concessionária poderia fazer um estudo para remanejar os pontos de conexão das duas UCs e balancear as fases desse setor de transformador. Na entidade devido à pandemia Covid-19, ela não está funcionando normalmente assim a carga que ela teria normalmente durante o dia para consumir uma parte dessa energia produzida, não está presente. Sendo a energia gerada quase toda exportada para a rede da concessionária.

A qualidade da energia desse setor de rede elétrica que atende os dois locais e vizinhos era prejudicada com a oscilação frequente dos níveis de tensão devido as várias desconexões dos inversores durante o dia. Após a correção dos problemas, ou seja, após a mudança da configuração de ligação e *setup* dos inversores, ficou mais estável os níveis de tensão na rede e os inversores começaram a operar da maneira correta. A energia gerada pela entidade aumentou em torno de 14 %, e da residência a energia produzida aumentou aproximadamente 12%.

6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Uma sugestão de trabalhos futuros seria estabelecer medidas para melhorar a qualidade da energia no ponto de conexão para a GSF funcionar normalmente sem desconexões

7 REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 12, vigente a partir de 01/01/2021.

Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos / coordenador Chigueru Tiba... *et al.*- Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000.

BALANÇO Energético Nacional (BEN) 2021 Ano base 2019, 2020. **EPE [Empresa de Pesquisa Energética]**, 2021. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>. Acesso em: 21 mai. 2021.

BRASIL. Lei nº 10.527, de 22 de outubro de 2020. Institui o Selo Biocombustível Social. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 23 out. 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.527-de-22-de-outubro-de-2020-284690266>. Acesso em: 20 maio 2021.

DANTAS, Ozlean De Lima. APOLONIO, Roberto. **Impactos da alta penetração fotovoltaica na rede elétrica em relação à qualidade de energia**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 04, Ed. 07, Vol. 11, pp. 166-177. 2019.

ENERGIA solar fotovoltaica off grid. **ECOAquecedores**, 2021. Disponível em: <<https://www.ecoquecedores.com.br/energia-solar-fotovoltaica-off-grid/>>. Acesso em: 24 mai. 2021.

Entenda as diferenças entre o Sistema isolado e o conectado à rede. **Solarvolt**, 2021. Disponível em: <<https://www.solarvoltenergia.com.br/blog/sistema-fotovoltaico-isolado-ou-conectado/>>. Acesso em: 22 mai. 2021.

ESCRICH Bianca. Mercado Livre de Energia ou Geração Distribuída: qual a melhor alternativa? **Way2Blog**, 2020. Disponível em: <<https://www.way2.com.br/blog/mercado-livre-energia-ou-geracao-distribuida/>>. Acesso em: 21 mai. 2021

FARRET, F. A. **Aproveitamento de pequenas fontes de energia elétrica**. 2 ed. Santa

Maria, RS, Brasil, 2010.

FRONIUS solar.web. **Fronius**, 2021 Disponível em: <<https://www.solarweb.com/>> Acesso em: 20 jul. 2021.

QUALIDADE na Distribuição. **ANEEL**, 2021. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/qualidade-na-distribuicao>>. Acesso em: 25 jul. 2021.

GERAÇÃO Distribuída. **ANEEL**, 2021. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Acesso em: 20 mai. 2021.

HODGE, **Sistemas e Aplicações de Energia Alternativa**, 1ª ed., Editora LTC, 2011.

JUNIOR, J. U. **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que passam afetar a conectividade**. 2010. 189f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2010.

MALAGUTI, B. **Estudo da Viabilidade Econômica de Implantação de um Projeto de Eficiência Energética (PEE) em uma Escola do Município de Rosana-SP**. 2019. 51f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Energia) – Curso de Engenharia Energia, Campus Experimental de Rosana, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Rosana, 2019.

NARUTO, D. **Vantagens e Desvantagens da Geração Distribuída e Estudo de Caso de um Sistema Solar Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica**. UFRJ/Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2017.

NOGUEIRA, P. **Estudo de viabilidade econômica da instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica de energia do rio de janeiro: um estudo de caso**. UFRJ/ Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2016.

OLIVEIRA, P. **Fundamentos de Energia Eólica**. 1ª ed., Editora LTC, 2013.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014.

SILVA, R. G. da. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico para atender uma demanda de iluminação**. 2014. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Estadual de Londrina.

SOUZA, João Paulo de. **Módulos Fotovoltaicos – Monocristalino ou Policristalino – Qual a melhor dessas duas tecnologias para o Brasil?** ecori energia solar, 2018. Disponível em: <<https://www.ecorienergiasolar.com.br/artigo/modulos-fotovoltaicos---monocristalino-ou-policristalino---qual-a-melhor-dessas-duas-tecnologias-para-o-brasil>>. Acesso em: 16 mai. 2021.

TAVARES, Wagner Marques (Coord.). **Energias renováveis: riqueza sustentável ao alcance da sociedade**. Relator Pedro Uczai. Equipe técnica Alberto Pinheiro de Queiroz Filho. Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2012. 275 p., il. color. (Série cadernos de altos estudos, 10).

VILLALVA, M.G. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. São Paulo: Ed. Érica, 2ª Ed., 2015.

ANEXO A – FOLHETO DO INVERSOR FRONIUS SYMO BRASIL.

FRONIUS SYMO BRASIL

/ O futuro da energia solar comercial está aqui



DADOS TÉCNICOS FRONIUS SYMO BRASIL

DADOS DE ENTRADA	12.0-3 208/240	15.0-3 208/240
Potencia PV recomendada (kWp)	9.5 - 15.5	12.0 - 19.5
Max. corrente do conjunto curto-circuito (MPPT1/MPPT 2)	25.0 A / 16.5 A	50.0 A
Faixa de tensão MPP	300 - 500 V	350 - 800 V
Faixa de tensão operando	200 - 600 V	350 V - 1000 V
Max. tensão de entrada	600 V	1000 V
Tensão nominal de entrada	208 350 V	325 V
	220 / 240 370 V	NA
Número de MPPT	2	1

DADOS DE SAÍDA	12.0-3 208/240	15.0-3 208/240
Max. potência de saída	208 11995 VA	15000 VA
	220 / 240 11995 VA	NA
Max. corrente de saída	208 35.0 A	41.6 VA
	220 / 240 35.0 A / 32.8 A	NA
Max. Eficiência	97.0 %	97.3%
CEC Eficiência	208 96.5 %	96.5%
	240 96.5 %	NA
Conexão a rede ($U_{ac,r}$)	208/240	208 V
Frequência(f_r)	60 Hz	
Distorção Harmônica Total	< 1.75%	< 3.5%
Fator de potência	0-1 ind./cap.	

DADOS GERAIS	PADRÃO COM TODOS OS MODELOS SYMO
Dimensões (altura x largura x profundidade)	511 x 724 x 227 mm
Grau de proteção	NEMA 4X
Consumo Noturno	< 1 W
Conceito retificador	Sem transformador
Resfriamento	Velocidade do ventilador variável
Instalação	Montagem interna e externa
Faixa de temperatura ambiente	-40 - +60 °C
Umidade relativa permitida	0 - 100 %
Tecnologia de conexão de rede	6x CC+ e 6x CC- parafusos finais de cobre (solidos / flexivel/ fine stranded) ou alumínio (solido / flexivel)