

ANÁLISE COMPORTAMENTAL DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE SISTEMAS FV CONECTADOS À REDE SOB A INFLUÊNCIA DO EFEITO BORDA DE NUVEM

Vanuza Alves Teixeira – vanuza.alves.t@gmail.com

Manoel Henrique de Oliveira Pedrosa Filho – manoel@pesqueira.ifpe.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Pesqueira

Resumo. O efeito borda de nuvem diz respeito a eventos de intensificação da irradiância solar, que podem chegar a ultrapassar o valor da constante solar da radiação (1.367 W/m^2), provocando aumentos de potência para os sistemas fotovoltaicos de energia solar. Este aumento de desempenho pode provocar consequências para os sistemas conectados à rede elétrica, devido aos limites operacionais dos equipamentos. Neste trabalho, foi montado um sistema de medição a fim de coletar grandezas elétricas na entrada e na saída de um inversor fotovoltaico operando com FDI abaixo e acima da unidade, observando o seu comportamento quando há ocorrência de eventos do efeito borda de nuvem. Os eventos observados provocaram aumentos de corrente CA da ordem de 4,87 % acima do valor nominal de saída. Foi observado que em instalações operando com baixo carregamento, a tensão CA acompanha a variação da irradiância. Foram verificados aumentos de potência CC da ordem de 76 % da potência máxima de entrada do inversor. Para FDI menor que a unidade, ocorreram perdas da ordem de 40 % e para FDI maior que a unidade, foi observado que a energia extra foi em sua maioria aproveitada pelo inversor. Para o sistema operando com sobrecarregamento, o controle de potência do inversor opera com mais frequência e com tempos de atuação da ordem de 40 segundos. O tempo de atuação do fusível CC é maior do que o maior tempo de duração da elevação da corrente CC, o que não provoca a abertura deste.

Palavras-chave: Efeito borda de nuvem, Sistemas conectados à rede, Radiação solar

1. INTRODUÇÃO

A presença das fontes renováveis de energia vem crescendo de forma significativa na geração centralizada e distribuída em todo o Brasil, de forma a tornar a matriz energética cada vez mais limpa, reduzindo impactos ambientais atrelados à geração de energia elétrica. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio da resolução normativa n° 482/2012, possibilitou ao consumidor a implantação de sistemas de micro e minigeração por todo o País, e a partir disto, surgiu a necessidade de estudar tanto o comportamento quanto a influência destes geradores distribuídos nas redes elétricas, quando submetidos a fenômenos relacionados com a variabilidade da irradiância solar, como por exemplo os valores extremos desta grandeza.

A irradiância solar extraterrestre possui uma densidade de fluxo de 1.367 W/m^2 , denominada constante solar, podendo variar $\pm 3\%$ durante o ano (Rabl, 1985) correspondendo assim, ao valor máximo (limite físico) da irradiância solar fora da atmosfera da Terra. Diversos autores relatam em seus trabalhos que, em condições bastante específicas, os valores de irradiância medidos em solo terrestre podem superar este limite. Este efeito é conhecido como: efeito borda de nuvem ou efeito lente. Na Fig. 1, apresenta-se uma disposição das nuvens no céu, que podem provocar o efeito borda de nuvem.



Figura 1 - Configuração das nuvens em torno do Sol que podem provocar o efeito borda de nuvem (Almeida *et al.*, 2014).

Piacentini *et al.* (2011) afirmam que, o efeito de borda ocorre nas seguintes condições: presença de nuvens cumulus em torno do disco solar (Fig. 1), nuvens espessas com cobertura mínima de 50% e máxima de 90%, permitindo o céu claro entre as mesmas para que a colisão dos raios solares com as partículas das nuvens cause um espalhamento maior da

luz, resultando na intensificação da irradiância difusa horizontal (DHI) e consequentemente em um aumento no valor da irradiância global horizontal (GHI), uma vez que a sua composição pode se dá pela DHI somada a irradiância normal direta (DNI) (Fontenele *et al.*, 2017).

De acordo com Zehner *et al.* (2011) e Tapakis e Charalambides (2013), o efeito borda de nuvem provoca um aumento na GHI, que por diversas vezes ultrapassa a irradiância média ao meio dia solar, ao nível do mar (1.000 W/m^2), e também o valor da constante solar (1.367 W/m^2), intensificando os valores de potência dos sistemas fotovoltaicos. Segundo Luoma *et al.* (2012), este aumento de potência pode causar danos aos inversores, ultrapassando suas classificações de potência e resultando na sua saturação, o que acarreta perdas de energia consideráveis ao sistema por meio de falhas no processo de conversão de energia.

A partir das considerações feitas, o objetivo deste trabalho é apresentar uma análise do comportamento da tensão, corrente e potência relacionados ao circuito de corrente contínua (CC) e ao de corrente alternada (CA) de um sistema fotovoltaico (FV) conectado à rede, quando submetido a eventos do efeito borda de nuvem, com duração entre 1 e 10 segundos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução do trabalho, montou-se um sistema de medição de grandezas elétricas nos circuitos CC e CA (Fig. 2) contendo: dois coletores de dados (Fieldlogger), uma fonte CC (alimentação dos Fieldlogger), resistência Shunt, circuito divisor de tensão, sensor de temperatura (Termopar), piranômetro (Eppley PB), analisador de rede (ET-50501C). O sistema fotovoltaico conectado à rede é composto por um inversor de 3.000 W (PHB3000-SS) e, um gerador FV formado por 20 módulos FV de silício policristalino com potência de 245 W_p cada.

Para a medição do gerador FV CC foi ensaiado um sistema com potência de 4.900 W_p (dois arranjos com 10 módulos FV associados em série), e posteriormente com potência de 2.450 W_p (apenas um arranjo com 10 módulos). A leitura e gravação destes dados foi feita por meio de dois Dataloggers Fieldlogger da Novus conectados por uma rede RS485. A coleta foi realizada por meio da interface de conexão com o computador.

Na medição do circuito CA, foi utilizado um sistema de 4.900 W_p , com dados (corrente, tensão e potência) medidos e gravados a partir do analisador de rede, sendo necessária a realização de um ajuste do horário do equipamento com o horário das medições de radiação solar, a fim de obter esses dados sincronizados no tempo. Os dados CA foram coletados diretamente do analisador de rede via pendrive.

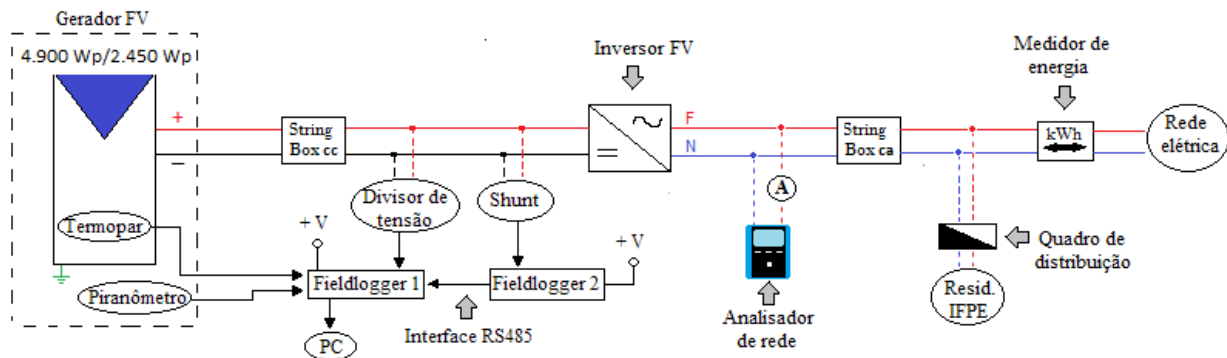


Figura 2 - Esquema de ligação para o sistema de medição CC e CA.

A medição da tensão CC foi realizada por um circuito divisor de tensão ligado a entrada do inversor, permitindo a compatibilidade dos valores limites do Datalogger em suas entradas, possibilitando a leitura de tensão. Para a obtenção dos valores da corrente, utilizou-se uma resistência Shunt. Um piranômetro para a medição da irradiância solar no plano do gerador e um termopar para medição da temperatura dos módulos FV. Na Fig. 3, apresenta-se o esquema de instalação do termopar em um módulo FV.

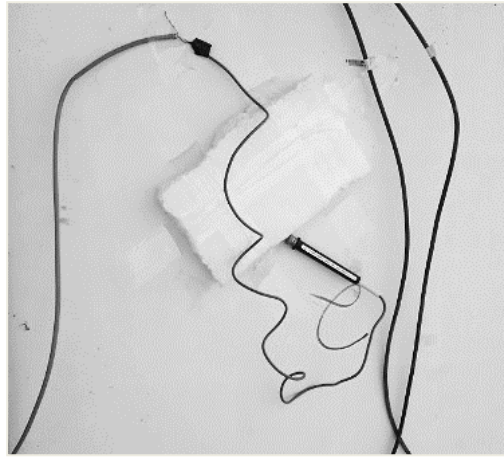


Figura 3 - Sensor de temperatura (termopar), instalado na parte traseira de um dos módulos e protegido por um isopor.

Após a aquisição dos dados medidos, foi realizado um processo de relacionamento entre tabelas no banco de dados Access (Microsoft), utilizando datas e horários como parâmetros em comum para a obtenção do índice de claridade do céu (k_t), definido como a razão entre a irradiância solar global, medida no plano horizontal (I_h)(GHI) e a extraterrestre ($I_{0,eff} \cdot \cos\theta_z$), como mostram as Eq. (1) e Eq. (2) (Rabl, 1985).

$$k_t = \frac{I_h}{I_{0,eff} \cdot \cos\theta_z} \quad (1)$$

$$I_{0,eff} = \left[1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360^\circ \cdot n}{365,25}\right) \right] \cdot I_0 \quad (2)$$

$$\cos\theta_z = \cos\lambda \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin\lambda \cdot \sin\delta \quad (3)$$

Onde:

n: Dia Juliano

I_0 : Constante solar (1.367 W/m²)

λ : Latitude (°)

δ : Declinação solar (°)

ω : Ângulo horário do Sol (°)

Após o cruzamento entre os dados no Access, foi feita a sua importação para o Excel para o início do processo de filtragem com o objetivo de detectar os instantes que ocorreram o efeito de borda. Para a identificação dos eventos deste efeito, utilizou-se como critério ($k_t > 1$) (indicando que houve uma sobreirradiância) (Gueymard, 2017). Também foi levado em consideração o valor da GHI dentro das condições de operação do sistema. Após a identificação de todos os eventos de sobreirradiância, foi aplicado o algoritmo desenvolvido por Pedrosa Filho e Santos (2019) que permite agrupar e classificar os eventos em relação a sua duração.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico, serão apresentados os resultados relacionados com as grandezas do lado CA, na saída do inversor FV (durante 9 meses) e do lado CC, na entrada do inversor FV (durante 8 meses), por meio de análise gráfica de seus comportamentos em sincronismo com a irradiância solar, durante os momentos em que ocorreu o efeito borda de nuvem.

3.1 Análise dos parâmetros elétricos CA

A análise CA foi realizada com base em dados medidos entre 09/2019 e 05/2020, por meio da construção e análise dos gráficos de corrente, tensão e irradiância solar.

A Fig. 4 mostra a influência do efeito borda de nuvem sobre a corrente elétrica CA. Observa-se que, na maior parte do tempo a irradiância apresentou valores acima de 1.000 W/m². Como consequência, nos momentos de ocorrência do efeito, observam-se aumentos significativos na corrente de saída em relação ao valor nominal do inversor (I_n) que é de 13,64 A, linha tracejada em vermelho. Neste dia (10/02/2020) foi registrado um valor de irradiância de 1.175 W/m² o que provocou um valor de corrente CA, 4,87 % acima de I_n , sendo este o máximo observado durante as medições. Vale ressaltar que este comportamento se repete em muitos conjuntos de dados nas medições CA.

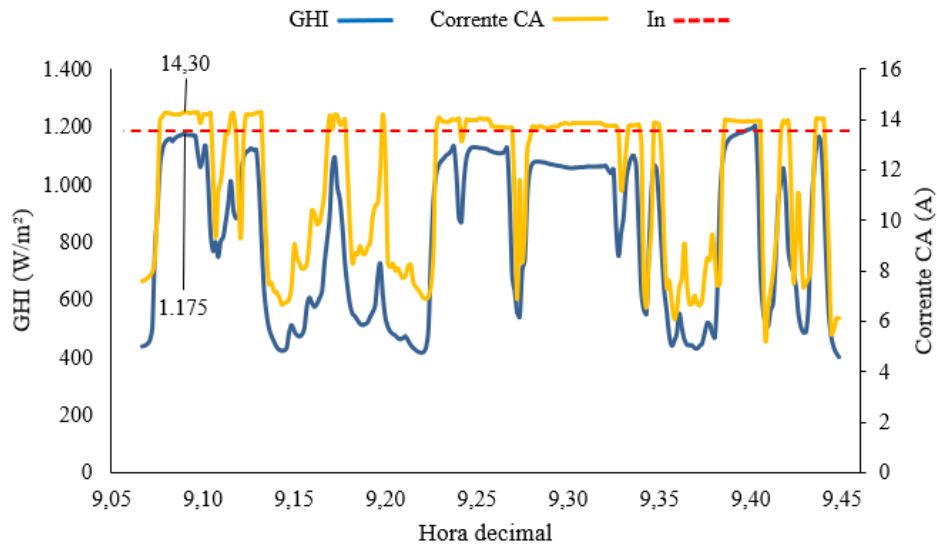


Figura 4 - Análise da corrente CA e irradiância solar sob a influência do efeito borda de nuvem em eventos com duração de 5 e 10 segundos.

A Fig. 5 apresenta uma redução na escala do gráfico Fig. 4, mostrando, com mais detalhes, que os valores de corrente acima de 13,90 A foram limitados pelo inversor. Ao analisar este efeito, nota-se que esta limitação está relacionada com valores de irradiância acima de 1.000 W/m², e também com a relação entre a potência nominal do gerador ser 63 % maior que a do inversor, o que provoca cortes de corrente e potência na sua saída.

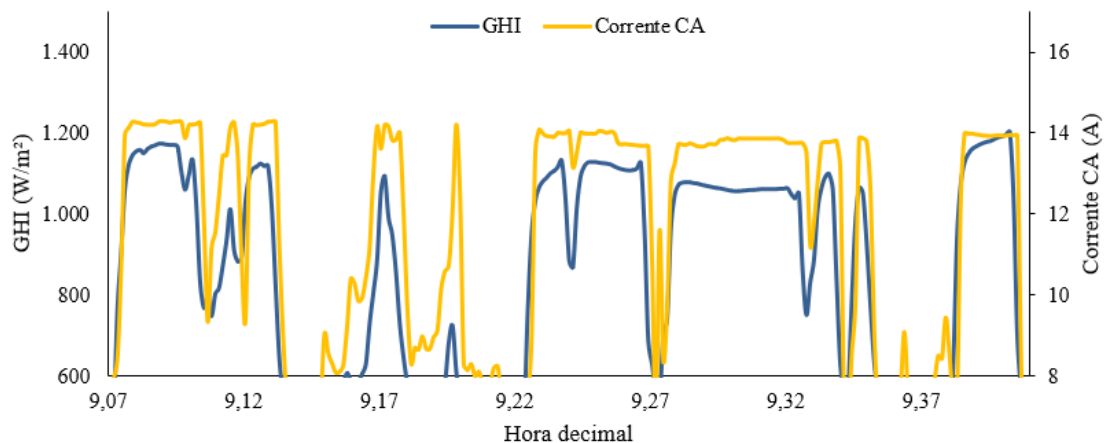


Figura 5 - Comportamento da corrente de saída do inversor em 10/02/2020.

Em relação à tensão CA da rede elétrica, diferentes comportamentos foram observados em dois momentos particulares, que estão relacionados ao carregamento da rede (operação das cargas). Um destes é quando havia poucas cargas ligadas (finais de semana e feriados) no IFPE Campus Pesqueira, observa-se na Fig. 6A, que há um sincronismo entre tensão e irradiância solar. Já nos dias de semana, em que o campus estava em operação, Fig. 6B, não foi verificado este sincronismo.

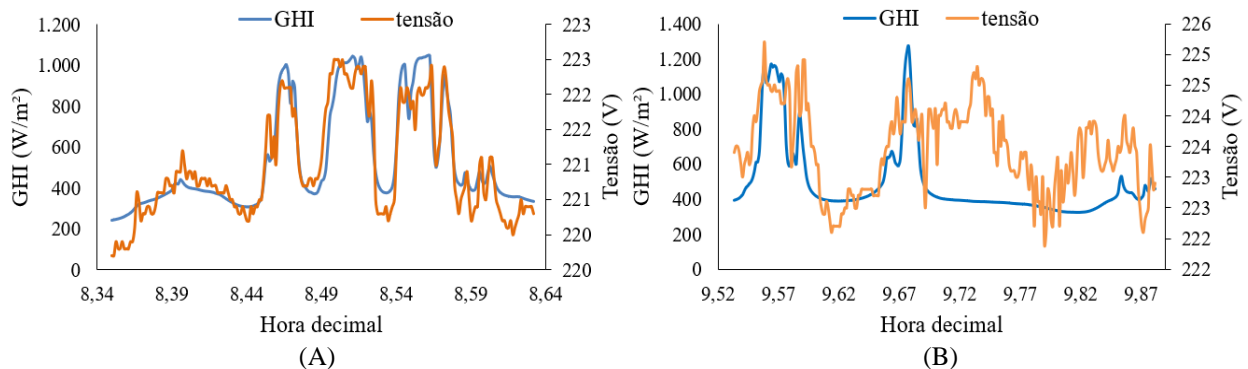


Figura 6 - Comportamento da tensão em relação à irradiância, quando a rede está operando com cargas (A) desligadas em 22/12/2019 e (B) ligadas em 03/02/2020.

Este comportamento pode ser explicado pelo autoconsumo da corrente injetada pelas cargas que estão simultaneamente ligadas, quando não há cargas, toda a corrente é injetada na rede, ou seja, esta percorre todo o circuito elétrico, sofrendo os efeitos da impedância deste até o ponto de entrega.

Na Fig. 7, observa-se o comportamento idêntico ao da Fig. 6, com respeito à corrente e à tensão. Dessa forma, o perfil de variação entre tensão, corrente e irradiância solar foi o mesmo quando a rede estava operando sem o consumo de cargas.

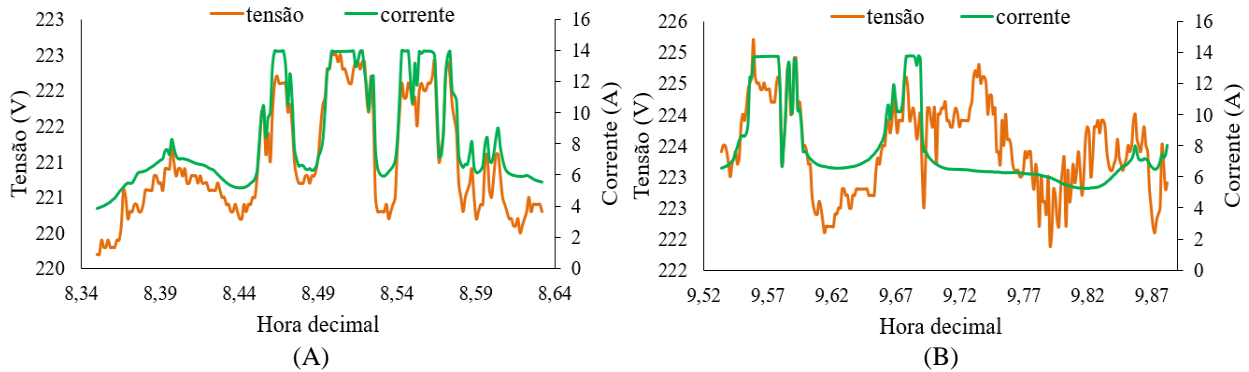


Figura 7 - Comportamento da tensão em relação à corrente, quando a rede está operando com cargas (A) desligadas em 22/12/2019 e (B) ligadas em 03/02/2020.

3.2 Análise dos parâmetros elétricos CC

Para a análise CC, foram realizados testes em duas etapas do trabalho, entre 12/2020 e 07/2021, com fatores de dimensionamento (FDI) distintos. O FDI estabelece a relação entre a potência nominal do inversor e a potência do gerador FV, calculado pela Eq. (4) (Rampinelli *et al.*, 2007).

$$FDI = \frac{P_{inv}}{P_{FV}} \quad (4)$$

Onde:

P_{inv} : Potência nominal do inversor (W)

P_{FV} : Potência do gerador FV nas condições padrão de teste (W_p)

Neste trabalho, o inversor FV (PHB3000-SS) operou em duas configurações: sobredimensionado (FDI = 0,61) e subdimensionado (FDI = 1,2).

Considera-se que o inversor está sobredimensionado quando $FDI < 1$, ou seja, potência nominal do inversor menor do que a potência do gerador FV. O inversor está subdimensionado quando $FDI > 1$, a potência nominal deste é maior do que a potência do gerador FV.

De posse dos dados medidos no período de 12/2020 a 07/2021, foi realizado inicialmente um levantamento da frequência mensal, apresentado na Fig. 8, em que se observaram as ocorrências nas quais a potência operacional (provocada pela irradiância incidente nos módulos) do gerador FV foi maior que a potência nominal do inversor, definida como condições de sobrepotência (Scarabelot *et al.*, 2020).

Dessa forma, nota-se na Fig. 8, uma maior frequência de ocorrências de sobrepotência, quando o FDI = 0,61, como esperado, porém, com percentuais abaixo de 30%, ou seja, o inversor operou menos que 30% do tempo na condição de sobrepotência mesmo estando com FDI abaixo da unidade. Já para o FDI = 1,2, o inversor não operou na condição de sobrepotência em nenhum momento.

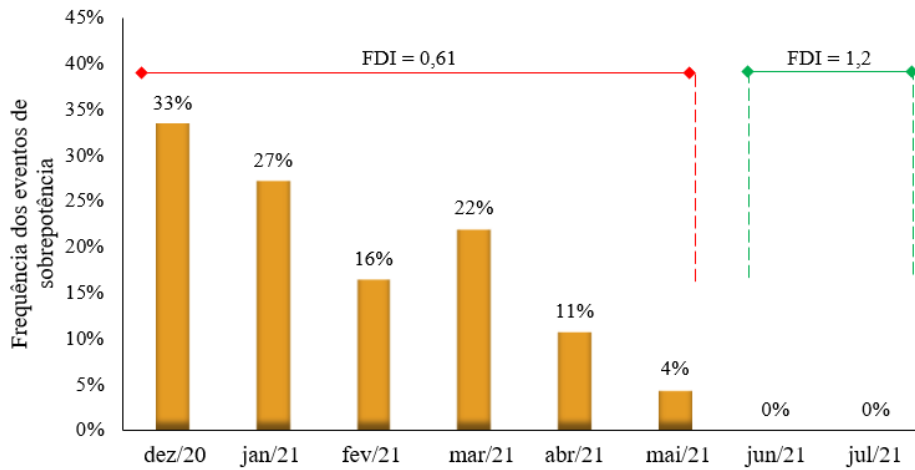


Figura 8 - Frequência percentual de operação do inversor sob condições de sobrepotência.

A Fig. 9, mostra o registro de um evento do efeito borda de nuvem, com duração de 2 minutos, que ocorreu no dia 26/02/2021, apresentando um valor de 1.112,42 W/m² (linha preta do gráfico). Este evento provocou o maior valor de potência CC registrado nas medições. Neste caso, a potência operacional do gerador FV foi de 5.465 W, conforme indicado na Fig. 9 (linha vermelha do gráfico), e permaneceu assim durante 5 segundos. Vale ressaltar que o inversor estava operando com FDI = 0,61.

Considerando que a eficiência do inversor utilizado é de 97 %, a potência operacional máxima na entrada deste inversor deve ser de 3.092 W. Observa-se que neste evento, o gerador entregou uma potência 76,7 % acima da máxima potência de entrada do inversor (3.092 W) e que representa 11,5% acima da potência nominal do gerador (4.900 Wp). O que também está acima da potência máxima de entrada recomendada pelo fabricante (3.200 W). Neste caso, o controle de potência do inversor levou 40 segundos para atuar na redução desta potência operacional do gerador FV.

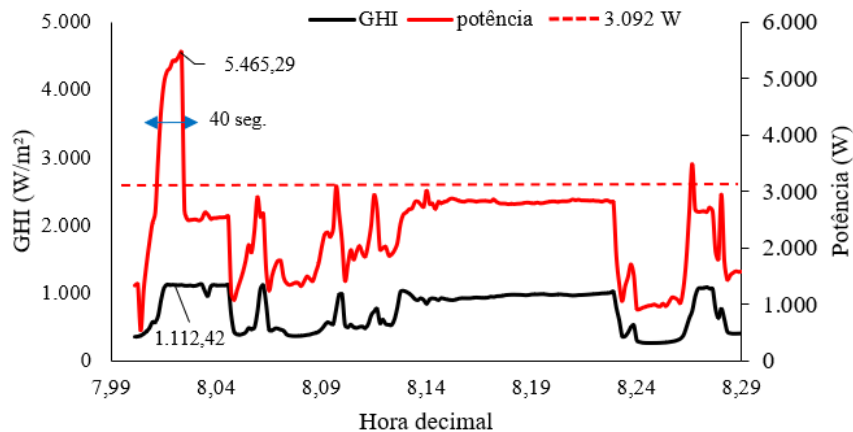


Figura 9 - Comportamento da potência na entrada do inversor e da irradiância solar em 26/02/2021.

Observou-se em diversos momentos a atuação do sistema de controle do inversor em relação à potência entregue pelo gerador, onde ele ajusta o valor da tensão do seu ponto de operação, limitando o valor da potência liberada na sua entrada. Este comportamento será apresentado nas Fig. 10 e 11.

Outra análise efetuada considera a potência estimada de operação do gerador (P_{mpp}) a partir das medições de irradiância solar no plano do gerador e da temperatura dos módulos, e utilizando-se a Eq. (5) adaptada de (Rampinelli *et al.*, 2014).

$$P_{MPP} = N_{módulos} P_{FV} \frac{GHI_m}{GHI_{ref}} [1 + \gamma_{MPP} (T_{MC} - T_{MC,ref})] \quad (5)$$

Onde:

$N_{módulos}$: número de módulos do gerador

P_{MPP} : Potência estimada de operação do gerador FV (W)

P_{FV} : Potência nominal dos módulos FV (245 W_p)

GHI_m : Irradiância solar medida (W/m²)

GHI_{ref} : Irradiância solar nas condições padrão de teste (1.000 W/m²)

T_{MC} : Temperatura de operação do gerador FV ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{MC,ref}$: Temperatura de referência do gerador FV (25°C)

γ_{MPP} : Coeficiente de temperatura no ponto de máxima potência ($-0,45\%/^{\circ}\text{C}$)

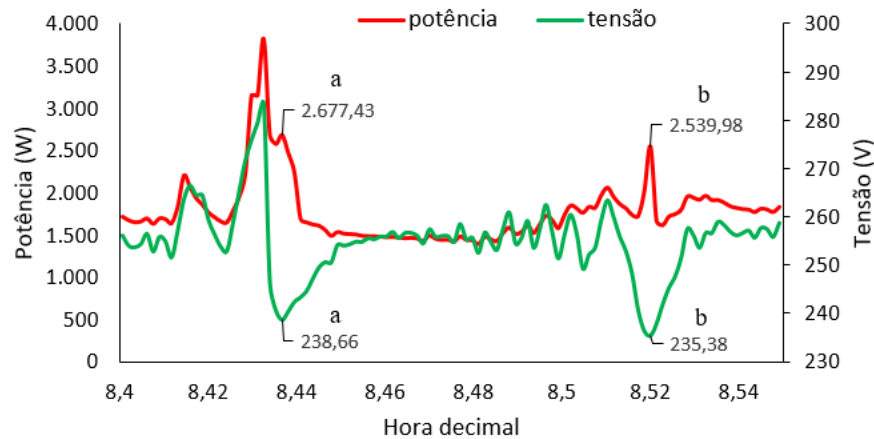


Figura 10 - Curvas de potência CC e tensão CC, mostrando a atuação do controle do inversor (sobredimensionado) sobre a potência do gerador FV em 26/04/2021.

A Fig. 10 apresenta dois eventos do efeito borda de nuvem, o evento (a) com duração de 5 segundos e o evento (b) com duração de 10 segundos, referentes à operação do inversor sobredimensionado. Percebe-se, nos pontos destacados no gráfico, a atuação do sistema de controle do inversor, pois ele reduziu a tensão do ponto de operação (linha verde do gráfico), limitando assim, o valor da potência solicitada do gerador.

No ponto (a), a potência estimada de operação do gerador foi de 4.207 W, verificou-se que 63,6% (2.677 W) desta é que foi solicitada pelo inversor. No ponto (b), 57% da potência estimada de operação do gerador (4.453 W) foi aproveitada pelo inversor.

No ponto (a) da Fig. 11, nota-se o mesmo comportamento relatado na Fig. 10, o gerador operaria com uma potência estimada de 4.337 W e apenas, 59,4% dessa potência (2.578 W) foi demandada pelo inversor. No ponto (b) da mesma figura, tem-se um gerador operando com potência estimada de 3.566 W, porém 78,6% desta (2.803 W) é que foi solicitada.

Ainda na Fig. 11, pode-se observar o efeito do controle de potência do inversor, para o FDI = 0,61, nos eventos (a) e (b), pois a tensão do gerador foi reduzida, o que provocou a diminuição da potência de operação do gerador. Desse modo, verificou-se que o tempo de resposta do controle do inversor foi de 45 segundos para o evento (a) e 55 segundos para o evento (b).

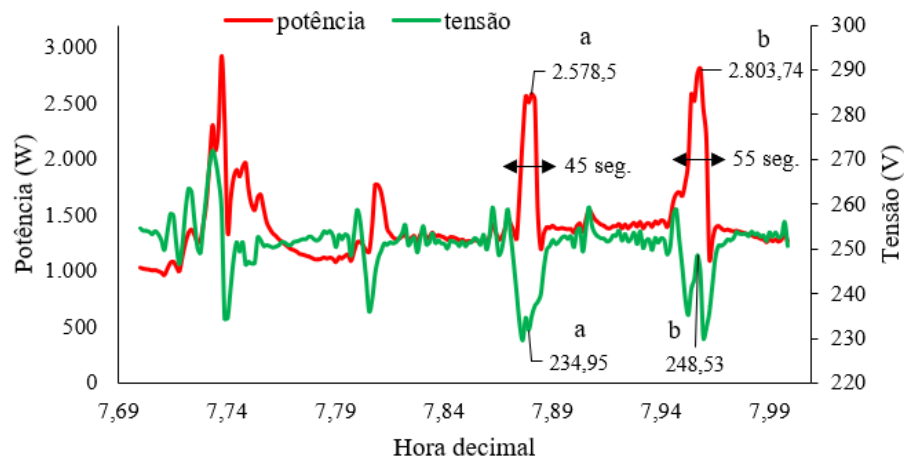


Figura 11 - Atuação do controle do inversor (sobredimensionado) sobre a potência do gerador FV em 26/02/2021.

Pode-se notar o contrário deste comportamento (citado anteriormente) na Fig. 12, onde tem-se um sistema com FDI = 1,2 que, neste caso, o inversor não está operando na condição de sobrepotência.

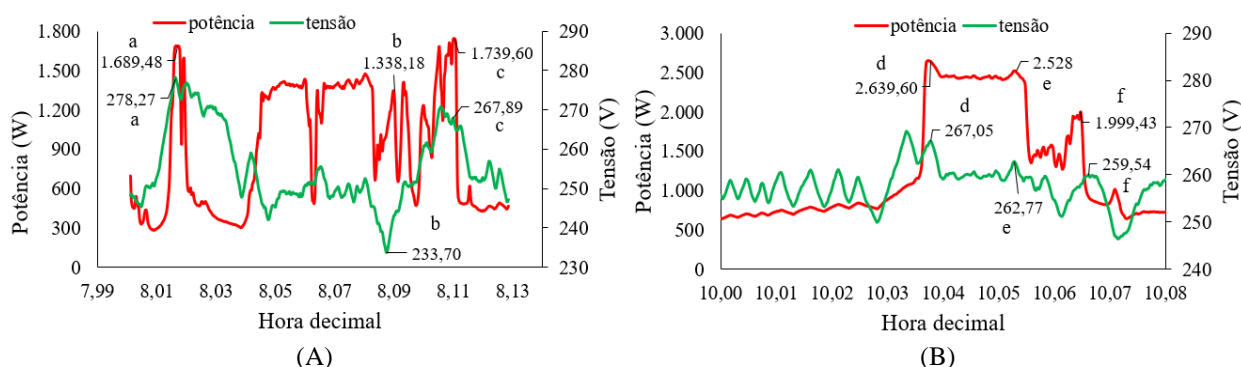


Figura 12 - Atuação do controle do inversor (subdimensionado) sobre a potência do gerador FV verificado em dois momentos do dia 06/06/2021: A) 8h e B) 10h.

Nos gráficos da Fig. 12, verifica-se o comportamento diferenciado do controle do inversor quando ocorrem eventos de sobreirradiância. Os picos de potência frutos destes eventos não foram reduzidos pelo inversor, pois a tensão do gerador não foi reduzida, uma vez que a potência não atingiu o máximo do inversor.

A Tab. 1, apresenta detalhadamente os valores da potência estimada (P_{mpp}) e operacional do gerador em cada evento indicado na Fig. 12, assim como a fração aproveitada pelo inversor da potência estimada (P_{mpp}). Dos valores obtidos, verifica-se que, nestes eventos, o maior percentual foi de 99,38% (evento a), seguido de outros 4 eventos (c – d – e – f) em que houve um maior aproveitamento da energia extra fornecida pela sobreirradiância.

Tabela 1 – Percentual de potência medida na entrada do inversor de acordo com os eventos destacados na Fig. 12.

Evento	Potência operacional (W)	Potência estimada (W)	Percentual (%)
a	1.689,48	1.700	99,38
b	1.338,18	1.781,34	75,12
c	1.739,60	1.836,57	94,66
d	2.639,60	2.812,25	93,86
e	2.528	2.781,37	90,89
f	1.999,43	2.289,86	87,31

Nas Fig. 13A e 13B, apresentam-se dois eventos de sobreirradiância que provocaram os maiores valores de correntes CC medidos tanto para o FDI = 0,61 (Fig. 13A) como para o FDI = 1,2 (Fig. 13B). Desse modo, observa-se que, para o FDI = 0,61, o maior valor de corrente registrado foi 18,37 A, com GHI de 1.114,13 W/m², o que representa 2% acima do valor máximo da corrente CC (18 A) recomendado pelo fabricante do inversor, e 22,46% acima da corrente nominal do fusível (SPF015R) CC (15 A) utilizado como dispositivo de proteção contra sobrecorrente do sistema FV. Enquanto, para o FDI = 1,2, a maior corrente registrada foi de 10,84 A, com GHI de 1.265,03 W/m² (valor abaixo dos indicados).

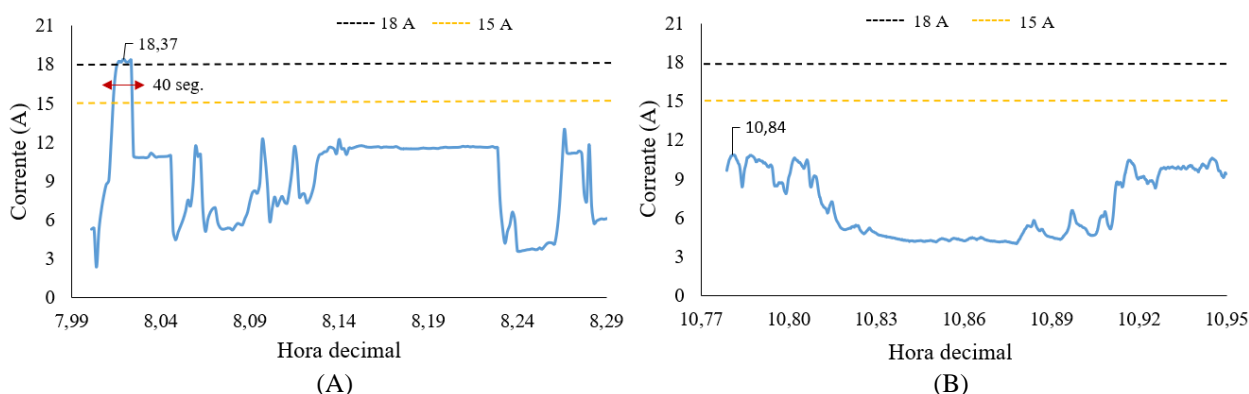


Figura 13 - Maior valor de corrente CC registrado para A) FDI = 0,61 (26/02/2021) e B) FDI 1,2 (27/06/2021).

Considerando que o valor da corrente CC observado no gráfico da Fig. 13A (18,37 A) é superior ao valor nominal do fusível CC (15 A), analisou-se se há chance de ocorrer a abertura do fusível operando sob estas condições, quando se considera o tempo em que a corrente se manteve nesta condição.

Foi observado que a corrente CC permaneceu em 18,37 A durante os 40 segundos da ocorrência do evento indicado na Fig. 13A. O gráfico da Fig. 14 apresenta a curva de atuação do fusível de 15 A (SPF015R).

A linha azul da Fig. 14 foi traçada para uma corrente de 18 A e esta cruza a curva de atuação do fusível de 15 A (curva verde), indicando um tempo de atuação (linha laranja) de 1000 segundos. O que demonstra que não há probabilidade, para estes eventos verificados, de abertura do fusível CC do gerador FV.

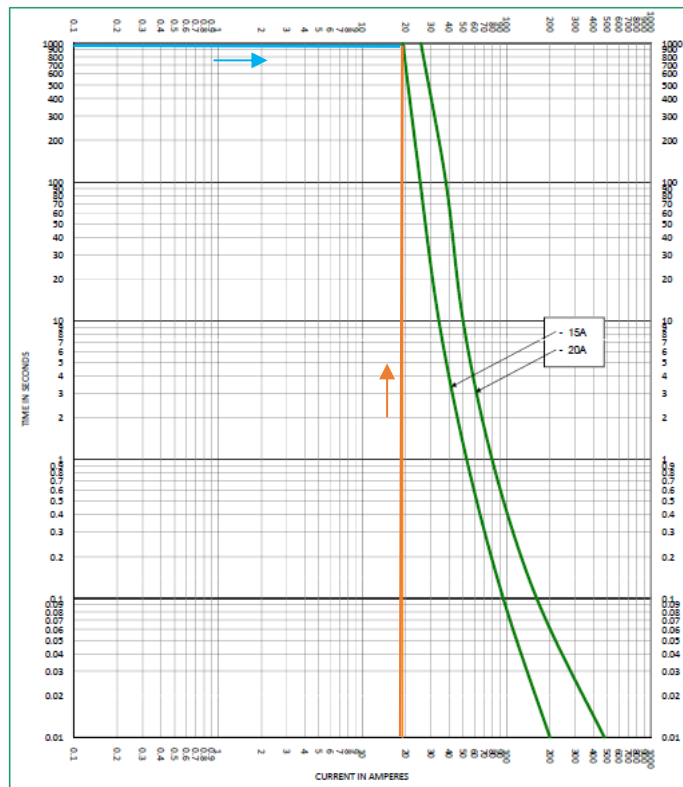


Figura 14 - Curva de atuação do fusível (SPF015R) (Fuse Datasheet, 2020).

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou as análises comportamentais dos parâmetros elétricos CA e CC, registrados na frequência de 1 e 5 segundos, de um sistema FV conectado à rede.

Observou-se na análise CA que a GHI ultrapassou 1.000 W/m^2 em diversos momentos, chegando ao valor de 1.465 W/m^2 em eventos de apenas 5 e 10 segundos de duração. Detectou-se valores de correntes CA acima do valor nominal do inversor na maioria das medições em que houve eventos de sobreirradiação, sendo que o maior aumento observado foi de 4,87 % de I_n . Ressalta-se que valores de correntes acima de 13,90 A foram limitados pela saída do inversor FV.

Ainda sobre a análise CA, notou-se que quando uma instalação elétrica opera com baixo carregamento, a tensão da rede tende a variar proporcionalmente com a irradiação incidente no gerador FV.

Para a análise CC, trabalhou-se com o gerador FV operando em duas configurações ($FDI = 0,61$ e $1,2$). Para $FDI < 1$, o controle de potência do inversor atua frequentemente no sentido de reduzir a potência de entrada do inversor. Os tempos de atuação para os eventos verificados ficaram entre 40 e 55 segundos. Ou seja, durante a ocorrência de eventos de sobreirradiação, o inversor demora até 55 segundos para controlar a potência. Para $FDI > 1$, não foi verificada a ação de controle de potência do inversor.

Quando um sistema FV conectado à rede está operando com $FDI > 1$, existe um maior aproveitamento da energia fornecida durante a ocorrência de efeitos borda de nuvem, já para $FDI < 1$, a energia extra fornecida por estes eventos é parcialmente utilizada pelo inversor, com perdas da ordem de 40 % da energia disponível.

Em relação à possibilidade de abertura do fusível CC, devido ao aumento da corrente, provocado pelos eventos de sobreirradiação, foi verificado que, o tempo de duração da elevação da corrente não foi suficiente para provocar a atuação do fusível CC.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Pesqueira por disponibilizar a infraestrutura necessária para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Fontenele, A. L. F., Inácio, C.O., Gouveia, H.T.V., Ferreira, P.H.F., Araújo, R.G., 2017. O efeito lente e a sua influência na operação de uma usina fotovoltaica no Nordeste brasileiro. XXIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, Paraná.
- Fuse Datasheet. Littelfuse, 2020. Disponível em: <<https://www.littelfuse.com/spf>>. Acesso em: 22 de agosto de 2021.
- Gueymard, C., 2017. Cloud and albedo enhancement impacts on solar irradiance using high frequency measurements from thermopile and photodiode radiometers. Part 1: Impacts on global horizontal irradiance. Solar energy, v. 153, p. 755-765.
- Luoma, J., Kleissl, J., Murray, K., 2012 Optimal inverter sizing considering cloud enhancement. Solar Energy, v. 86, p. 421-429.
- Pedrosa Filho, M. H. O., Santos, M. F., 2019. Cloud enhancement occurrences analysis in Afogados da Ingazeira city in Brazilian northeast. ISES Solar World Congress, Santiago, Chile.
- Piacentini, R.D., Salum, G.M., Fraidenraich, N., Tiba, C., 2011. Extreme total solar irradiance due to cloud enhancement at sea level of the NE Atlantic coast of Brazil. Renewable Energy, v. 36, p. 409-412.
- Rabl, A., 1985. Active Solar Collectors and Their Applications. New York: Oxford University Press.
- Rampinelli, G. A., Krenzinger, A., Chenlo, F., 2014. Mathematical models for efficiency of inverters used in grid connected photovoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 34, p.578-587.
- Rampinelli, G. A., Krenzinger, A., Chenlo, F., 2007. Influence of the Sizing Factor of the Inverter on the Correlation Between Electric Power and Solar Irradiance in a Grid-Connected Photovoltaic Plant. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference.
- Scarabelot, L. T., Rampinelli, G. A., Rambo, C. R., 2020. A sobreirradiância e seus impactos na produção e na vida útil dos inversores. FotoVolt, v. 6, p.44-53.
- Tapakis, R., Charalambides, A. G., 2014. Enhanced values of global irradiance due to the presence of clouds in Eastern Mediterranean. Renewable Energy, v.62, p.459-467.
- Zehner, M., Weigl, T., Hartmann, M., Thaler, S., Oliver, S., Czakalla, M., Mayer, B., Betts, T.R., Gottschalg, R., Behrens, K., Langlo, G. K., Giesler, B., Becker, G., Mayer, O., 2011. Energy loss due to irradiance enhancement. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Alemanha.

BEHAVIORAL ANALYSIS OF ELECTRICAL PARAMETERS OF GRID-CONNECTED PV SYSTEMS UNDER THE INFLUENCE OF THE CLOUD EDGE EFFECT

Abstract. *The cloud edge effect is an event of intensification of solar irradiance, which can surpass the solar irradiance constant value (1.367 W/m^2), causing a power increase in the photovoltaic solar energy systems. This performance boost may cause consequences to the systems connected to the electrical grid, due to the equipment operational limits. In this work, a measurement system was built in order to collect electrical variables in both entrance and exit of a photovoltaic inverter operating with FDI below and above the unity, observing the behavior during a cloud edge event. The events observed caused a 4,87 % AC current increase above the rated output value. It was observed that in facilities operating in low load, the AC voltage follows the irradiance variation. It was seen a 76 % CC power increase of the maximum input power of the inverter. For a FDI smaller than the unity, it was observed a 40 % loss, and for a FDI higher than the unity, it was seen that the extra energy was highly captured by the inverter. For the overloaded-operating system, the inverter power control operates more often and with a approximately 40 seconds operating time. The CC fuse action time is longer than the longest duration of the CC current increase, which does not open it.*

Key-words: *Cloud edge effect, Grid-connected systems, Solar radiation*