

Análise de Qualidade da Energia Elétrica em Sistemas de Geração Híbrida – Estudo de Caso

Paulo A. Souza, Daniel Barbosa, Kleber Freire
UNIFACS/UFBA
paulo.andrade@unifacs.br, dbarbosa@ufba.br,
kfreire@ufba.br

Gabriel Belas D. Santos, Vinicius Mariano
UNIFACS
gabriel_belas_domingues@hotmail.com
vinicius@civil.com.br

Resumo — Sabe-se que o crescimento de geração distribuída renovável tem sido expressivo no Brasil e no mundo nos últimos anos. Em função deste crescimento, os impactos relacionados devem ser avaliados em função das suas especificidades e das condições operativas a que estão submetidos os sistemas elétricos com a penetração da geração distribuída. Este trabalho tem como objetivo estudar e avaliar os impactos de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) em função do aumento da penetração de geração renovável híbrida, em especial eólica e solar, no sistema elétrico brasileiro. As análises foram feitas a partir de estudos de caso, para os quais são incluídas a coleta de dados em campo utilizando analisadores de energia e a posterior análise por meio de recursos computacionais.

Palavras-chaves — Geração de Energia, Geração Híbrida, Qualidade de Energia, Penetração Renovável, Harmônicas

I. INTRODUÇÃO

A poluição do ar, o aquecimento global, chuvas ácidas, entre outros, são problemas que, nos dias de hoje, têm sido amplamente discutidos tanto em relação às suas causas como às suas consequências para o meio ambiente [1]. Em face a isso, a contribuição das usinas de geração de energia elétrica por combustíveis fósseis para as questões supracitadas, ainda predominantes na matriz elétrica mundial, vêm sendo largamente estudadas [1]-[5]. Além disso, a industrialização e a urbanização aumentaram a necessidade de utilização da energia elétrica, cuja demanda cresce continuamente [1].

A partir deste contexto, a utilização de geração renovável, em especial, solar e eólica, tem aumentado seu alcance e vem se mostrando uma forma confiável de geração de energia, uma vez que a utilização de formas de geração distintas associadas contribui para o aumento da disponibilidade do sistema [6]. É importante destacar nesse âmbito, a geração híbrida, que permite associar diferentes fontes renováveis com o intuito de maximizar o potencial de geração e proporcionar uma geração mais uniforme [6].

Em face a isto, o setor de energia vem vivenciando grandes aumentos anuais de capacidade instalada de geração, com crescimento significativo em todas as regiões do planeta. Sabe-se que as energias eólica e solar tiveram os maiores acréscimos de capacidade instalada, sendo que em 2015 atingiram recordes pelo segundo ano consecutivo, representando agora cerca de 77% do total de novas instalações de geração de

energia elétrica [2]. O mundo atualmente instala mais capacidade de geração elétrica renovável anualmente do que instala utilizando combustíveis fósseis combinados [2].

Todavia, essa ampliação de capacidade traz novos desafios operacionais, como uma maior dificuldade em transmitir e distribuir esta energia de maneira eficiente, uma vez que a implantação de grandes linhas de transmissão tem encontrado barreiras socioambientais e a produção de energia é mais intermitente que as fontes convencionais, pois estão diretamente relacionadas a fatores climáticos [3].

Assim, percebe-se que apesar da energia renovável ser uma fonte fundamental para a sociedade moderna, a integração desse recurso à rede elétrica transpassa por novos desafios técnicos, como já observado em diversos trabalhos na literatura. De forma geral, é possível verificar que altos níveis de geração renovável podem resultar em um aumento da distorção harmônica, alteração dos níveis de tensão, flutuação na frequência, dentre outros aspectos relacionados com a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) [4]-[10].

Independentemente dos resultados encontrados para os sistemas renováveis utilizando apenas um tipo de fonte, se faz necessário explorar detalhadamente estes impactos em sistemas de geração híbrida, uma vez que os efeitos podem ser diferentes e superpostos e as análises podem apresentar novos elementos a serem estudados [11].

Dentre os problemas de QEE a serem avaliados nesse novo contexto, destacam-se a flutuação de tensão e a penetração de harmônicos no sistema elétrico, uma vez que são frutos da utilização da eletrônica de potência presente nos inversores [11]. Além disso, o nível de degradação da rede elétrica vai depender das suas características, como o tamanho e o tipo de carga, bem como, da potência de curto-circuito do nó em que a geração híbrida será injetada na rede [12].

Outro aspecto importante dos sistemas híbridos, e que pode diferenciá-los do sistema renovável de fonte única, é o período de existência do fluxo de potência bidirecional na rede elétrica, uma vez que se houver complementariedade das fontes utilizadas, o fluxo permanece de forma constante e não somente durante um certo tempo [13]. Diante disso, espera-se que a instalação de sistemas híbridos possa deteriorar ainda mais a qualidade de tensão da rede [14]-[15].

Diante do supracitado, este trabalho tem como objetivo estudar e avaliar os impactos da QEE em função do aumento da penetração de geração renovável híbrida no sistema

elétrico. As análises foram feitas utilizando *softwares* especializados e a partir de medições realizadas em campo em dois sistemas distintos.

II. METODOLOGIA

A metodologia utilizada nesse trabalho baseia-se em medições de campo em duas localidades diferentes com posterior análise dos resultados encontrados. As instalações estudadas possuem características topológicas e de finalidade próprias, o que serviu para ampliar o espectro da análise dos resultados obtidos.

A primeira instalação analisada consiste em um estabelecimento comercial com uma geração puramente solar de 5,0 kWp (20 módulos fotovoltaicos de 250 Wp) conectados por meio de um inversor bifásico de 5kVA em um sistema elétrico trifásico de 220V (fases *a* e *b*). Esse sistema possui basicamente cargas de iluminação e refrigeração pois consiste em uma loja comercial. O unifilar deste sistema pode ser observado na Fig. 1.

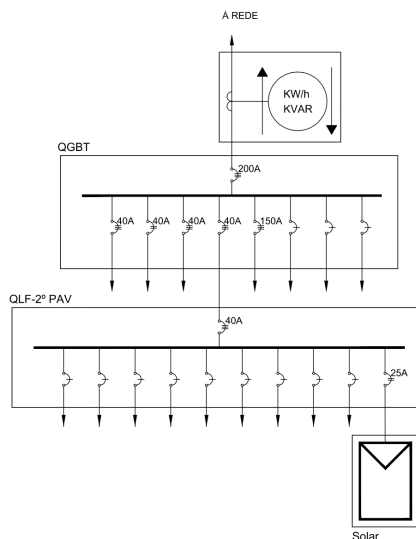


Fig. 1. Unifilar Sistema 1.

A segunda geração consiste em um sistema híbrido, solar e eólico, instalado em um sistema trifásico predial comercial de 380V, que por sua vez é conectado à rede de distribuição de média tensão da concessionária. A parte fotovoltaica possui 7,5 kWp de potência instalada e conectado através de um inversor monofásico (fase *b*), enquanto que a fonte eólica também está conectada de forma monofásica (fase *c*) com 1,5 kWp de potência. O barramento de conexão dos inversores é o mesmo dos quatro elevadores do edifício e de parte da iluminação do prédio. O unifilar deste segundo sistema pode ser observado na Fig. 2.

Ambos os sistemas estão localizados em uma capital do Nordeste e não possuem nenhum tipo de impeditivos que pudessem causar sombreamento ou barreira no vento, o que possibilita a produção plena das fontes renováveis aqui estudadas. Além disso, as medições foram realizadas com o analisador de energia EMBRASUL RE7000 [16] e tratadas com o Matlab [17] com o intuito de permitir uma melhor avaliação das variações de tensão e de corrente, e das distorções harmônicas do sistema.

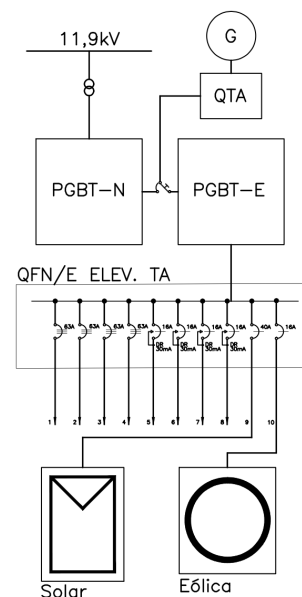


Fig. 2. Unifilar Sistema 2.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão discutidos e apresentados os principais resultados obtidos, bem como, será avaliado o comportamento de ambos os sistemas de geração (puramente solar e híbrido).

É importante salientar que apesar das características operacionais particulares, esse estudo pretende fornecer uma avaliação qualitativa, visto que conclusões mais aprofundadas requerem uma maior quantidade de medições em diferentes instalações e com diferentes topologias.

A. Sistema Puramente Solar

Fig. 3 apresenta o comportamento das tensões trifásicas do sistema ao longo de um dia completo típico de operação. É possível verificar que durante o horário comercial, das 8:00 h às 18:00 h, o nível de tensão apresentou uma leve redução, tal fato pode ser correlacionado com a entrada das cargas presentes no estabelecimento comercial.

Todavia, é factível salientar que geração solar provocou um aumento de tensão médio de aproximadamente 2% ao longo da hora de maior irradiação solar, o que corrobora com o comportamento esperado para esse tipo de fonte. Na Fig. 4 pode-se observar em detalhes este aumento de tensão proporcionado pela geração solar, onde as tensões que apresentaram os maiores valores foram justamente as das fases “a” e “b”, onde está sendo injetada a potência pelo inversor bifásico de 220V.

O comportamento das correntes durante a operação típica é apresentado na Fig. 5, na qual observa-se que durante o período de maior irradiação solar, há uma reversão no fluxo de corrente no barramento onde estão instaladas as cargas de iluminação e refrigeração do estabelecimento comercial, indicando que a geração estava injetando potência no barramento, conforme corroborado também na Fig. 6.

Observa-se também que na fase “c”, que não está submetida à injeção de potência, não ocorre a reversão da corrente e da potência fluindo para a barra.

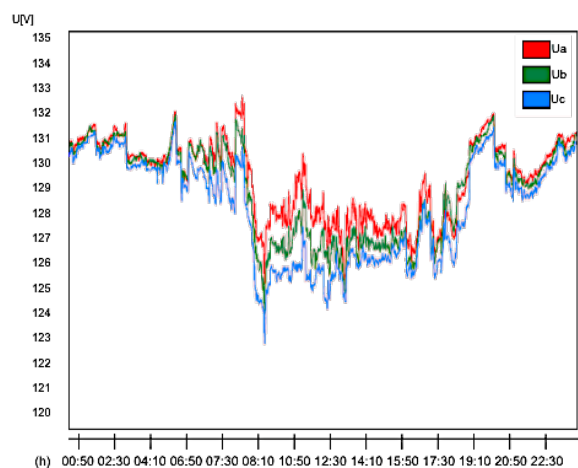


Fig. 3. Comportamento das tensões durante um dia típico de operação.

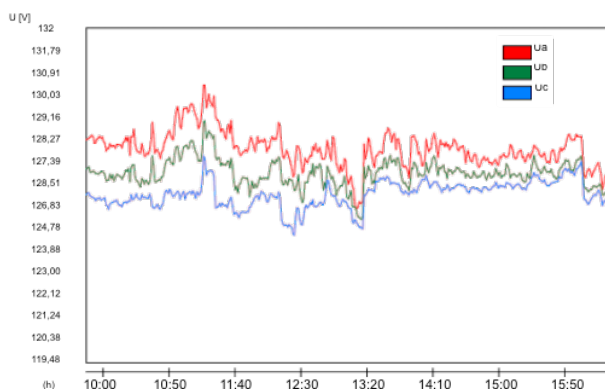


Fig. 4. Aumento da Tensão no horário de pico da geração.

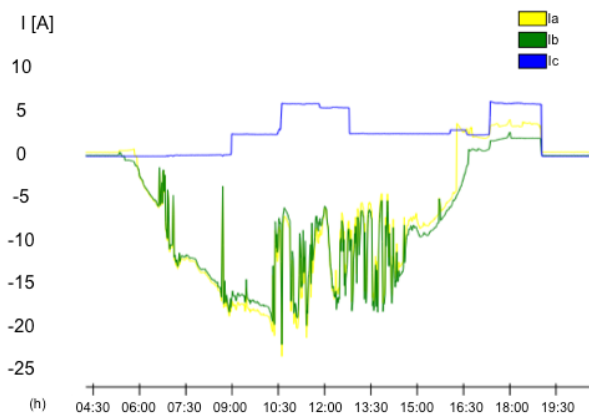


Fig. 5. Comportamento das correntes durante um dia típico de operação.

Outro aspecto interessante a ser salientado do comportamento das potências injetadas é a intermitência nos dados medidos, visto que tal condição operativa é resultado de características climáticas que são inerentes a este tipo de geração, isto é, em um curto espaço de tempo podem ocorrer grandes variações na geração solar.

A partir dos dados obtidos, e utilizando recursos computacionais, foi possível calcular as distorções harmônicas de tensão e de corrente ao longo do dia, como podem ser observados nas Fig. 7 e 8. Observa-se, contudo, que os valores de DHT_V encontrados não infringem a recomendação do PRODIST [18]. Já o DHT_I , não é regulamentado pelo PRODIST. No horário após às 16:00 horas, a fundamental da corrente é baixa e isso impacta a DHT_I , sabe-se que o melhor

indicador seria a distorção da demanda total [TDD] mas o mesmo não foi adotado devido ao tipo de registrador utilizado.

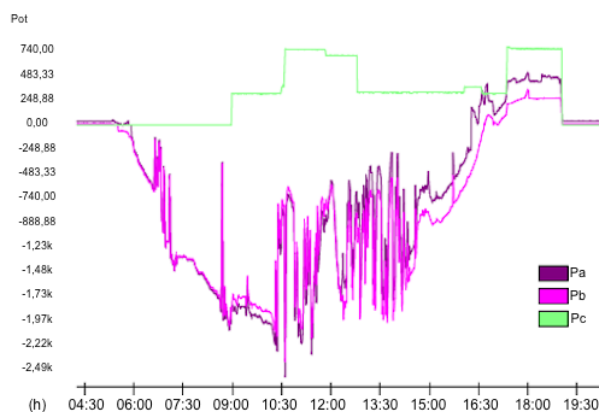


Fig. 6. Potências ativas medidas durante um dia típico de operação.

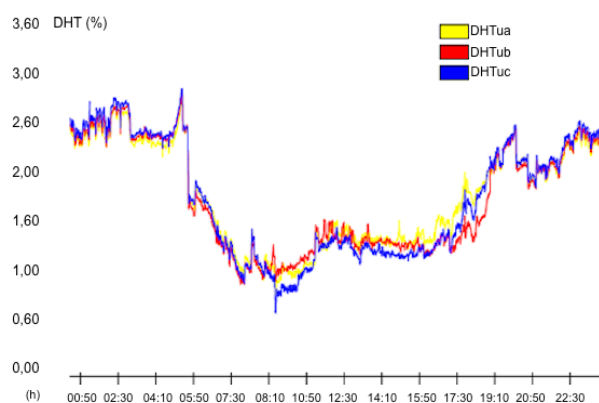


Fig. 7. Distorção Harmônica Total de Tensão (DHT_V).

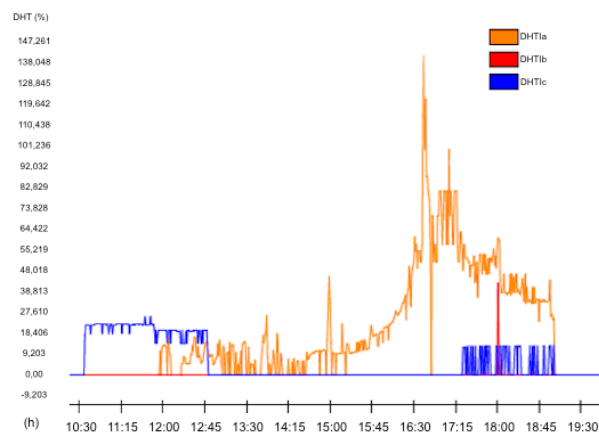


Fig. 8. Distorção Harmônica Total de Corrente (DHT_I).

Após a análise dos níveis de tensão e das distorções harmônicas, verificou-se o grau de desequilíbrio de tensão na rede elétrica diante da inserção de geração solar, conforme mostra a Fig. 9. Observa-se que apesar da geração ser bifásica, não foram encontrados níveis de desequilíbrios de tensão significativos, o que pode ser explicado pelo ponto de conexão apresentar um nível de curto-circuito muito superior à potência da geração injetada, visto que há registro de injeção de potência na rede elétrica (Fig. 6).

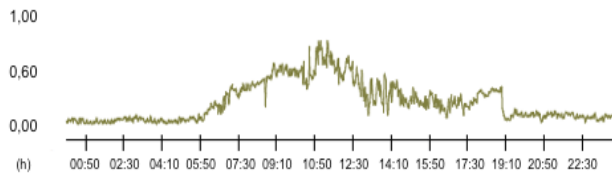


Fig. 9. Desequilíbrio de tensão percentual conforme IEC.

B. Sistema Híbrido

Para o segundo sistema analisado, com geração híbrida solar e eólica, a Fig. 10 apresenta o comportamento das tensões trifásicas do sistema ao longo de um dia completo típico de operação. É possível verificar que durante o horário comercial, das 8:00 h às 18:00 h, o nível de tensão apresenta um leve afundamento, fato já observado também no outro sistema analisado neste trabalho. Entretanto, diferentemente do sistema anterior, observa-se que em ambas as fases (“b” e “c”) com geração de energia este afundamento foi atenuado pela inserção de potência ativa gerada. Ressalta-se ainda que na fase “b” com a geração solar, a tensão permaneceu acima da nominal na maior parte do horário comercial.

Já a Fig. 11, apresenta as correntes medidas onde pode-se observar que durante o período de maior irradiação solar, também há uma reversão no fluxo de corrente no barramento, derivado da geração que estava injetando potência no barramento, conforme pode ser visto em mais detalhes também na Fig. 12. Já na fase “c” com geração eólica, a potência gerada não é suficiente para gerar uma reversão deste fluxo, apesar de ser possível notar uma diminuição da potência consumida do sistema elétrico.

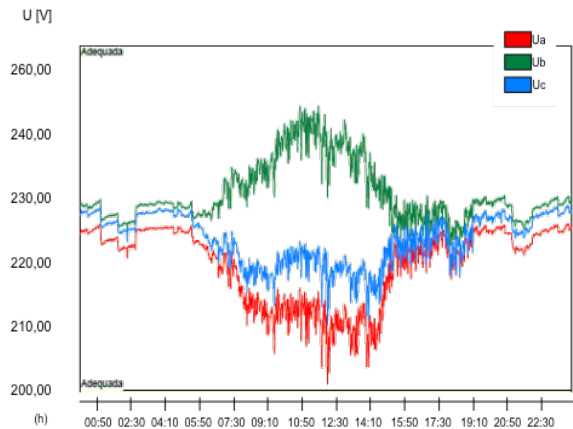


Fig. 10. Comportamento das Tensões.

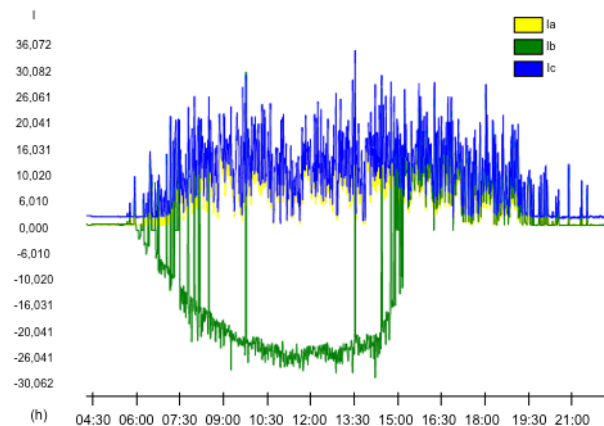


Fig. 11. Comportamento das Correntes.

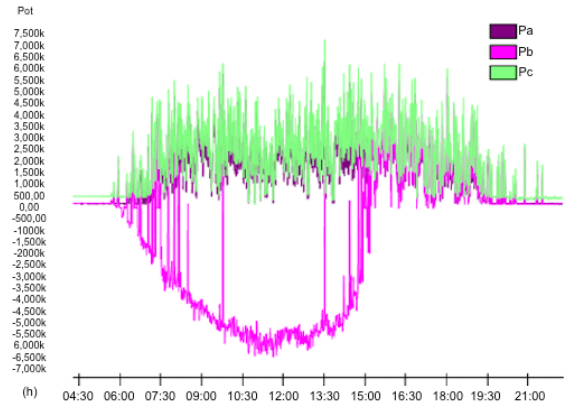


Fig. 12. Comportamento das Potências Ativas.

Na Fig. 13 observa-se o comportamento das potências reativas, destacando-se as alterações provocadas na fase “b” com geração solar. Para garantir o controle de tensão e a estabilidade do sistema em alguns momentos o inversor altera o fator de potência da geração, como observa-se o consumo de potência reativa da rede elétrica pela fase “b”, justamente onde está sendo injetada a potência do sistema fotovoltaico pelo inversor monofásico

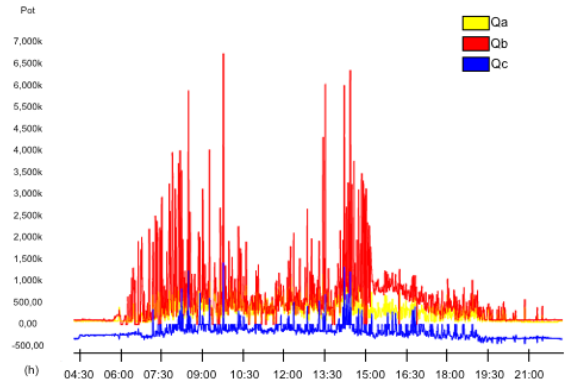


Fig. 13. Comportamento das Potências Reativas.

A partir das medições verifica-se que a instalação de um sistema de geração híbrida provocou um aumento de tensão médio de, aproximadamente, 14% ao longo dos horários do dia de maior favorecimento climatológico médio combinado, ou seja, nos horários onde ocorreu a maior geração híbrida de energia.

Na Fig. 14 pode-se observar em detalhes o aumento de tensão provocado pela geração solar em relação à fase sem geração (“a”) e na Fig. 15 pode-se observar em detalhes o aumento de tensão provocado pela geração eólica em relação também à fase (“a”) sem geração. Tal fato pode ser verificado em face às características das cargas trifásicas conectadas ao quadro de conexão utilizado, principalmente os sistemas de elevadores alimentados pelo barramento

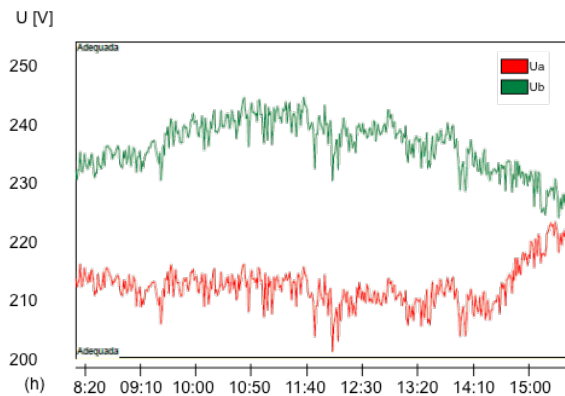


Fig. 14. Comportamento da Tensão do sistema Fotovoltaico em relação a fase sem geração

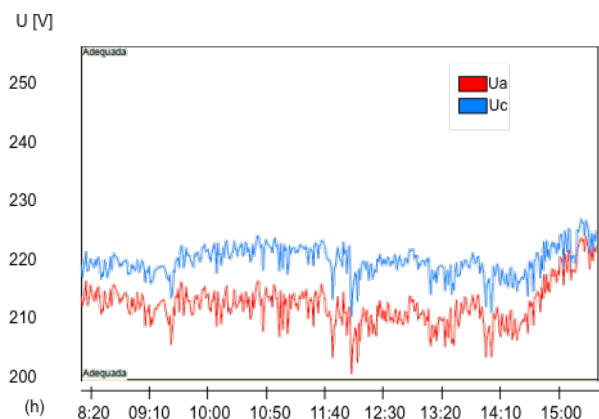


Fig. 15. Comportamento da Tensão do sistema Eólico em relação a fase sem geração.

Do mesmo modo que no outro sistema puramente fotovoltaico analisado neste trabalho, é interessante destacar o comportamento das potências injetadas e a intermitência nos dados medidos, visto que tal condição operativa é resultado de características climáticas que são inerentes a este tipo de geração e também da presença de cargas como elevadores que provocam rápidas variações de carga.

A partir dos dados obtidos e utilizando recursos computacionais foi possível calcular as distorções harmônicas de tensão e de corrente ao longo do dia para a geração eólica e para a geração solar, operando de forma híbrida, como pode ser observado nas Fig. 16 a 19.

No período de maior geração solar a distorção harmônica do sistema atingiu 77,15% para corrente e 3,32% para tensão e no período de maior geração eólica a distorção harmônica do sistema atingiu 91,21% para corrente e 2,95% para tensão.

Assim, observa-se que os valores de DHT_V encontrados também não infringiram os limites recomendados pelo PRODIST [18]. Já o DHT_I , não é regulamentado pelo PRODIST.

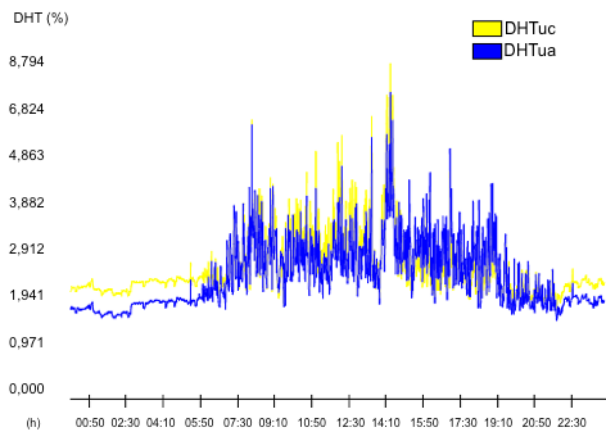


Fig. 16. DHT Tensão do sistema Eólico em relação a fase sem geração.

Posteriormente aos estudos dos níveis de tensão e das distorções harmônicas aqui apresentados, foi analisado o grau de desequilíbrio de tensão na rede elétrica, o que pode ser verificado na Fig. 20. Pode-se observar que o sistema de geração híbrido, aqui estudado, atinge níveis de desequilíbrios de tensão significativos chegando a 4,13%, conforme a IEC, nos momentos de maior favorecimento climatológico. Ressalta-se que ambas as gerações contribuem para este desequilíbrio.

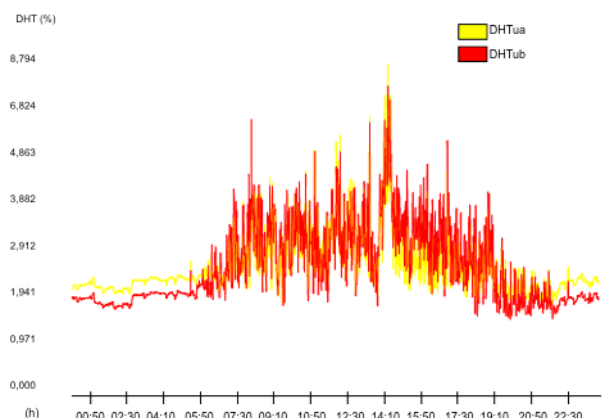


Fig. 17. DHT Tensão do sistema Fotovoltaico em relação a fase sem geração.

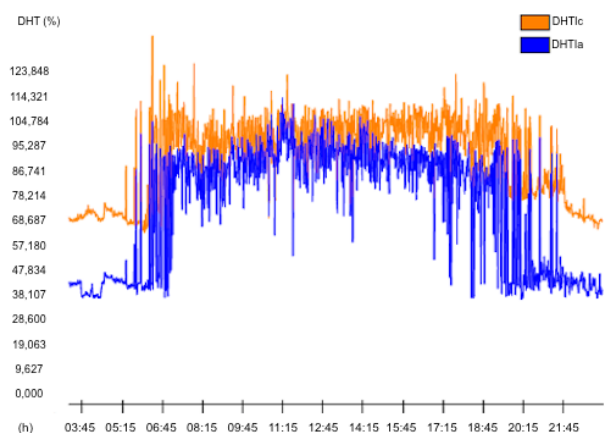


Fig. 18. DHT Corrente do sistema Eólico em relação a fase sem geração.

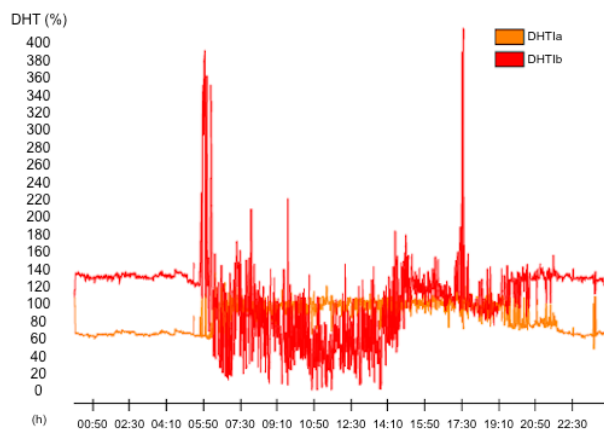


Fig. 19. DHT Corrente do sistema Fotovoltaico em relação a fase sem geração.

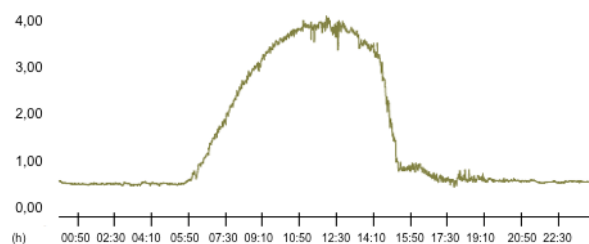


Fig. 20. Desequilíbrio de tensão percentual conforme IEC.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho analisou dois sistemas de geração de energia distintos com o objetivo de verificar o comportamento da geração híbrida em comparação a um sistema puramente fotovoltaico, seja em relação aos níveis de tensão nas três fases do sistema elétrico, às distorções harmônicas e também em relação do desequilíbrio de tensão

No sistema puramente solar, verificou-se que apesar dos aumentos nos indicadores de tensão e de distorções harmônicas, estes não infringiram as recomendações normativas. Além disso, observou-se que os acréscimos mais significativos nas amplitudes das tensões ocorreram nos horários de maior irradiação solar.

Já no sistema híbrido solar - eólico, as medições registraram um aumento de tensão médio de, aproximadamente, 14% nos horários de maior favorecimento climatológico para a geração híbrida combinada. Adicionalmente, observou-se que no período de maior geração de energia solar a distorção harmônica do sistema atingiu 77,15% para corrente e 3,32% para tensão, enquanto que no período de maior geração de energia eólica a distorção harmônica do sistema atingiu 91,21% para corrente e 2,95% para tensão.

Os desequilíbrios de tensão encontrados no sistema puramente solar foram inferiores a 1%, sendo que foi favorecido pela potência não tão elevada do sistema fotovoltaico (5kWp) e sua injeção de forma bifásica nas fases "a" e "b" do sistema. Já para o sistema híbrido solar - eólico, estes desequilíbrios de tensão atingiram 4,13%, portanto razoavelmente mais elevados, tendo como prováveis causas as potências um pouco maiores das fontes injetadas (7,5 kWp do sistema solar) combinada com 1,5kWp do sistema eólico, a sua injeção de forma monofásica nas fases "b" e "c" respectivamente, além naturalmente das características das cargas alimentadas por estes barramentos elétricos.

Conclui-se com este trabalho que os sistemas híbridos de geração solar - eólico podem ser efetivamente utilizados, em sistemas comerciais de pequeno porte, a exemplo dos estudos de caso deste trabalho, contribuindo assim para a diversificação da matriz de geração de eletricidade do país, trazendo benefícios para o sistema elétrico, bem como para toda a comunidade.

V. REFERÊNCIAS

- [1] V. N. Jayasankar, M. V. Gururaj, U. Vinatha, "A study on Hybrid Renewable Energy Source Interface to the Non-ideal Grid at Distribution Level with Power Quality Improvements". IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), 2016.
- [2] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, "Renewables 2016 Global Status Report". REN21, 2015.
- [3] K.V. Suslov, N. N. Solonina, A.S. Smirnov, "Distributed Power Quality Monitoring". IEEE 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014.
- [4] A.A.E. Gado, "Impact the Expansion of the Production of Generation of Solar Power on the Low Voltage Network in Egypt". IEEE Saudi Arabia Smart Grid, 2015.
- [5] K. Rahimi, S. Mohajeryami, A. Majzoobi, "Effects of Photovoltaic Systems on Power Quality". IEEE North American Power Symposium, 2016.
- [6] X. Liang, "Emerging Power Quality Challenges Due to Integration of Renewable Energy Sources". IEEE Transactions on Industry Applications, 2016.
- [7] F. Jiang, X. Zou, H. Liu, "Performance Test and Analysis of a PV Power Plant in Hami". IEEE Chinese Control and Decision Conference, 2016.
- [8] C. Nicola et al, "Quality Analysis of Electric Energy using an Interface Developed in LabVIEW Environment," IEEE International Conference on Applied and Theoretical Electricity, 2016.
- [9] C. Yuan, X. Guanghan, W. Huayang, Y. Yanju, "Harmonic Current Detection and Suppression Based on neural network". IEEE Chinese Guidance Navigation and Control Conference, 2016.
- [10] G.W. Chang, Y. H. Chen, L. Y. Hsu, Y. Y. Chen, Y. R. Chang, Y. D. Lee, "Study of Impact on High PV-penetrated Feeder Voltage Due to Moving Cloud Shadows". IEEE International Symposium on Computer, Consumer and Control, 2016.
- [11] M. Dimitrijevic, N. Serbia, D. Stevanovi, M. Stošovi, M. Petronijevi, P. Petkovi, "Compensation of Harmonics in Smart Grid using Photovoltaic Energy Source" IEEE International Symposium on Industrial Electronics (INDEL), 2016.
- [12] G. Tanasescu, S. Busoi, B. Gorgan, P. Notingher, "Photovoltaic Power Plants Contribution to the Flicker Level in the Medium Voltage Energy Network". IEEE Conference on Diagnostic in Electrical Engineering, 2016.
- [13] Q. Huang, Y. Shi, Y. Wang, L. Lu, Y. Cui, "Multi-turbine wind-solar hybrid system". Elsevier Renewable Energy, 2015.
- [14] S. Hurmeydan, A. Rosin, T. Vinnal, "Effects of PV Microgeneration on Rural LV Network Voltage Quality – Harmonics and Unbalance". IEEE Electric Power Quality and Supply Reliability, 2016.
- [15] L. Jessen, F.W. Fuchs, "Investigation of Renewable Energy Generation and Load Impact on the Grid Impedance at Different Points of Connection in Public Low Voltage Grids to Support Grid Integration of Renewable Energies". IEEE 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), 2016.
- [16] EMBRASUL RA 7000, Disponível em: <http://www.embrasul.com.br/solucoes-detalhes?id=5&title=RE7000>.
- [17] MATLAB MATHWORKS, Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [18] PRODIST MÓDULO 8, Disponível em: http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/Módulo8_Revisão_8/9c78cfab-a7d7-4066-b6ba-cfbda3058d19