

ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DE PERFIL DA TENSÃO ELÉTRICA EM REGIME PERMANENTE NO PONTO DE CONEXÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

José Bione de Melo Filho (IFPE / Chesf) - jbionef@bol.com.br

JOSÉ GENILSON DE AZEVEDO (UPE) - jgen_7@hotmail.com

Resumo:

Este artigo tem como objetivo apresentar o comportamento da tensão elétrica no Ponto Comum de Conexão (PCC), no contexto de qualidade da energia injetada na rede elétrica, através de inversores de diferentes tipos e fabricantes durante um período de operação de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR), tomando como estudo de caso o sistema fotovoltaico da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf), instalado no seu almoxarifado na cidade de Abreu e Lima, situada no estado de Pernambuco, com as etapas de instalação do analisador no ponto de conexão com a rede elétrica, medição da tensão elétrica, construção gráfica, verificação técnica das medições, e descrição de diagnóstico. Dos resultados alcançados na pesquisa, o índice de Duração Relativa da Transgressão para Tensão Precária (DRP) apresentou-se muito superior ao limite de 3 %, cuja média geral ficou em torno de 6,6 %. A tensão precária máxima medida foi 232,9 V, e a mínima medida foi 231,1 V. O índice de Duração Relativa da Transgressão para Tensão Crítica (DRC) se manteve com média mensal de 0,5 % entre agosto e novembro de 2017. Porém, de dezembro de 2017 em diante, após a entrada em operação dos inversores da SUNGROW, o indicador evoluiu, chegando a uma média de 5,9 %, quase 12 vezes o máximo permitido. A tensão crítica máxima medida foi 239,8 V, e a mínima medida foi 0 V, exemplificando impactos na rede elétrica que podem ocorrer na presença da Geração Distribuída (GD).

Palavras-chave: *Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede, Inversores, Tensão Elétrica.*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Controle e monitoramento de sistemas fotovoltaicos*

ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DE PERFIL DA TENSÃO ELÉTRICA EM REGIME PERMANENTE NO PONTO DE CONEXÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

José Bione de Melo Filho – jbionef@bol.com.br

Universidade de Pernambuco, Departamento de Gerência Setorial de Pós-Graduação e Pesquisa da POLI/UPE

José Genilson de Azevedo – jgen_7@hotmail.com

Universidade de Pernambuco, Departamento de Gerência Setorial de Pós-Graduação e Pesquisa da POLI/UPE

Resumo. Este artigo tem como objetivo apresentar o comportamento da tensão elétrica no Ponto Comum de Conexão (PCC), no contexto de qualidade da energia injetada na rede elétrica, através de inversores de diferentes tipos e fabricantes durante um período de operação de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR), tomando como estudo de caso o sistema fotovoltaico da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf), instalado no seu almoxarifado na cidade de Abreu e Lima, situada no estado de Pernambuco, com as etapas de instalação do analisador no ponto de conexão com a rede elétrica, medição da tensão elétrica, construção gráfica, verificação técnica das medições, e descrição de diagnóstico. Dos resultados alcançados na pesquisa, o índice de Duração Relativa da Transgressão para Tensão Precária (DRP) apresentou-se muito superior ao limite de 3 %, cuja média geral ficou em torno de 6,6 %. A tensão precária máxima medida foi 232,9 V, e a mínima medida foi 231,1 V. O índice de Duração Relativa da Transgressão para Tensão Crítica (DRC) se manteve com média mensal de 0,5 % entre agosto e novembro de 2017. Porém, de dezembro de 2017 em diante, após a entrada em operação dos inversores da SUNGROW, o indicador evoluiu, chegando a uma média de 5,9 %, quase 12 vezes o máximo permitido. A tensão crítica máxima medida foi 239,8 V, e a mínima medida foi 0 V, exemplificando impactos na rede elétrica que podem ocorrer na presença da Geração Distribuída (GD).

Palavras-chave: Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede, Inversores, Tensão Elétrica.

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento expressivo do uso de uma tecnologia praticamente iniciante na operação do sistema elétrico no Brasil, manter os requerimentos de um sistema fotovoltaico, com relação à qualidade da energia, é um desafio tecnicamente significativo. Diversos trabalhos desenvolvidos no Brasil e no mundo mostram dificuldades técnicas encontradas no funcionamento de SFCR, principalmente com relação à adequação do sistema à rede elétrica conectada (Santiago, 2018). A quantidade destes sistemas e a respectiva potência instalada podem proporcionar impactos provenientes do aumento da potência injetada nas redes de distribuição (Almeida, 2018). O comportamento da tensão no PCC também pode sofrer impactos de acordo com a forma de instalação dos componentes e equipamentos do sistema. O fornecimento de energia elétrica às Unidades Consumidoras (UCs) tem como premissa o mantimento do nível de tensão de acordo com os limites aceitáveis pela regulação. De acordo com o módulo 8 do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), os valores de tensão crítica e precária para cada nível de tensão nominal auxiliam na análise do perfil da tensão fornecida, indicando o seu grau de anormalidade. A interação entre a potência injetada pelas unidades de GD com a rede possibilita mudanças na magnitude da tensão no ponto de conexão, que cresce à medida que mais painéis sejam conectados à rede e que depende também da incidência solar e de fatores como a configuração do alimentador, a localização geográfica da GD e o funcionamento dos outros sistemas de controle de tensão, tais como os bancos de capacitores chaveáveis e os transformadores e reguladores com *taps* (MME, 2017). Um comportamento não desejado da tensão pode afetar a regulação do sistema existente, comprometendo até mesmo a vida útil de equipamentos chaveados por aumento de manobras. Neste contexto, foi realizada uma análise de perfil da tensão elétrica no PCC de um SFCR da Chesf, indicando seu comportamento em termos de qualidade da energia, sendo os inversores os principais equipamentos do sistema para a pesquisa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O SFCR Chesf (localizado no Parque de Materiais da Companhia em Abreu e Lima-PE) utilizado na pesquisa é composto por 252 módulos solares tipo KC130TM, fabricante KYOCERA, com dimensões de 1,425 x 0,652 (m x m). Cada módulo possui, nas condições normais de operação, potência de 130 Wp, tensão de máxima potência de rastreamento, conhecida em inglês como *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), de 17,6 V, corrente de MPPT de 7,39

A, tensão em Corrente Contínua (CC) de circuito aberto de 21,9 V, corrente de curto-circuito de 8,02 A, máxima tensão em CC de sistema de 600 V, com eficiência máxima de aproximadamente 16 %.

Os módulos estão associados em série e paralelo, totalizando uma potência em CC de 32,76 kWp, e divididos em *strings*, sendo conectados à rede da Concessionária local por meio de cinco inversores. O sistema abrange uma área de aproximadamente 700 m², com capacidade de geração de energia elétrica de até 5,11 MWh mensal, correspondendo até 12 % do consumo em Corrente Alternada (CA) da UC local. Têm na sua configuração dez *strings* (oito de 27 módulos cada e dois de 18 módulos cada), dois inversores trifásicos de 12 kW, fabricante SMA, conectados (cada conversor) a três *strings* de 27 módulos, e três inversores monofásicos de 5 kW, fabricante SUNGROW (para dois inversores, cada um está conectado a uma *string* de 27 módulos, e o terceiro está conectado a duas *strings* de 18 módulos). O SFCR Chesf está conectado à rede de Média Tensão (MT) da Distribuidora por meio de um transformador trifásico a óleo de 75 kVA, 3,33 %, 13.800 / 380 – 220 V, parcialmente dedicado à planta fotovoltaica. Para a amostra de medições da pesquisa, o analisador de qualidade foi conectado, no PCC, a um inversor da SMA (no primeiro cenário), de tipo *string* sem transformador, com duas entradas de MPPT (SMA, 2014) e a um inversor da SMA e a um da SUNGROW (no segundo cenário), este último de tipo *string* com transformador, modelo SG5K-B (SUNGROW, 2012), para fins de referência dos fabricantes nas medições.

O estudo do perfil da tensão elétrica no PCC ocorreu em dois momentos. Uma parte nas instalações do SFCR Chesf em Abreu e Lima, através de um analisador de rede, e outra parte em escritório para investigação dos dados medidos. A Fig. 1 a seguir apresenta o sistema fotovoltaico no referido Parque.



Figura 1 – SFCR Chesf no Parque de Materiais em Abreu e Lima-PE.

2.1 Analisador de energia

Para as medições das grandezas elétricas, foi utilizado um analisador de qualidade de energia, modelo ET-5061C, fabricante MINIPA, dotado do *software Topview* para verificação dos valores medidos. Dentro de suas funções, destacam-se a visualização em tempo real dos valores numéricos de qualquer parâmetro elétrico de sistemas monofásicos, trifásicos a três fios e a quatro fios, análise harmônica de tensões e corrente até 49ª ordem, anomalias de tensão (surtos e quedas) com resolução de 10 ms, desbalanceamento, medições de corrente que aparece na energização de um transformador (*inrush*), histogramas e gráficos de análises harmônicas e diagramas vetoriais de ângulos mútuos entre tensões e correntes, entre outras (MINIPA do Brasil, 2011).

A prática das medições ocorreu no abrigo dos inversores do SFCR Chesf, fixando pontos específicos no quadro geral para aquisição dos valores de grandezas elétricas determinadas. As leituras das grandezas ocorreram no PCC do lado de Baixa Tensão (BT). Os pontos com os conectores tipo “jacaré” foram ajustados para capturar sinais de tensão de fase, e tensão entre neutro e terra (MINIPA do Brasil, 2011). A Fig. 2 a seguir mostra o esquema de ligação no local.

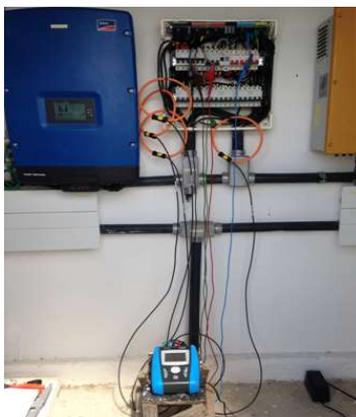


Figura 2 – Instalação do Analisador de Qualidade de Energia ET-5061C no SFCR Chesf.

2.2 Normas e Procedimentos

Buscando um diagnóstico com sólidos argumentos técnicos, foram adotadas normas e procedimentos relevantes que auxiliaram a pesquisa na verificação dos valores medidos das grandezas elétricas do SFCR em questão. Para o desenvolvimento da avaliação da qualidade da tensão elétrica através da operação dos inversores no sistema fotovoltaico, é importante conhecer as condições técnicas consideradas normais ou toleráveis, comparando os valores reais com os de referência, obtendo-se conclusões concretas com fundamentos técnicos expressivos.

Módulo oito – PRODIST. Procedimentos de distribuição são documentos desenvolvidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), normatizando e padronizando as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2018). O módulo oito estabelece os procedimentos referentes à qualidade da energia elétrica, explanando a qualidade do produto e a qualidade do serviço. Este módulo refere-se à qualidade da energia vinculada à tensão, distorções harmônicas, frequência, fator de desequilíbrio, e ao fator de potência.

NOR.DISTRIBU-ENGE-0002. Conexão de microgeradores ao sistema de distribuição da Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), Concessionária local, fornecendo orientações básicas e requisitos técnicos para conexões ou alterações de conexões existentes. Sendo a principal norma da Distribuidora para sistemas fotovoltaicos de até 75 kW em CA, a norma da CELPE estabelece os requisitos mínimos de acesso e qualidade para o correto funcionamento de pequenos sistemas geradores de energia elétrica conectados à rede de distribuição.

2.3 Análise da tensão no PCC com o SFCR Chesf em operação

A realização das medições no SFCR Chesf ocorreu entre julho de 2017 e junho de 2018, registrando um total de 42.940 pontos de medição, num intervalo de 10 minutos entre cada ponto, para cada grandeza medida. Isto representa cerca de 80 % das medições possíveis de serem realizadas, pois os demais 20 % não foram efetivados por diversos motivos, tais como paradas para manutenção do Parque de Materiais, manutenção no próprio SFCR, faltas de fornecimento de tensão pela Distribuidora, etc. Durante as medições, o período diário de radiação solar estendeu-se, em média, entre 5h26min e 17h26min. A operação dos inversores ocorreu em dois cenários, criados de acordo com a disponibilidade operacional do sistema solar para a pesquisa: um com somente os inversores da SMA em operação (entre julho e novembro de 2017) e outro com todos os inversores da SMA e SUNGROW em operação (entre dezembro de 2017 e junho de 2018). No primeiro cenário, foram coletadas as medições referentes a um dos inversores da SMA, conforme a Fig. 3 a seguir.

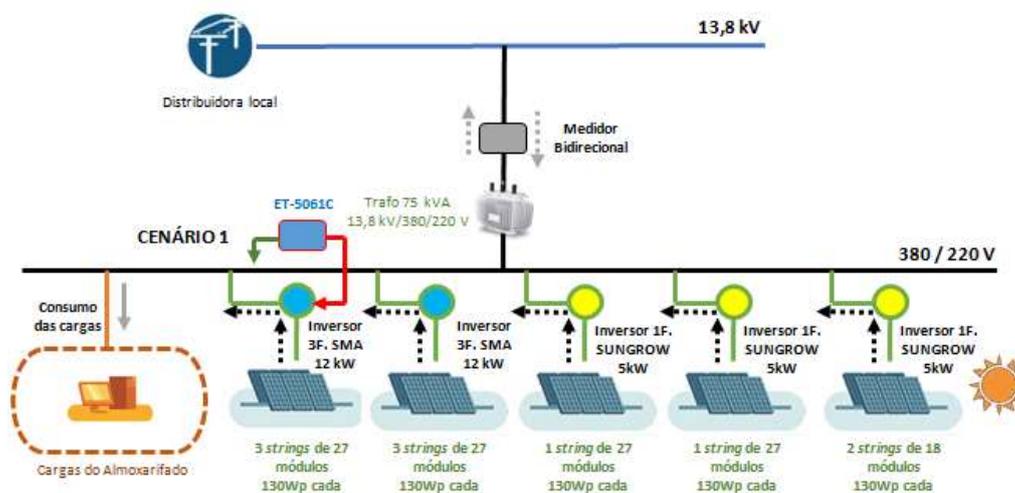


Figura 3 – Esquema funcional do SFCR Chesf no Cenário 1.

Já no segundo cenário, foram coletadas as medições referentes a um dos dois inversores da SMA e a um dos três inversores da SUNGROW (cada inversor da SUNGROW esteve conectado a uma das fases), conforme a Fig. 4 a seguir.

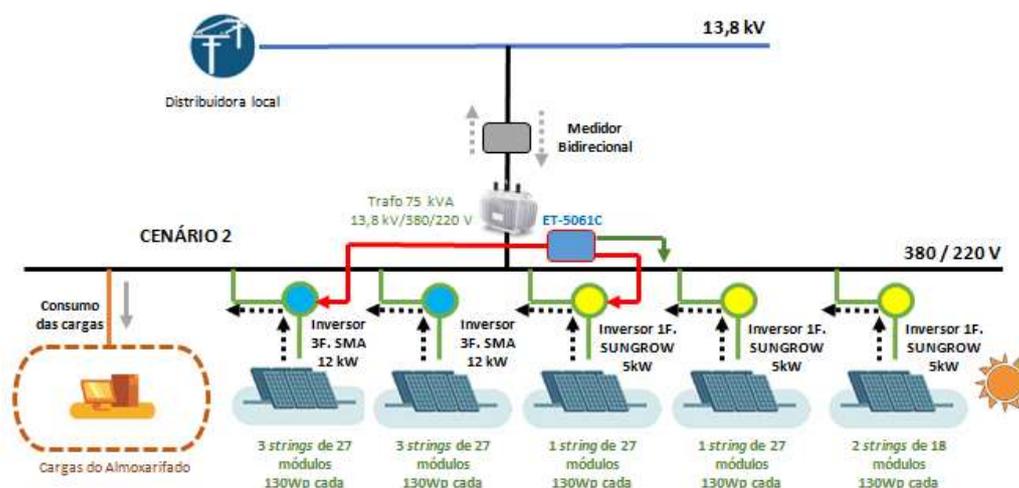


Figura 4 – Esquema funcional do SFCR Chesf no Cenário 2.

3. INDICADOR AVALIADO NA PESQUISA – TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

A tensão em regime permanente da rede elétrica de distribuição deverá ser fornecida à UC de modo satisfatório, dentro dos limites estabelecidos pelas normas em vigor. A Tab. 1 a seguir mostra a classificação da tensão em regime permanente em pontos de conexão igual ou inferior a 1 kV (380/220 V), por meio de posições chamadas de Adequada, Precária e Crítica (ANEEL, 2018).

Tabela 1 – Pontos de Conexão em Tensão Nominal Igual ou Inferior a 1 kV (380/220).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(350 < TL < 399) / (202 < TL < 231)$
Precária	$(331 < TL < 350 \text{ ou } 399 < TL < 403) / (191 < TL < 202 \text{ ou } 231 < TL < 233)$
Crítica	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403) / (TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

É dever dos sistemas de geração distribuída cessar a injeção da energia na rede elétrica local em situações consideradas anormais de tensão. A Tab. 2 a seguir mostra as condições de tensão e o tempo máximo de desligamento esperado pelos sistemas fotovoltaicos no PCC para as condições anormais (CELPE, 2016).

Tabela 2 – Resposta às condições anormais de tensão.

Tensão no PCC (% em relação à V nominal)	Tempo máximo de desligamento
$V < 80 \%$	0,4 s
$80 \% \leq V \leq 110 \%$	Regime normal de operação
$110 \% < V$	0,2 s

4. RESULTADOS E ANÁLISE

Com as medições efetivadas em campo, foram gerados alguns gráficos vinculados ao estudo, promovendo assim a observância do comportamento da tensão no PCC com o sistema fotovoltaico em operação juntamente com a Concessionária. Para maior precisão das informações, os valores medidos foram comparados com os normativos e procedimentos vigentes, de modo a validar tecnicamente os resultados do diagnóstico. Esta pesquisa limitou-se aos modelos e fabricantes dos inversores disponíveis no SFCR Chesf.

4.1 Comportamento da tensão

Com as medições diárias das tensões monofásicas em regime permanente no PCC, e comparando-se os valores medidos com os limites indicados na Tab. 1, verificou-se que na fase 1 em cerca de 92,6 % das medições o fornecimento foi de forma **Adequada**, em 4,3 % o fornecimento foi de forma **Precária**, e em 3,1 % foi de forma **Crítica**. Já na fase 2,

em cerca de 92,9 % o fornecimento foi de forma **Adequada**, em 3,9 % foi de forma **Precária**, e em 3,2 % foi **Crítica**. Na fase 3, 89,4 % representou a forma **Adequada**, 6,7 % **Precária**, e 3,9 % **Crítica**. A Tab. 3 a seguir resume estes argumentos em números quantitativos de pontos de medição em cada fase, apresentando as classificações das tensões. Para o status de **Crítica**, em 71 medições as tensões ficaram abaixo de 176 V, chegando a zero. Dentro destas leituras, ocorreram **INTERRUPÇÕES** de fornecimento de tensão nas três fases por diversos motivos, tais como interrupção de energia pela Concessionária, manutenções, entre outros.

Tabela 3 – Classificação das tensões de Atendimento conforme PRODIST 8.

Status	V1	V2	V3
Adequada	39.775	39.896	38.387
Crítica	1.325	1.352	1.657
Precária	1.840	1.692	2.896
Total	42.940	42.940	42.940

Frente ao aparecimento de tensões classificadas como Precária e Crítica, foi necessário avaliar o comportamento de dois indicadores definidos no módulo oito do PRODIST. Após a obtenção do conjunto de leituras válidas, quando de medições oriundas por reclamação ou amostrais, devem ser calculados os índices de Duração Relativa da Transgressão para Tensão Precária (*DRP*) e de Duração Relativa da Transgressão para Tensão Crítica (*DRC*), de acordo com a Eq. (1) e Eq. (2),

$$DRP = \left[\frac{nlp}{1008} \right] \cdot 100\% \quad (1)$$

$$DRC = \left[\frac{nlc}{1008} \right] \cdot 100\% \quad (2)$$

sendo *nlp* (Número de Leituras Precárias) e *nlc* (Número de Leituras Críticas) a representação do maior valor entre as fases do número de leituras situadas nas faixas precária e crítica, respectivamente (ANEEL, 2018). O limite do *DRP* permitido pelo PRODIST é de 3 %, enquanto o *DRC* é de 0,5 %. Foi possível coletar os indicadores supracitados em 42 pacotes de medições válidas, com 1008 registros em cada pacote (equivalente a uma semana de leituras), num intervalo de 10 minutos entre cada leitura.

Para a análise do *DRP* utilizando a Eq. (1), conforme indicado no módulo oito do PRODIST, foi traçada em cada mês a média do indicador dentro dos pacotes de medições daquele mês. Como de julho a novembro de 2017 o inversor do fabricante SMA esteve em operação, enquanto entre dezembro de 2017 e junho de 2018 os inversores da SMA e SUNGROW operaram no SFCR Chesf em conjunto, foi possível traçar a curva de desempenho do indicador, considerando os dois cenários de operação. A Fig. 5 a seguir apresenta o resultado mensal.



Figura 5 – Curva de desempenho do índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (*DRP*) médio mensal.

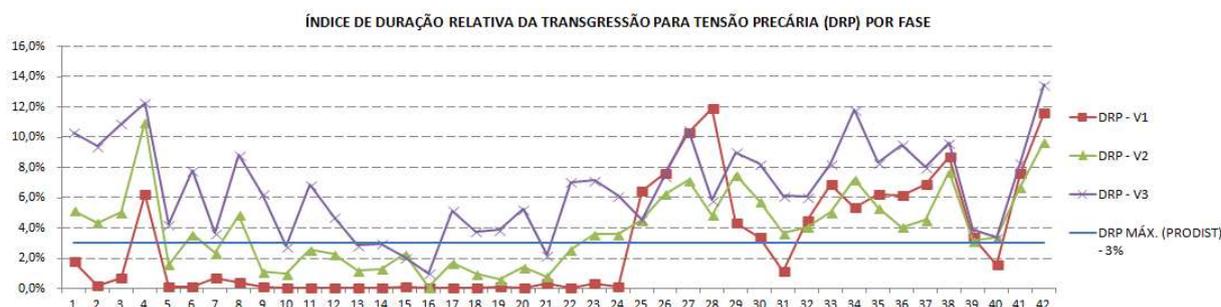
De forma geral, o *DRP* apresentou-se muito superior ao limite permitido pelo PRODIST. A média geral ficou em torno de 6,6 %. O maior nível de tensão precária foi registrado nas fases 1 e 2, com valor de 232,9 V, enquanto o mínimo registrado foi 231,1 V praticamente nas três fases. Sobre os cenários com os inversores, percebeu-se que no período em que somente o equipamento da SMA esteve em operação, o *DRP* já se encontrava acima do limite permitido, com valor médio mensal de 5,6 %, e tensão máxima e mínima respectivamente de 232,9 V e 231,1 V. Já no período de operação

com os inversores dos dois tipos, o *DRP* médio mensal encontrado elevou-se para 7,0 % (isto corresponde a um acréscimo de 25 % do cenário anterior), mantendo as tensões máxima e mínima respectivas de 232,9 V e 231,1 V, com aumento do número de leituras da tensão precária. A Tab. 4 a seguir mostra os detalhes dos valores de tensão precária encontrados nos pacotes de medição, cuja grande maioria foi registrada nos períodos da geração fotovoltaica, principalmente entre 10h06min e 13h06min (intervalo de maior intensidade de irradiação). Na fase 3 (fase de maior impacto), das 2896 leituras consideradas precárias, a média mensal subiu aproximadamente de 196 (cenário SMA) para 274 leituras (cenário SMA e SUNGROW).

Tabela 4 – *nlp* entre fases.

<i>nlp</i> entre fases			
Fase	<i>nlp</i> (Total)	<i>nlp</i> (entre 5h26 e 17h26)	<i>nlp</i> (entre 10h06 e 13h06)
V1	1840	1664	714
V2	1692	1484	742
V3	2896	2472	1104

Diante dos resultados encontrados do *DRP*, e verificando os períodos de registro das medições, percebeu-se que o SFCR no primeiro cenário já contribuía na sobretensão no PCC, principalmente nos períodos de maior carregamento do inversor da SMA, enquanto no segundo cenário a sobretensão foi intensificada com a presença dos inversores monofásicos da SUNGROW. Na fase 3 foi observada forte contribuição nos altos valores. Para uma análise mais detalhada, a Fig. 6 a seguir mostra o *DRP* para cada fase em todos os pacotes, evidenciando o forte impacto da fase 3 no indicador. Pela linha limite, verificou-se que o *DRP* da fase 3 praticamente esteve acima dos 3 % permitidos em toda curva traçada no ano. Após a entrada dos inversores da SUNGROW, o *DRP* em cada fase teve um aumento expressivo. Conforme já mencionado anteriormente, o *nlp* considerado no cálculo do *DRP* é o maior valor entre as fases.

Figura 6 – Curva de desempenho média mensal do *DRP* em cada pacote de medições.

Já para análise do *DRC*, através da Eq. (2), também foi traçada para cada mês a média dos valores do indicador dentro dos pacotes de medições daquele mês. A Fig. 7 a seguir apresenta o resultado mensal. Analisando a curva da mesma maneira que a do *DRP*, notadamente entre agosto e novembro de 2017, o *DRC* se manteve com média mensal de 0,5 %, praticamente dentro do valor limite. Porém, de dezembro de 2017 em diante o indicador evoluiu, chegando a uma média de 5,9 %, quase 12 vezes o máximo permitido, evidenciando no segundo cenário um impacto significativo após a entrada em operação dos inversores da SUNGROW. O maior nível de tensão crítica encontrada foi na fase 2, com valor de 239,8 V, e o mínimo encontrado foi 0 V nas três fases.

Figura 7 – Curva de desempenho do índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica (*DRC*) médio mensal.

Numa análise mais detalhada, a Fig. 8 a seguir mostra o *DRC* nas três fases, evidenciando mais uma vez a forte influência dos inversores da SUNGROW (principalmente o da fase 3) no aumento deste indicador (do pacote nº 16 em diante).

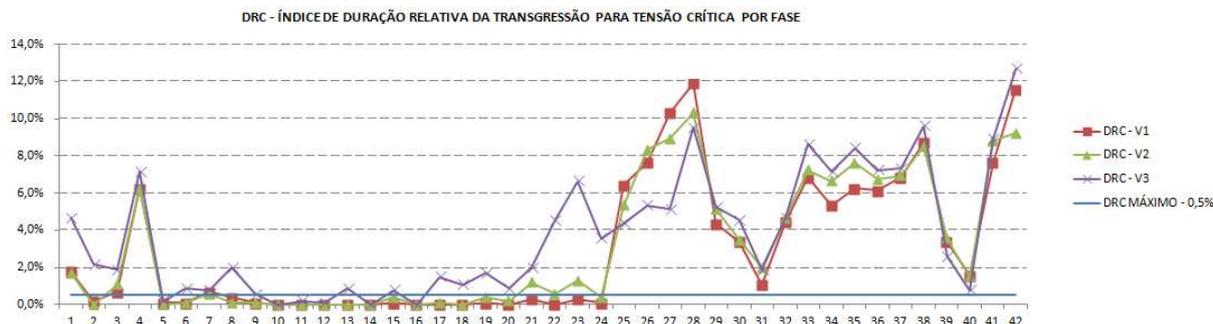


Figura 8 – Curva de desempenho do *DRC* médio mensal em cada pacote de medições.

Os inversores com tecnologia mais moderna possuem bancos de capacitores e indutores para controle de injeção de reativo à rede. Inversores mais antigos que não possuem este controle podem proporcionar tensões ainda mais elevadas, com valores distantes dos considerados adequados.

A Tab. 5 a seguir mostra os detalhes dos valores de tensão classificados como crítica encontrados nos pacotes de medição, onde quase todos os registros ocorreram no período da fotogeração, principalmente entre 10h06min e 13h06min.

Tabela 5 – *nlc* entre fases.

Fase	<i>nlc</i> entre fases		
	<i>nlc</i> (Total)	<i>nlc</i> (entre 5h26 e 17h26)	<i>nlc</i> (entre 10h06 e 13h06)
V1	1325	1302	891
V2	1352	1320	909
V3	1657	1617	1071

A grande maioria dos valores de tensão crítica foi acima de 233 V (cerca de 95 %), encontrada no período de geração, desqualificando os níveis de tensão no PCC. Em todas as tensões monofásicas, 0,2 % de suas respectivas medições apresentadas como **Críticas** descumpriram os limites estabelecidos na Tab. 2 (medições chamadas de **Críticas anormais**, pois seus valores foram abaixo de 176 V, chegando a zero). Dentro destas leituras, ocorreram INTERRUPÇÕES de fornecimento de tensão em 01/08/2017 (entre 6h56min e 8h36min), em 02/08/2017 (entre 10h56min e 15h56min), em 10/10/2017 (entre 17h16min e 17h26min), em 03/03/2018 (entre 13h56min e 14h46min) e 21/03/2018 (entre 15h46min e 19h06min). Os inversores da SMA e SUNGROW nestas datas e períodos desconectaram a planta da rede por proteção anti-ilhamento, reconectando-se logo após a normalização das tensões (no caso dos períodos que ainda existiam radiação suficiente). Como exemplo, para o dia 03/03/2018 a Fig. 9 e a Fig. 10 a seguir evidenciam a atuação dos inversores após a detecção da INTERRUPÇÃO, efetivando a desconexão da planta fotovoltaica. Como o analisador realizou medições em intervalos de 10 minutos, não foi possível verificar os tempos exatos de saída e entrada dos inversores para fins de comparação com os tempos descritos na Tab. 2. Após reestabelecimento das tensões, os referidos inversores voltaram a operar, atendendo assim às exigências da Tabela supracitada.

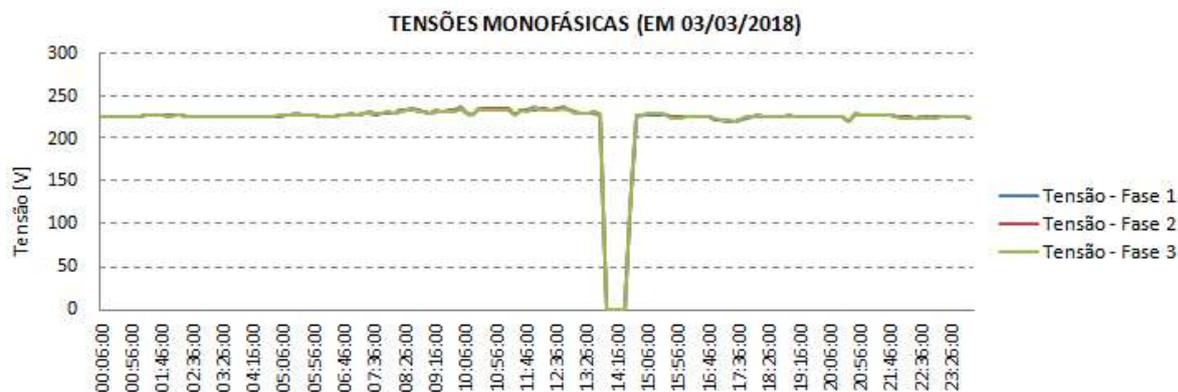


Figura 9 – Tensões monofásicas diárias (em 03/03/2018).

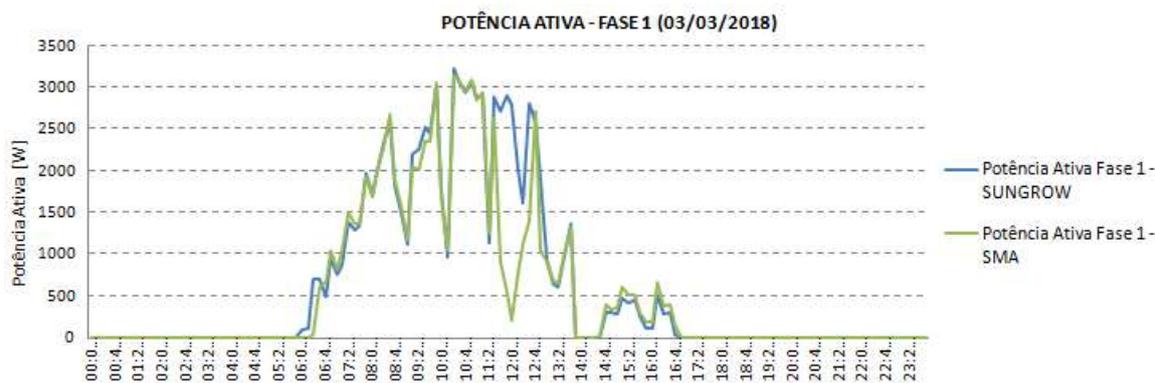


Figura 10 – Curva diária da potência produzida – SMA e SUNGROW (em 03/03/2018).

O valor médio e desvio padrão geral encontrado em todos os pacotes de medições da tensão na fase 1 foi de $226,7 \pm 1,5$ V, enquanto na fase 2 foi de $226,6 \pm 1,7$ V, e na fase 3 foi de $227,6 \pm 1,6$ V. A Fig. 11 a seguir mostra o comportamento médio diário mensal no PCC, apresentando uma elevação de tensão no período de geração.

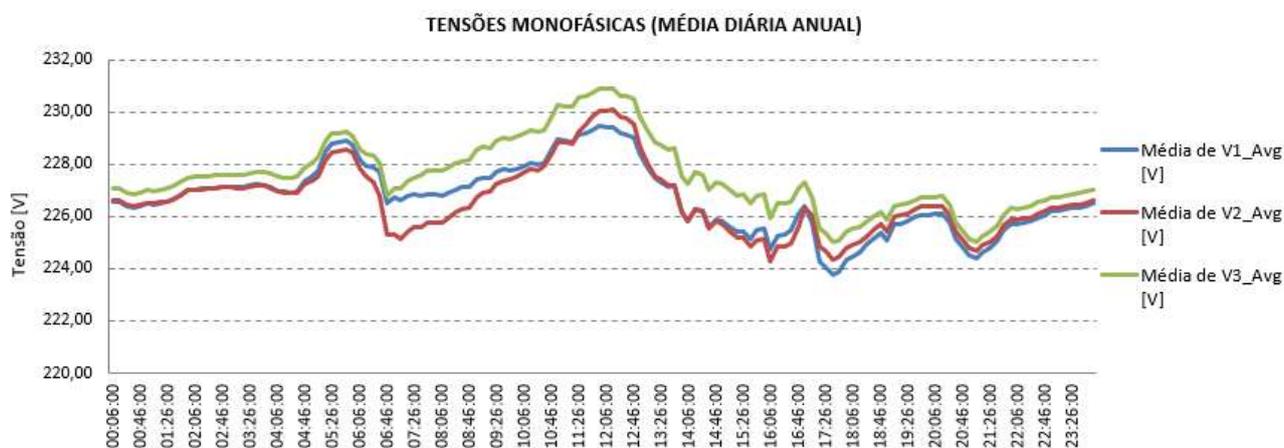


Figura 11 – Tensões Monofásicas (média diária mensal).

A tensão entre neutro e terra praticamente se manteve desprezível ao longo das medições, com valores entre 0 V e 0,99 V. A diferença de tensão entre neutro e terra em estado permanente não deve ultrapassar 10 V no ponto de conexão com o consumidor (Leão, 2014).

Os demais fenômenos de tensão (*FLICKER*, *NOTCHING*, *SPIKE*, etc.) não foram constatados durante todo o período das medições.

4.1.1 Análise Técnica

Uma das hipóteses para justificar o comportamento da tensão fora da margem da normalidade em determinados momentos de geração se refere à **impedância do circuito**. Como o sistema fotovoltaico é gerador, a tensão de saída dos inversores pode se elevar devido ao novo valor da tensão de referência (modificada com o aumento da queda de tensão no circuito provocada por diversos componentes, tais como cabos, transformador, número de conexões que envolvem o circuito, etc.). Esta elevação de tensão varia proporcionalmente com a corrente do sistema fotovoltaico injetada na rede elétrica. Isto explica a conduta da variação da tensão no PCC semelhante à curva de geração da planta fotovoltaica. Para melhor entendimento, pode-se verificar a impedância do circuito Z_{circ} de acordo com a Eq. (3) simplificada a seguir.

$$Z_{circ} = \frac{V_{pcc} - V_{conc}}{I_{circ}} (\Omega) \quad (3)$$

Com as leituras da tensão no ponto de conexão V_{pcc} e da corrente de saída dos inversores I_{circ} , considerando a tensão da Concessionária V_{conc} em condições normais de fornecimento, verificou-se a impedância do circuito Z_{circ} , em média, igual a $0,83 + j0,35 \Omega$ por fase (considerando o fator de potência médio igual a 0,92). Esta impedância resulta-se das contribuições da impedância do transformador refletido no lado de BT igual a $j0,064 \Omega$ (como durante a pesquisa não foi

possível o conhecimento da corrente de demanda máxima, o cálculo da impedância da rede foi estimado pela impedância do transformador conectado à planta fotovoltaica, devido à sua grande participação na impedância equivalente do sistema), da impedância do cabo total Z_{cb} igual a $0,067 + j0,004 \Omega$ (a resistência R e a reatância X do referido cabo são, respectivamente, $2,221 \text{ m}\Omega/\text{m}$ e $0,1207 \text{ m}\Omega/\text{m}$, para seção do condutor de saída CA do sistema fotovoltaico de 10 mm^2 , e comprimento do circuito L_c igual a 30 m), e da impedância Z_{perdas} devido a possíveis falhas nas conexões do circuito, perdas por efeito joule, entre outros (estimada em $0,76 + j0,28 \Omega$). Sugere-se também uma contribuição dos inversores monofásicos (que possuem transformador interno) no segundo cenário, devido à possibilidade de se fornecer corrente à rede em valores diferentes em cada fase, resultando em níveis elevados na tensão de saída do sistema fotovoltaico, como também pelo fato de estarem sobredimensionados, aumentando as perdas no circuito.

Outra hipótese se relacionou com uma provável contribuição da tensão fornecida pela Concessionária. Como esta tensão é referência para os inversores, um possível motivo seria a ocorrência de variações na própria tensão de referência.

O uso dos inversores em conjunto com a Concessionária proporcionou níveis de tensão que necessitam ser verificados, cujos inversores tiveram uma significativa participação para a referida anomalia. Tensões fora do intervalo considerado normal podem afetar determinados equipamentos tanto na questão operacional, como também na vida útil. Computadores, por exemplo, quando submetidos a tensões anormais podem ter seus componentes danificados, tais como fontes de tensão, placa mãe, entre outros. Seguem abaixo ações sugestivas para a mitigação da tensão no PCC.

- Substituição do cabo de saída de 10 mm^2 por outro de seção superior;
- Verificação de possíveis falhas de conexão, reduzindo-as ou corrigindo-as de forma significativa;
- Substituir os inversores monofásicos por um trifásico, considerando o critério de escolha pelo Fator de Dimensionando do Inversor (FDI);
- Caso necessário, solicitar à Concessionária a regulação da tensão de fornecimento.

4.2. Distorção Harmônica

Como observação, nos momentos de pouca geração a Distorção Harmônica Total de Corrente (*THDi*, em inglês) do SFCR teve um aumento considerável, chegando próximo a 25 %, e nos momentos de boa geração a valores abaixo dos 5 % permitidos (CELPE, 2016). A Fig. 12 a seguir mostra o comportamento dos harmônicos com os dois tipos de inversores em operação.

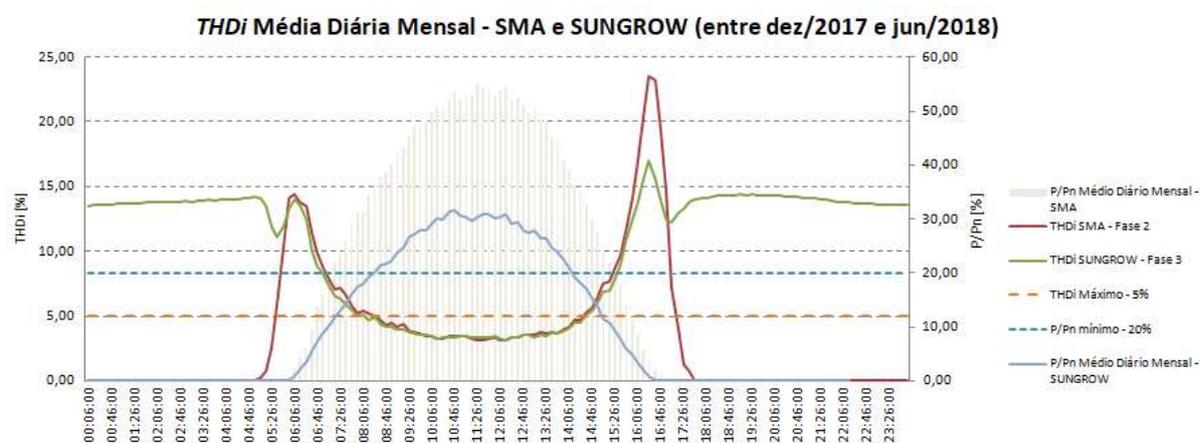


Figura 12 – *THDi* média diária mensal – SMA e SUNGROW.

4.2.1 Análise Técnica

A alta taxa de distorção pode estar vinculada às características internas dos inversores, como ao filtro de saída, ou ao tipo de controle por Modulação por Largura de Pulso (PWM, em inglês) dos inversores. Estes equipamentos são projetados para operar em condições nominais de potência, inclusive na busca do melhor ponto de MPPT dos módulos. Durante a fotogeração, a *THDi* da planta com o inversor da SMA ficou abaixo dos 5 % permitidos entre carregamentos acima de 32 %, num intervalo médio entre 8h06min e 14h26min, enquanto que para a operação da planta com os dois tipos de inversores, a *THDi* esteve abaixo dos 5 %, só que entre carregamentos acima de 20 % num intervalo médio entre 7h46min e 14h56min, ou seja, os inversores dos dois fabricantes operando em conjunto proporcionaram uma *THDi* abaixo do valor máximo, só que num intervalo maior, mesmo com carregamento total abaixo de 100 % (fato considerado positivo), sendo, portanto, respeitado o que se recomenda no normativo da CELPE. A geração harmônica de sistemas fotovoltaicos depende muito da porção de energia gerada. Os altos valores de *THDi* nos períodos de baixa geração não comprometem o sistema elétrico local. É importante destacar que a norma da Concessionária local indica que a distorção harmônica total de corrente deve ser inferior a 5 % na **potência nominal** do sistema de geração distribuída (CELPE, 2016).

5. CONCLUSÃO

Os resultados mostram que, o SFCR Chesf durante a fotogeração proporcionou um aumento da tensão no PCC, superando os limites estabelecidos pelo PRODIST 8, sendo uma das hipóteses, possíveis quedas de tensão provocadas pela impedância do circuito de saída. Observou-se também que, após a entrada em operação dos inversores da SUNGROW, a precariedade e a criticidade da tensão no PCC aumentaram de forma expressiva. Inversores, de acordo com sua tecnologia e tempo de operação, podem contribuir significativamente para o aumento da tensão na conexão à rede. A pesquisa traz como reflexão um dos impactos que a GD poderá causar nas redes de distribuição, que são as alterações nos níveis de tensão. Outra reflexão se refere aos impactos nas cargas, sendo mais significativos quanto mais próximo estiverem do PCC. Existe, portanto, a necessidade de uma análise dos sistemas de regulação pelas Concessionárias, de modo a manter um equilíbrio nos níveis de tensão, mesmo com a presença da GD.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Chesf pela grande oportunidade de disponibilizar seu Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede para realizar o estudo de caso.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Brasília, 2018. Disponível no site: www.aneel.gov.br.
- Almeida, G. L. S.; Jota, P. R. S., 2018. Estudo da elevação de tensão em redes de distribuição de energia elétrica com alta concentração de geradores, Belo Horizonte – Minas Gerais, VII CBENS - VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.
- Companhia Energética de Pernambuco (CELPE). Procedimento de Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição nº NOR.DISTRIBU-ENGE-0002. Recife, 2016. Disponível no site: www.servicos.celpe.com.br.
- Leão, R. P. S.; Sampaio, R. F.; Antunes, F. L. M. Harmônicos em Sistemas Elétricos. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 354 p.
- Minipa do Brasil, Analisador de Qualidade de Energia ET-5061C. Manual de Instruções, 2011. São Paulo/SP.
- Ministério de Minas e Energia (MME). Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (PROGD). Brasília, 2017. Disponível no site: www.mme.gov.br.
- Santiago, G. L. S.; Guerra, F. K. O. M. V.; Vale, M. R. B. G., 2018. Microgeração solar fotovoltaica conectada à rede: análise da qualidade da energia, Mossoró – Rio Grande do Norte, VII CBENS - VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.
- SMA *Solar Technology*, Sunny Tripower Inverter 12000TL. Instruções de Serviço. Niestetal, 2014. Disponível no site: www.sma-solar.com.
- SUNGROW *Power Supply*, Inverter SG5K-B. Manual User. Hefei, 2012. Disponível no site: www.en.sungrowpower.com.

CASE STUDY: PROFILE ANALYSIS OF THE ELECTRICAL VOLTAGE IN PERMANENT REGIME AT THE POINT OF CONNECTION OF A PHOTOVOLTAIC SYSTEM CONNECTED AT ELECTRIC GRID

Abstract. *This article has purpose to show the behavior of the electric voltage at the Connection Common Point (PCC), in the context of the quality of the energy injected at electric grid, through the inverters of different manufacturers during a period of operation at Grid Connected Photovoltaic System (SFCR), taking as a case study the photovoltaic system of Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf) installed in the warehouse in Abreu e Lima, state of Pernambuco, with tasks of installation of the analyzer at point of connection of the electric grid, voltage measurement, graphic construction of measurements data, technical analysis, and description of the results of the analysis. Within the results found in the research, the Relative Duration of Transgression for Precarious Voltage (DRP) was beyond the limit of 3 %, with general average of around 6.6 %. The maximum measured precarious voltage was 232.9 V, and the minimum measure was 231.1 V. The Relative Duration of Transgression for Critical Voltage (DRC) monthly average was about 0.5 % between August and November 2017. But, from December 2017 onwards, after the startup of the SUNGROW inverters, the indicator evolved, reaching an average of 5.9 %, almost 12 times the maximum allowed. The maximum measured critical voltage was 239.8 V, and the minimum measurement was 0 V, reflecting impacts on the electric grid that may occur in presence of Distributed Generation (GD).*

Key words: *Grid Connected Photovoltaic System, Inverters, Electrical Voltage.*