

Estudo de multicasos acerca dos impactos da sobretensão da rede elétrica do RN na geração de energia das usinas fotovoltaicas.

João Marcelo de Lima Rodrigues
UFERSA
Mossoró, Brasil
joaomarcelo.lr@hotmail.com

Idalmir de Souza Queiroz Junior
Departamento de Engenharia e Tecnologia
UFERSA
Mossoró, Brasil
idalmir@ufersa.edu.br

Resumo-A geração de energia elétrica através de usinas solar fotovoltaicas possui um crescimento incontestável no Brasil e no mundo. A micro e a minigeração distribuída (GD) vem crescendo ano após ano através da redução cada vez maior das faturas de energia da população. No entanto, para uma popularização deste nível da GD, alguns problemas surgem devido a incompatibilidades e não adequação das redes de distribuição das concessionárias. Para isso, este presente trabalho se dispõe a realizar estudos de multicaso de usinas fotovoltaicas do estado do Rio Grande do Norte, no intuito de se propor soluções para um dos principais problemas que surgiram com esse crescimento, a sobretensão presente na rede elétrica da concessionária que mostrou necessidade de intervenção técnica para melhor receber a energia injetada das usinas.

Palavras-chave - Geração distribuída, usina solar, sobretensão, transformadores.

I. INTRODUÇÃO

O avanço constante e cada vez maior de novas tecnologias utilizadas em sistemas fotovoltaicos, faz com que o número de novas usinas instaladas seja maior a cada ano no Brasil [1]. Boa parte do número de usinas instaladas em centros urbanos e até no meio rural é caracterizado como microgeração, possuem uma potência instalada de até 75 kWp. Com os últimos incentivos e resoluções normativas emitidas pela ANEEL, a expectativa é que o número de novos sistemas em residências e em indústrias aumente cada vez mais.

O aumento demasiado da inserção de novos sistemas fotovoltaicos direto na distribuição de energia elétrica acarreta alguns problemas técnicos, uma vez que os sistemas de distribuição (média e baixa tensão) de energia em não foram projetados para suportar as cargas de estresse provenientes das usinas fotovoltaicas [2].

As linhas de distribuição foram projetadas em sua essência para suportar um fluxo de energia e potência das subestações de energia para os consumidores finais [3]. A injeção concentrada de energia no sentido contrário ao inicialmente projetado, provoca alguns problemas na rede fazendo com que os parâmetros de qualidade de distribuição definidos pela ANEEL não sejam atingidos em algumas localidades. Devido ao fato dos inversores que circulam no mercado serem homologados e registrados pelo INMETRO, estes devem seguir os parâmetros definidos pela agência regulamentadora para que a sua operação não prejudique a qualidade desejada nem ofereça risco a rede de distribuição.

Quando os inversores identificam algum parâmetro na rede que não esteja dentro dos limites mínimos e máximos definidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica, eles devem obrigatoriamente, por medida de proteção, interromper a injeção de energia na rede da concessionária. No caso de uma constante leitura de parâmetros destoantes dos determinados, os equipamentos conversores acabam diminuindo a eficiência das usinas fotovoltaicas (UFVs), afetando diretamente os clientes possuidores de usinas conectada à rede.

Um dos problemas mais encontrados na distribuição de energia próximo a locais que possuem uma grande quantidade de usinas fotovoltaicas acumuladas, é a sobretensão da rede. A sobretensão atinge diretamente um dos parâmetros de funcionamento lidos pelos inversores e faz com que haja o desligamento instantâneo do aparelho. Como consequência disso, a geração e a injeção de energia são interrompidas acarretando prejuízos e a baixa eficiência dos sistemas fotovoltaicos [4].

II. REFERENCIAL TEÓRICO

A. Tensão da rede

As redes de distribuição de energia elétrica no Brasil seguem alguns padrões para que sejam mantidos os parâmetros necessários de fornecimento de energia para a população. No entanto, dependendo da concessionária e do estado do país, alguns parâmetros podem variar, como é o caso do valor da tensão de atendimento dos consumidores.

No módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico (PRODIST) da ANEEL, são definidos diversos parâmetros de qualidade de fornecimento de energia elétrica para os consumidores. Se tratando de baixa tensão (BT), os níveis de tensão em regime permanente não podem ter uma flutuação de 5% em leituras precárias ou 0,5% em leituras críticas num conjunto de 1008 leituras válidas [5]. A Tabela 1 mostra a variação máxima e mínima dos níveis de tensão de abastecimento permitido para rede de distribuição do Rio Grande do Norte.

TABELA I. NÍVEIS DE TENSÃO PERMITIDOS NA BT

Nível de tensão (V)	Tensão Mínima (V)	Tensão Máxima (V)
220/127	201/116	231/133
380/220	348/201	396/231

Fonte: Adaptado de [5].

A tensão de abastecimento de um consumidor pode se tornar anormal por diversos motivos, sendo os principais e mais comuns [6]:

- Condutor subdimensionado do ramal de alimentação e/ou de distribuição do padrão de entrada;
- Tensão de fornecimento da concessionária acima dos valores previstos em norma;
- Energização e religamento de linhas de transmissão e distribuição;
- Injeção de potência ativa na rede através de usinas fotovoltaicas residenciais;

B. Inversor Fotovoltaico

Inversores, também conhecidos como conversores CC-CA, são dispositivos eletrônicos capazes de fornecer uma corrente e tensão alternada com determinada frequência e forma de onda de acordo com um controlador interno. Em sua entrada é conectado um gerador de corrente contínua [7].

Os inversores utilizados em UFVs obedecem aos mesmos princípios, possuem uma fonte de corrente CC e transforma em corrente alternada no padrão da rede de distribuição da concessionária. A fim de não causar perturbações na rede de forma que afete a qualidade do abastecimento de energia aos consumidores, os inversores fotovoltaicos possuem um sistema interno de medição para que ele possa espelhar os parâmetros da rede e injetar energia no mesmo molde.

Inversores utilizados em usinas fotovoltaicas são desenvolvidos especificamente para esse uso e precisam ser homologados pelas agências reguladoras de cada país, para que estes possam ser interligados às redes das concessionárias. Para que esses dispositivos recebam seus certificados de homologação pelo INMETRO, eles passam por uma série de testes e necessitam atender a uma série de proteções como por exemplo a proteção contra ilhamento e proteção contra sobretensão e sobrecorrente em ambos os lados, CC e CA [8].

Quando identificado algum parâmetro incomum ou falta de energia na rede, o inversor desliga automaticamente. Após alguns segundos, o dispositivo tenta voltar a sua operação e se estabilizar com os parâmetros lidos. Caso o problema persista, o desligamento será constante durante o período identificado do problema, sendo esse desligamento chamado de *reset* do inversor. Os resets constantes causam perdas consideráveis de rendimento, visto que naquele momento que ocorreu o desligamento indesejável, não há nenhuma energia sendo injetada na rede e o consumidor acaba consumindo a energia diretamente da concessionária.

Os conversores CC-CA podem ainda ser configurados para operar em tensões acima das nominais, afetando diretamente a qualidade do fornecimento de energia. Ou seja, de forma proposital, esses dispositivos podem ser configurados de forma a serem mais toleráveis com níveis elevados de tensão. Sendo assim, alguns modelos de inversores monofásicos ditos 127/220 V podem trabalhar com tensões de até 260 V e os trifásicos ditos 220/380 V com tensões de até 400 V. No entanto, essa prática não é recomendável pelos próprios fabricantes, pelo motivo de que a tensão elevada nos consumidores finais pode ocasionar prejuízos ainda maiores provocando a queima de equipamentos elétricos e eletrônicos. Além de que pode causar a sensibilização dos dispositivos de segurança aumentando de forma significativa os índices de qualidade impostos pela ANEEL, o DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor) e o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor).

Na Figura 1 é possível visualizar o gráfico da leitura da tensão da rede quando um inversor fotovoltaico está em operação. Em um sistema equilibrado, as fases apresentarão valores similares de tensão além de se manterem estáveis durante o período de funcionamento. Nesta situação, temos o pleno funcionamento de uma UFV quando se trata do parâmetro da tensão da rede, dependendo assim o seu rendimento apenas de fatores climáticos e temporais.

Por outro lado, na Figura 2 é possível observar o gráfico da variação da tensão da rede de distribuição durante um dia de geração da usina fotovoltaica não saudável. Nota-se a variação constante dos valores espelhados, além de que, percebe-se que a média da tensão da Fase A deste dispositivo está bastante acima dos valores determinados como limite pela ANEEL. Como explicado anteriormente, mesmo quando configurado para operar com níveis de tensões superiores ao nominal, os inversores fotovoltaicos apresentarão constantes *resets* no sistema.

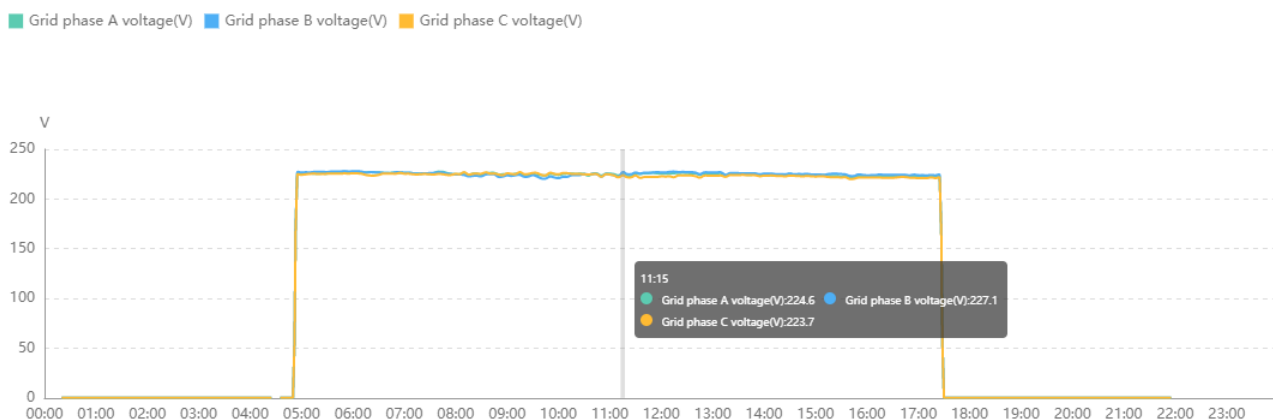


Fig. 1. Gráfico da variação da tensão ideal de saída do inversor. [9]

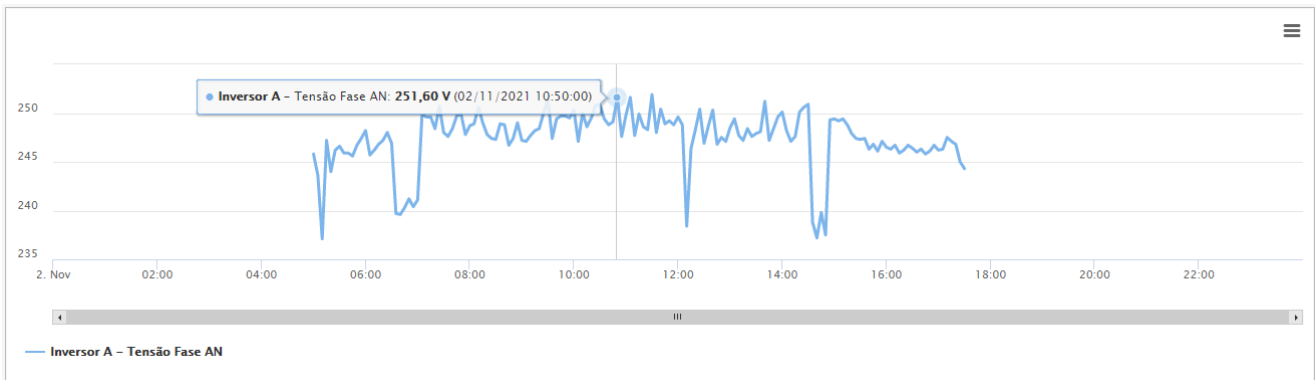


Fig. 2. Gráfico da variação da tensão de saída de um inversor quando há sobretensão na rede de distribuição. [10]

C. Monitoramento das usinas

Devido à grande procura por usinas fotovoltaicas, o mercado de fabricação e fornecimento de equipamentos cresceu rapidamente, com isso, grandes indústrias de tecnologias entraram nesse mercado. O surgimento de diferentes marcas de inversores e micro inversores fez com surjam diferentes formas de monitorar os sistemas fotovoltaicos remotamente, cada um buscando a sua inovação e atender da melhor forma os clientes consumidores.

Em suma, o monitoramento das usinas é feito em sua maior parte por portais integradores, que diferem entre si de acordo com o tamanho do sistema e do fabricante do equipamento utilizado. Há diversos portais disponíveis no mercado atual, alguns mais completos que outros. No entanto, o intuito da maior parte dessas plataformas é informar, tanto às empresas que fornecem as usinas quanto seus clientes, os dados de geração.

Os parâmetros mais comuns no monitoramento de usinas geradoras de energia através do sol são: Corrente, tensão, frequência e fator de potência da rede na qual o sistema está conectado (CA) e a corrente e tensão de cada *string* (CC), além de dados gerais como a potência ativa instantânea e a energia injetada na rede. De posse desses dados é possível entender e diagnosticar problemas que ocorrem durante a geração de energia.

Algumas empresas integradoras de sistemas fotovoltaicos oferecem ainda o serviço de pós-venda e acompanhamento dos sistemas de seus clientes. Nestes casos, os portais de monitoramento têm um papel fundamental, uma vez que a análise das usinas é feita diariamente. Através destas plataformas é possível visualizar e exportar gráficos dos parâmetros desejados para que a análise fique mais visual e comparativa.

III. METODOLOGIA

O presente artigo se classifica como estudo de multicaso e exploratório [11] e tem como objetivo realizar uma análise quantitativa e qualitativa de usinas fotovoltaicas do RN a partir dos dados de geração de energia destas. Para atingir os

objetivos da pesquisa, foram reunidas algumas usinas escolhidas estrategicamente.

A. Plataformas de monitoramento

Grandes empresas de tecnologias entraram no mercado solar buscando oferecer seus produtos. Com os diferentes tipos de inversores e formas de monitorar as usinas aparecendo, surgiu uma nova demanda no mercado: a de integrar os dados de monitoramento de diversos tipos de inversores e plataformas em uma só plataforma através de APIs. Dessa forma, estas novas plataformas conseguem facilitar ainda mais para as empresas integradoras organizar e monitorar as usinas de seus clientes. São mostrados os principais portais de monitoramento utilizados na obtenção de dados analisados.

1) *Fusion Solar*: O portal da Fusion Solar foi desenvolvido pela Huawei Technologies® e visa coletar e expor os dados de geração das plantas solares desenvolvidas com os inversores da própria Huawei. Este é considerado um dos portais mais completos devido a quantidade de funcionalidades disponíveis na plataforma, dentre elas, analisar historicamente os dados e parâmetros de geração da usina em tempo real, opção de se realizar o comissionamento do sistema de forma virtual, modificar parâmetros dos inversores de forma remota, entre outras [9].

2) *SolarView*: Esta plataforma entra no mercado como uma solução para monitorar diferentes tipos de inversores em uma mesma plataforma, independente do fabricante. A SolarView integra diferentes modelos de equipamentos e possui várias funcionalidades dentro da plataforma, permitindo que a análise de dados de geração seja uma das mais completas do mercado [10].

3) *SolarZ*: A startup SolarZ surge com uma proposta diferente para o mercado solar: integrar a maioria dos portais existentes em uma só plataforma. Dessa forma, uma empresa que utiliza diferentes fabricantes de equipamentos poderá fornecer o monitoramento das usinas de seus clientes utilizando apenas uma plataforma. Isso fará condensar todas as análises em um só lugar com a proposta de dividir as usinas em categorias e mostrar rapidamente as plantas que apresentem problemas [12].

B. Seleção das UFVs

Ao todo foram analisadas 160 usinas fotovoltaicas no estado do Rio Grande do Norte, contudo, para que o estudo fique mais concentrado e possa ilustrar resultados mais precisos, do total coletou-se uma amostra de 24 unidades, equivalente a 15%, selecionadas de acordo com o seu histórico de geração e o rendimento apresentado. A Tabela 2 identifica as cidades das unidades geradoras escolhidas.

TABELA II. CIDADES E COORDENADAS GEOGRÁFICAS DAS USINAS ESTUDADAS.

UFV	Cidade do RN	Caso
1	Alto do Rodrigues	B
2	Alto do Rodrigues	B
3	Areia Branca	B
4	Assú	A
5	Assú	A
6	Itajá	B
7	Itajá	B
8	Mossoró	A
9	Mossoró	A
10	Mossoró	A
11	Mossoró	A
12	Mossoró	A
13	Mossoró	A
14	Mossoró	A
15	Mossoró	A
16	Mossoró	A
17	Mossoró	A
18	Mossoró	A
19	Parnamirim	A
20	São Miguel	B
21	Serrinha dos Pintos	B
22	Severiano Melo	B
23	Taipu	B
24	Tibau	B

Fonte: Autoria própria.

Como consta na Tabela 2, as usinas foram divididas em dois grupos denominados A e B. Essa divisão se fez necessária para que seja possível entender e visualizar os dois pontos principais para o presente estudo das causas de sobretensão na rede da concessionária, um advindo da própria rede e outra devido ao fluxo de potência estar invertido com relação ao sentido projetado para a rede de distribuição.

Usinas caracterizadas como caso A estão localizadas em centros urbanos mais populosos, condomínios de alto e médio

padrão ou foram ligadas em quadros de múltiplas unidades consumidoras nos quais já possuíam geração distribuída. Sendo assim, neste caso se deseja perceber como o aglomerado de usinas geradoras ligadas na rede de uma região delimitada, pode interferir negativamente nos parâmetros padrões da rede de distribuição, afetando na qualidade da energia fornecida ao consumidor.

Já usinas identificadas como caso B estão localizadas em regiões mais isoladas, na qual a rede de distribuição não foi projetada para atendê-la. Nesse caso se deseja visualizar como a rede subdimensionada pode afetar negativamente a produção das usinas mais isoladas, consideradas na Zona Rural no estado.

C. Parâmetros analisados

Para entender o comportamento das usinas nos dois casos, foi analisada minuciosamente a geração das mesmas durante três períodos: os 3 últimos meses de geração, 6 últimos meses de geração e 12 últimos meses de geração. Dessa forma, será possível visualizar como o desempenho de cada unidade geradora pode variar tanto de acordo com as condições climáticas e temporais da região quanto a influência da própria rede, além de eliminar a possibilidade de a sobretensão ter sido ocasionada por fatores atípicos que acontecem na linha de distribuição.

Na análise das usinas selecionadas foi estudado principalmente a tensão de saída do inversor. Esse dado pode ser obtido através dos portais de monitoramento. Quando percebido que a usina em questão estava obtendo uma baixo rendimento devido a sobretensão da rede por algum dos dois motivos estudados, foi solicitado a concessionária uma visita técnica ao local para tomar as devidas providências e regularizar a tensão de abastecimento da unidade.

D. Análise de soluções primárias

Devido a prazos internos e demandas próprias da COSERN, concessionária de energia elétrica do RN, não foi possível corrigir todas as unidades estudadas para que a tensão de abastecimento fosse regularizada, ainda assim, fez-se uma análise comparativa das unidades nas quais houve intervenção técnica da companhia. O comparativo foi realizado analisando-se o pior mês de geração da usina devido a sobretensão e o primeiro mês na qual o problema foi extinguido em pelo menos 95%. Em caso do mês anterior ou posterior não apresentar dados de uma usina saudável, comparou-se automaticamente com o mesmo mês do ano anterior, desde que este também não apresentasse indícios de *resets* devido a tensão elevada.

Para o estudo em questão, foi atestado que as usinas de fato sofrem com sobretensão proveniente unicamente dos casos A e B. Para isso, foram verificadas as seções nominais dos condutores dos ramais de alimentação e de distribuição da ligação das unidades consumidoras, além de que foi verificado a potência reativa consumida pelos clientes, uma vez que a usina injeta apenas potência ativa na rede.

E. Prognóstico e rendimento

O rendimento de uma usina fotovoltaica é calculado com base em um valor de expectativa em comparação com a geração real obtida através do monitoramento remoto. A expectativa de geração pode ser obtida através de softwares

existentes no mercado solar, estes possibilitam uma simulação precisa do rendimento das usinas nos locais de instalação.

Traçar o provável desenvolvimento futuro de uma UFV é de suma importância no entendimento de possíveis problemas que possam acontecer que acarretam a baixa do rendimento daquela unidade geradora. Atrelado a um monitoramento constante das usinas, o prognóstico é um grande aliado na percepção de problemas a fim de se evitar perdas de geração ao longo do tempo devido a fatores diversos.

Atualmente há três formas principais para se obter o prognóstico de uma usina: através de *softwares* simuladores, sendo este o modelo mais completo e preciso, utilização de fórmulas matemáticas de expectativas de geração com base nos dados intrínsecos dos equipamentos fornecidos pelos fabricantes atrelado às condições climáticas e temporais, ou ainda tomando a própria geração como base. Para o último caso, é necessário que a usina esteja em operação normal a pelo menos 12 meses, dessa forma os resultados anteriores poderão servir de expectativa para a geração futura.

Para o presente trabalho, o rendimento das usinas foi calculado a partir da plataforma de monitoramento da startup SolarZ. O prognóstico inserido das usinas nesta plataforma foi calculado a partir de softwares de modelagem 3D, análise de rendimento com base no sombreamento do local, dados meteorológicos e informações intrínsecas dos módulos e inversores utilizados. Ainda assim, o rendimento pode ser calculado através da Equação 1.

$$\eta = \frac{\text{Geração real obtida}}{\text{Prognóstico}} \quad (1)$$

O rendimento de uma usina pode sofrer influência de diversos fatores, desde questões temporais até erros de dimensionamento de sistemas tanto de equipamentos quanto de condutores. Para que a influência no rendimento das usinas analisadas fosse apenas pelo fator sobretensão, garantiu-se ainda que o Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI) não seja superior a 1,25 nem inferior a 0,75. Esse fator é calculado a partir da Equação 2.

$$FDI = \frac{\text{Potência total de saída do inversor}}{\text{Potência total dos módulos fotovoltaicos}} \quad (2)$$

Usinas fotovoltaicas dimensionadas com FDI fora dessa escala podem apresentar baixo rendimento devido ao super ou subdimensionamento. A partir da Tabela 3 é possível obter o FDI das usinas estudadas.

TABELA III. FATOR DE DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR DE CADA UFV ANALISADA BEM COMO A SUA POTÊNCIA INSTALADA

UFV	Caso	Potência instalada (kWp)	FDI
1	B	6,7	0,82
2	B	95,2	0,84
3	B	2,07	1,10
4	A	28,35	1,06
5	A	4,9	1,12

UFV	Caso	Potência instalada (kWp)	FDI
6	B	20,09	0,99
7	B	15,18	0,75
8	A	4,83	0,91
9	A	4,83	0,91
10	A	3,56	0,93
11	A	6,64	0,83
12	A	6,89	1,16
13	A	9,8	1,22
14	A	8,04	0,87
15	A	7,12	0,77
16	A	6,60	0,85
17	A	5,2	0,77
18	A	6,57	0,84
19	A	12,02	0,96
20	B	12,15	0,99
21	B	7,7	1,20
22	B	11,63	0,76
23	B	18,63	0,81
24	B	37,96	0,79

Fonte: Autoria própria.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do monitoramento diário de algumas usinas geradoras de energia fotovoltaicas do estado do Rio Grande do Norte, percebeu-se alguns parâmetros incomuns na rede de distribuição de algumas localidades. Tais ocorrências ocasionavam o desligamento dos inversores, fazendo com que o rendimento das usinas fosse inferior ao esperado. A seguir, vê-se os pontos analisados que mostram o quanto uma deficiência na rede ou o acúmulo de usinas geradoras em uma região que não está preparada, pode afetar a geração distribuída de energia na microgeração.

A. Média da tensão da rede nos picos de geração

Um dos fatores principais para análise da qualidade da energia fornecida é o valor da tensão de fornecimento, para isso analisou-se a média das tensões de saída apresentadas pelos inversores das usinas estudadas dentro do período em que esta sofreu com sobretensão. Através da Tabela 4 é possível visualizar os valores médios da tensão de saída CA nas usinas. O tempo de duração indicado diz respeito ao período no qual a usina enfrentou problemas com níveis elevados de tensão.

TABELA IV. VALORES MÉDIOS DE TENSÃO IDENTIFICADOS PELOS INVERSORES FOTOVOLTAICOS.

UFV	Caso	Tensão média da rede nos picos (V)	Tempo de duração (meses)
1	B	238	3
2	B	240	12
3	B	234	6
4	A	230	6
5	A	240	4
6	B	232	6
7	B	227	3
8	A	215	2
9	A	238	2
10	A	232	2
11	A	234	3
12	A	240	4
13	A	241	6
14	A	235	1
15	A	233	6
16	A	Indisponível	6
17	A	241	12
18	A	238	6
19	A	240	6
20	B	230	3
21	B	228	3
22	B	228	2
23	B	249	12
24	B	243	3
Média Geral (V)		235	-

Fonte: Autoria própria.

É possível observar a partir da Tabela 4, que a média geral das tensões nos momentos de pico de geração, entre 10:30 e 13:30, é superior ao limite máximo indicado pela ANEEL para garantir a qualidade da energia fornecida aos consumidores.

Se torna perceptível ainda que a sobretensão da rede ocorre de maneira similar aos dois casos estudados, tanto para usinas em centros urbanos quanto para as mais isoladas. Apesar do valor da tensão da rede variar durante todo o dia, ficando inclusive dentro dos limites aceitáveis de 5% de flutuação, os picos de tensão são suficientes para causar o *reset* do inversor, diminuindo consideravelmente rendimento da UFV como poderemos observar na Tabela 5.

B. Perdas de geração

Os desligamentos constantes dos inversores por proteção nos horários de geração, causam uma queda significativa no

rendimento da usina, para averiguar o impacto da sobretensão no rendimento elaborou-se a Tabela 5, na qual foi possível entender como esse fenômeno pode interferir na injeção de energia durante certos períodos.

TABELA V. RENDIMENTO DAS UFVs NOS ÚLTIMOS 3, 6 E 12 MESES DE FUNCIONAMENTO

UFV	Desempenho			
	Caso	3 meses	6 meses	12 meses
1	B	84,28%	94,10%	93,11%
2	B	70,73%	73,59%	80,89%
3	B	95,29%	85,84%	91,45%
4	A	88,09%	93,93%	99,64%
5	A	79,44%	93,14%	94,38%
6	B	90,45%	96,13%	97,70%
7	B	105,54%	99,82%	102,65%
8	A	96,29%	99,13%	102,79%
9	A	84,46%	90,06%	94,75%
10	A	65,34%	79,89%	-
11	A	94,45%	93,81%	94,81%
12	A	88,75%	92,16%	94,03%
13	A	53,31%	71,74%	88,55%
14	A	97,56%	104,69%	102,03%
15	A	81,97%	80,96%	-
16	A	71,54%	82,57%	92,74%
17	A	63,98%	74,23%	82,75%
18	A	84,65%	87,83%	94,90%
19	A	92,23%	93,93%	92,25%
20	B	78,36%	73,13%	79,25%
21	B	97,42%	99,07%	84,61%
22	B	99,55%	93,38%	92,93%
23	B	56,70%	60,88%	75,15%
24	B	84,31%	81,96%	81,99%

Fonte: Autoria Própria.

A partir da Tabela 5, nota-se que perda de geração é maior em alguns caso do que outros, isso muda de acordo com a constância dos *resets* além dos fatores climáticos e temporais. Para uma usina em pleno funcionamento, o rendimento esperado é de 95% a 105%, valores fora desta margem indicam que algo está ocorrendo de forma errada, seja a previsão de geração ou a geração propriamente dita. É possível se observar que o rendimento baixo ocorre para ambos os casos A e B de formas semelhantes, no entanto, as usinas que apresentaram um menor rendimento estão caracterizadas como caso B.

Na análise feita a partir de tempos longos de geração (de 6 a 12 meses), o rendimento baixo devido a sobretensão acaba

sendo compensado pelos meses de melhor geração, devido a fatores climáticos e temporais. Além disso, é sabido também que a sobretensão da rede em alguns casos pode ser passageira, sem que haja a necessidade de intervenção da própria concessionária.

A partir da Figura 3 é possível visualizar como valores elevados de tensão causam o baixo rendimento de uma UFV.

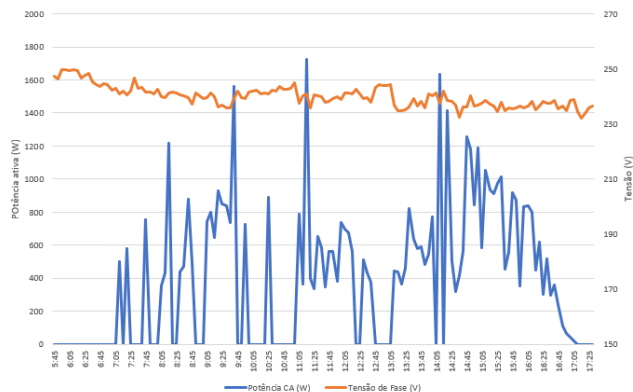


Fig. 3. Comparativo entre valores instantâneos da tensão da rede e da potência ativa da usina 23 com sobretensão.

Observa-se que, apesar de as tensões obtidas já possuírem valores superiores aos recomendáveis e permitidos por norma, quando a tensão na leitura do inversor apresenta um pico, o desligamento é automático. Ao perceber a tensão se estabilizando no nível para o qual o dispositivo foi configurado para operar, este retorna a injetar energia da rede.

O gráfico do funcionamento ideal da geração de uma UFV é similar a uma parábola, com o pico de geração entre as 10:30 e 13:30 horas. Na Figura 4 é possível visualizar a trajetória do gráfico da energia gerada em um dia com sombreamento quase nulo.

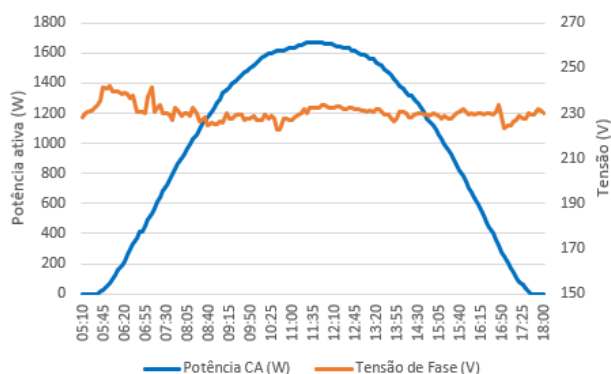


Fig. 4. Comparativo entre valores instantâneos da tensão da rede e da potência ativa da usina 23 sem sobretensão.

C. Comparativo de rendimento antes e depois da intervenção técnica.

No intuito de se entender como uma intervenção da concessionária pode afetar positivamente o rendimento de uma usina, foi solicitado a visita de uma equipe técnica da COSERN no local das 24 usinas analisadas. No entanto, devido a prazos internos para atendimento de demandas e parecer técnico dado para cada uma delas pela concessionária,

até o momento do presente estudo, foram corrigidas apenas 8 unidades geradoras. Na Tabela 6 é possível analisar o rendimento do pior mês de geração devido a sobretensão e o mês de melhor geração após a intervenção pela concessionária, é possível ainda também entender qual a modificação realizada em cada uma das unidades para que a tensão apresentasse valores normais novamente.

TABELA VI. RENDIMENTO DAS UFVs ANTES E APÓS A INTERVENÇÃO DA CONCESSIONÁRIA

UFV	Desempenho		Intervenção realizada
	Antes	Depois	
3	74,46%	100,53%	Regulagem do TAP do transformador
6	87,75%	94,58%	Regulagem do TAP do transformador
7	89,81%	105,87%	Regulagem do TAP do transformador
10	85,91%	106,00%	Aumento da carga instalada (alteração do ramal de ligação e distribuição do consumidor)
16	74,47%	109,02%	Aumento da carga instalada (alteração do ramal de ligação e distribuição do consumidor)
17	58,77%	103,74%	Regulagem do TAP do transformador
21	66,20%	101,48%	Inserção de um novo transformador próximo a residência do cliente
23	54,14%	101,75%	Regulagem do TAP do transformador

Fonte: Autoria Própria.

É perceptível o aumento no rendimento das usinas logo após a intervenção, a média de aumento foi de 30,68%. Este valor é bastante considerável, se considerado a média de geração efetiva de cada usina, esse valor representa um aumento de 3075,06 kWh no mês para as 8 unidades corrigidas. Se extrapolado este valor, considerando a média para as 24 usinas analisadas, temos um desperdício de aproximadamente 9 MWh/mês. Quando colocado esse valor de geração atrelado ao valor da tarifa de energia elétrica da COSERN, cerca de R\$0,80 em novembro de 2021, data do presente estudo, há na verdade uma perda de mais de R\$2.400,00 por mês, considerando apenas 8 consumidores pontuais e R\$7.200,00 para a média das 24 UFVs estudadas. Nas Figuras 5 (a) e (b) é possível visualizar dois exemplos de usinas fotovoltaicas que sofreram de sobretensão e como o gráfico de geração mensal é afetado.

V. CONCLUSÕES

A partir do estudo do multicasos do presente artigo, foi possível analisar e perceber diversos fatores e parâmetros causadores de sobretensão, focando na sobretensão existente na rede de distribuição apenas por fatores de subdimensionamento desta. Já de acordo com a Tabela 4 pôde-se concluir que a sobretensão ocorre de fato tanto em UFVs nos grandes centros urbanos e condomínios de médio e alto padrão devido a injeção de energia na rede, quanto em usinas geradoras localizadas em zonas rurais e cidades do RN na qual a BT não foi projetada para receber as usinas, mesmo as de baixa potência instalada.

Pode-se afirmar ainda que a sobretensão analisada não é caracterizada por fatores temporários da rede, uma vez que a todas as UFVs apresentaram um nível de tensão superior ao nominal durante 3 meses ou mais. Portanto, esta sobretensão é considerada um regime permanente e pode acarretar danos econômicos através da queima de equipamentos elétricos e eletrônicos aos consumidores durante o tempo, sendo a concessionária, a responsável por ressarcir os clientes em caso de queima ou invalidez.

Além da provável perda econômica de bens materiais, é visível ainda que o baixo rendimento das usinas traz ao consumidor uma perda financeira, visto que as usinas geradoras são consideradas investimentos rentáveis. A partir da análise das Tabelas 5 e 6, pode-se assumir que a geração desperdiçada por causa de fatores diferentes dos climáticos e temporais, é superior a 3 MWh/mês quando considerados apenas 8 clientes consumidores e 9 MWh/mês quando extrapolado para as 24 unidades estudadas.

Vale ressaltar ainda que no RN existem diversas UCs que passam pela situação do nível de tensão elevado nas quais não foram consideradas no presente artigo. Sendo assim, se faz necessário por parte da concessionária a avaliação constante das suas redes de BT para avaliar se o atendimento dos consumidores está conforme prevê as normas da ANEEL.

A revisão do projeto existente das linhas de distribuição é de extrema importância para entender e identificar formas de adaptar as linhas de distribuição para receberem a energia ativa injetada pelas usinas fotovoltaicas. A constante variação das Normas e Padrões da COSERN tentam, de forma teórica, minimizar os impactos da Geração Distribuída na rede. No entanto, ainda há pouca intervenção e mudanças práticas na rede para que esta se adapte ao futuro da larga produção de energia por parte dos consumidores.

A pouca mobilização da concessionária para adequar as redes de BT se dá principalmente devido aos custos elevados que demandaria tais mudanças. A adequação dos condutores e a implementação de novas tecnologias seriam itens indispensáveis para adequar as linhas.

Pode-se observar através do estudo das usinas 3, 6, 7, 17 e 23 que apenas a mudança no TAP do transformador pode ser suficiente para adequar os níveis da tensão de fornecimento dos consumidores finais. Sendo assim, para a atualização das redes se faz necessário a implementação de transformadores que possuam reguladores de TAP automáticos, visto que a maioria dos transformadores existentes atualmente implementados nos postes, são tipo TAP regulável manual.

Portanto, a partir da análise amostral deste artigo, é possível concluir que a rede da concessionária de energia elétrica do Rio Grande do Norte não é totalmente adequada

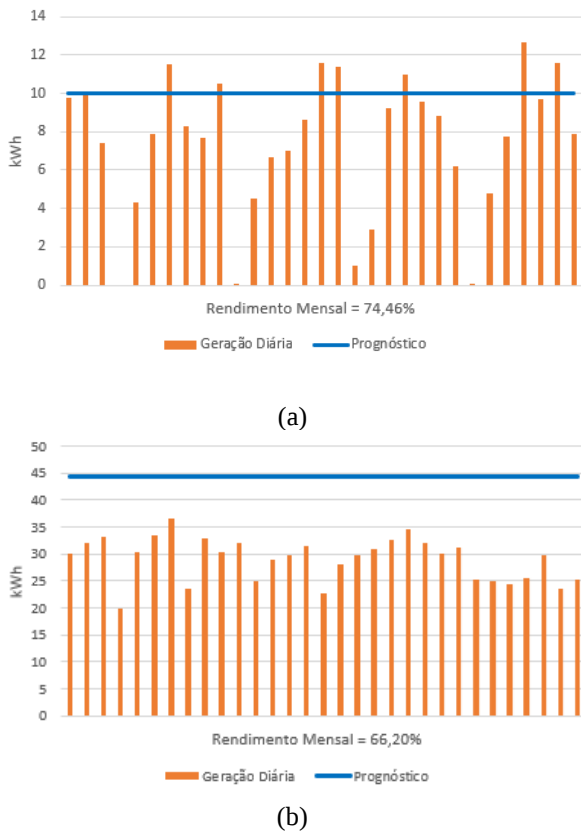


Fig. 5. Gráfico da geração mensal das usinas 3 (a) e 21 (b) durante o problema de sobretensão.

A partir das Figuras 6 (a) e (b) é possível entender como se comporta a geração de uma usina saudável após a intervenção da concessionária para ajustar a rede de distribuição aos parâmetros nominais.

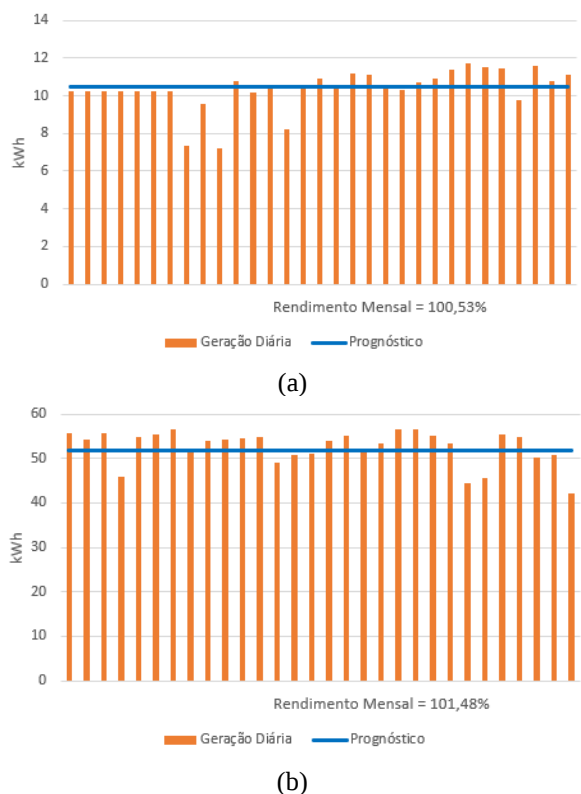


Fig. 6. Gráfico da geração mensal das usinas 3 (a) e 21 (b) após a normalização da tensão da rede.

para receber o fluxo de potência ativa advinda de usinas fotovoltaicas geradoras de energia. Este fato é comprovado pela presença da sobretensão em diversas cidades e municípios do estado, seja pela falta de reguladores de tensão ou transformadores suficientes para manter o nível de tensão estável para os consumidores finais.

Visando aprimorar o presente tema abordado, é sugerido seguintes trabalhos futuros:

- De forma prática, analisar o quanto as usinas fotovoltaicas geradoras de energia impactam na rede da COSERN, em termos de qualidade de energia.
- Analisar a viabilidade e os custos necessários para adequar minimamente as linhas de distribuição das concessionárias para suportar o fluxo de potência em ambos os sentidos: gerador – consumidor, e consumidor - gerador.

REFERÊNCIAS

- [1] REN21 (Paris). RENEWABLES 2021. GLOBAL STATUS REPORT, Paris, 2021. Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf. Acesso em: 27 ago. 2021.
- [2] MCNUTT, Peter; HAMBRICK, Joshua; KEESEE, Michael; BROWN, David. Impact of SolarSmart Subdivisions on SMUD's Distribution System. National Renewable Energy Laboratory: Innovation for Our Energy Future, United States of America, July 2009. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/46093.pdf>. Acesso em: 8 set. 2021.
- [3] Sjeff. COBBEN, Bruno. GAIDDON, and Hermann. LAUKAMP, "WP4 – Deliverable 4.3 - Impact of Photovoltaic Generation on Power Quality in Urban Areas with High PV Population," EIE/05/171/SI2.420208, 2008.
- [4] YUZURU, Ueda; KOSUKE, Kurokawa; TAKAYUKI, Tanabe; KIYOYUKI, Kitamura; HIROYUKI, Sugihara. Analysis results of output power loss due to the grid voltage rise in grid-connected photovoltaic power generation systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics, [s. l.], v. 55, ed. 7, p. 2744-2751, Julho 2008. DOI 10.1109/TIE.2008.924447. Disponível em: <https://tus.elsevierpure.com/en/publications/analysis-results-of-output-power-loss-due-to-the-grid-voltage-ris>. Acesso em: 15 out. 2021.
- [5] ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Revisão 10, 2018.
- [6] TONKOSKI, Reinaldo; LOPES, Luiz; EL-FOULY, Tarek. IEEE Transactions on Sustainable Energy. Coordinated Active Power Curtailment of Grid Connected PV Inverters for Overvoltage Prevention, [s. l.], v. 2, ed. 2, p. 139 - 147, 10 dez. 2010. DOI 10.1109/TSTE.2010.2098483. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5664808?arnumber=5664808>. Acesso em: 28 set. 2021.
- [7] POMILIO, José. Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica. CONVERSORES CC/CA - INVERSORES, [s. l.], 2010. Disponível em: <https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it744/%25CAP4.pdf>. Acesso em: 29 set. 2021.
- [8] MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR (Brasil). INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL-INMETRO. Portaria nº 004, de 04 de janeiro de 2011. Rio de Janeiro, 4 jan. 2011. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/rtac001652.pdf>. Acesso em: 22 out. 2021.
- [9] FUSION Solar. [S. l.]: HUAWEI, 2021. Disponível em: <https://la5.fusionsolar.huawei.com/>. Acesso em: 6 set. 2021.
- [10] SOLARVIEW. [S. l.]: SOLARVIEW, 2021. Disponível em: <https://my.solarview.com.br/light>. Acesso em: 6 set. 2021.
- [11] GIL, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 176 p. Disponível em:

<https://docplayer.com.br/60280265-Antonio-carlos-gil-como-elaborar-projetos-de-u-i-sa.html>. Acesso em: 10 out. 2021.

- [12] SOLARZ. [S. l.]: SOLARZ, 2021. Disponível em: <https://app.solarz.com.br/>. Acesso em: 6 set. 2021.