

ESTUDO DE CASOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DISTRIBUÍDOS: UFVS DE 2,16 KWP E DE 10,28 KWP, INSTALADAS NO NÚCLEO DE PESQUISA EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Hiury S. Gomes, Fernando C. Melo e Luiz C. G. Freitas

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT)

Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP)

Uberlândia - Minas Gerais

hiurygomes@gmail.com, lcgfreitas@yahoo.com.br, fernandocardoso101@gmail.com

Resumo – A inserção da energia fotovoltaica como fonte de energia limpa e renovável na matriz energética brasileira ganhou destaque considerável no cenário nacional e internacional através da RN482 da ANEEL em vigor desde dezembro de 2012 e do Leilão de Reserva realizado exclusivamente para a energia fotovoltaica em 2014, onde de 1,048 MWp em projetos foram contratados. Não obstante aos avanços alcançados, principalmente no que tange os Sistemas Fotovoltaicos Distribuídos, muitos desafios ainda precisam ser vencidos para que a inserção desta fonte de energia na matriz energética brasileira se torne mais expressiva. Neste cenário, destaca-se que, além dos custos envolvidos, a falta de conhecimento acerca das tecnologias de módulos fotovoltaicos, inversores solares, bem como a falta de mão de obra especializada, contribuem para que, mesmo após 4 anos da entrada em vigor da RN 482 e depois de seu aprimoramento pela RN 687 em 2015 pela ANEEL, a implantação de unidades de micro e minigeração distribuída baseada em sistemas fotovoltaicos ainda seja inexpressiva. Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo apresentar resultados práticos e teóricos que evidenciam a eficácia das ferramentas computacionais e equipamentos utilizados para projeto e implantação de Usinas Fotovoltaicas Distribuídas bem como seu ótimo desempenho na geração de energia elétrica.

Palavras-Chave – Energia Fotovoltaica, Geração Distribuída, Inversor, Microgeração.

CASE STUDY DISTRIBUTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: 2.16KWP AND 10.28KWP PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS INSTALLED AT POWER ELECTRONICS RESEARCH GROUP

Abstract - The insertion of photovoltaics as a clean and renewable energy source in the Brazilian energy matrix has gained considerable prominence in the national and international scenarios by ANEEL normative resolution RN 482 in effect since December 2012 and by the Reserve Auction held exclusively for photovoltaics in 2014, where more than 1.048 GWp were commissioned. Despite the achieved progress, especially concerning the Distributed Generation of Photovoltaics Systems, many challenges remain to be overcome so that the insertion of this energy

source in Brazilian energy matrix will become more expressive. In this scenario, it is emphasized that, in addition to the costs involved, the lack of knowledge about the photovoltaic modules, solar inverter Technologies, design of direct current (DC) installations, as well as the lack of skilled labor, contribute to, even after four years of ANEEL's RN 482 and after its improvement by RN 687 in 2015 by ANEEL, the implementation of units of distributed micro and minigeneration based on photovoltaic systems is still inexpressive. In this context, this paper aims to present practical and theoretical results that demonstrate the effectiveness of computational tools as well as the equipment used for designing and implementing the Distributed Photovoltaic Plants as well as its excellent performance in generating electricity.

Keywords - Photovoltaic Energy, Distributed Generation, Inverter, Microgeneration.

I. INTRODUÇÃO

De acordo com as estatísticas apresentadas na REN 21 (*Renewable Energy Policy Network*, 2013) [1], a demanda global por energia renovável aumentou consideravelmente desde 2012, apesar da crise econômica que atingiu praticamente todos os países do mundo. As fontes renováveis de energia foram responsáveis por cerca de 19% da energia global consumida ao término de 2011. Desse total, as fontes renováveis modernas são responsáveis por 9,7%. Com este derradeiro crescimento, a capacidade total de sistemas de energia solar fotovoltaica (FV) autônomos e conectados à rede elétrica cresceu anualmente em média de 60%, sendo significativamente maior que as taxas de crescimento obtidas pelas outras tecnologias renováveis. De acordo com EPIA (*European Photovoltaic Industry Association*, 2014), a capacidade instalada mundial da energia fotovoltaica atingiu valores próximos a 180 GW em 2014.

No Brasil, devido ao grande potencial para geração de energia fotovoltaica, observam-se recentes avanços no contexto da inserção da energia fotovoltaica centralizada, merecendo especial destaque o primeiro Leilão de Energia de Reserva (LER) ocorrido em outubro de 2014 através da Portaria n° 236/2014 do Ministério de Minas e Energia. Segundo a EPE (Empresa de Pesquisa Energética) foram contratados 31 projetos, totalizando 1.048 MW de capacidade instalada que vão injetar cerca de 889,7 MW na matriz energética brasileira a partir de 2017. Em novembro de 2015 foram realizados mais dois LER, onde

foram contratados 2.653 MW de energia solar fotovoltaica, com início de suprimento em 2017 e 2018.

Não obstante aos avanços alcançados, segundo dados da ANEEL, apenas cerca de 0,01% da energia elétrica consumida no país advém da energia solar. Dessa forma, diante do cenário atual caracterizado por uma grave crise no setor hidrológico que repercute com consequências nefastas na capacidade de geração de energia elétrica, observa-se que a Energia Fotovoltaica deve, o quanto antes, ser incorporada de forma substancial na matriz energética brasileira, devendo-se considerar tanto geradores fotovoltaicos centralizados (UFV de grande porte), quanto os geradores fotovoltaicos distribuídos os quais podem ser instalados nos telhados de residências, comércios, hospitais, escolas, estacionamentos e indústrias por todo o Brasil.

Diante deste cenário, este artigo apresenta os resultados decorrentes da execução e análise de desempenho de uma Usina Fotovoltaica de 2,16 kWp e uma breve avaliação de um caso de expansão desta mesma para 10,28 kWp, conectada à Rede Elétrica de Baixa Tensão. Operante até o fim de 2015 com 2,16 kWp, esta usina se encontrava instalada nas dependências do Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia (UFV NUPEP-FEELT-UFU), porém hoje este sistema já foi substituído por um outro maior que será brevemente apresentado posteriormente neste artigo. Adicionalmente, são apresentados dados preliminares de irradiação e temperatura obtidos com a instalação de uma Estação Solarimétrica no local de instalação da microusina fotovoltaica em pauta. Dessa forma, este trabalho tem como principal objetivo esclarecer diversas incertezas que consumidores em geral possuem e que dificultam a ampliação de geradores fotovoltaicos distribuídos em todo o Brasil. Para tanto, são apresentados os devidos esclarecimentos quanto aos principais agentes envolvidos (Concessionárias, Consumidores, Estado e Empresas) afim de facilitar a tomada de decisão com relação à instalação ou não de uma unidade de mini ou microgeração distribuída.

II. PROJETO E ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 2,16 kWp CONECTADO À REDE ELÉTRICA

Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFCR) são aqueles em que o excedente de energia elétrica gerada é injetado na rede elétrica da concessionária local e, portanto, elementos acumuladores de energia elétrica, tal como baterias, não são utilizados. A eliminação do banco de baterias é vantajosa, pois as mesmas apresentam tempo de vida útil relativamente curto e custo elevado.

A região de Uberlândia está situada na Latitude $18^{\circ}55'11,50''$ Sul e Longitude $48^{\circ}15'31,06''$ Oeste, e a 863 metros acima do nível do mar, com temperatura média anual em torno de 22°C . Segundo dados do INPE, Uberlândia está entre as melhores regiões do país em termos de potencial para produção de energia elétrica, com irradiação global média no plano horizontal em torno de $1984,5 \text{ kWh/m}^2\text{-ano}$, proporcionando, em média, algo em torno de $1.500,0 \text{ kWh/kWp/ano}$.

A. Análise de Acesso Solar

Na Fig. 1 é apresentada a reprodução das instalações do Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP) para fins de análise computacional acerca do desempenho do sistema. O

estudo de caso desenvolvido no NUPEP trata de uma Usina Fotovoltaica (UFV) com capacidade de 2.160 Wp (Watt-pico) obtida através da conexão em série de 16 módulos fotovoltaicos, sendo 08 de 135 Wp (KD135X-UPU) e 08 de 140 Wp (KD140X-UPU) da Kyocera. Estes foram orientados para o Norte com desvio azimutal de -13° e inclinação de 20° , alimentando um inversor FRONIUS IG 2000, o qual permite a conexão com a rede elétrica.

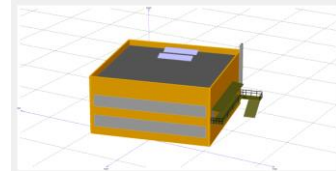


Fig. 1. Reprodução das instalações do NUPEP para avaliação computacional acerca do potencial de geração de energia elétrica.

A escolha do local de instalação levou em consideração a análise do acesso solar realizada através da medição de irradiação solar em 8 (oito) diferentes pontos na superfície do telhado. Na Fig. 2 são apresentados os resultados obtidos, ilustrando os pontos de medição e o mapa do acesso solar obtido. Conforme observado, devido à própria característica da edificação escolhida e a existência de árvores de grande porte nas proximidades do telhado, há uma região onde a incidência de luz solar é extremamente reduzida, devendo, portanto, ser evitada afim de maximizar a produção de energia elétrica evitando perdas decorrentes de sombreamento dos módulos.

A Fig. 3 ilustra o percurso solar ao longo do ano em um ponto de medição evidenciando as obstruções causadas pela árvore de grande porte próxima ao ponto 3 (Figura 2).

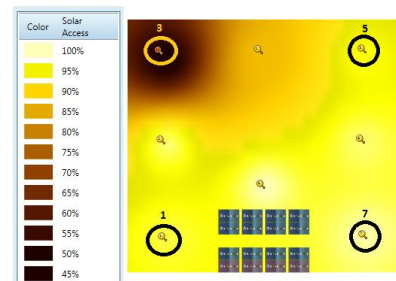


Fig. 2. Análise do acesso solar no local de instalação escolhido.

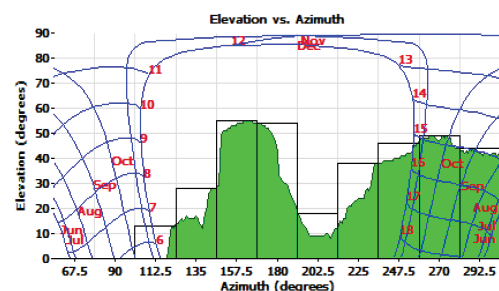


Fig. 2. Exemplo de curva de sombreamento obtida no telhado do local de instalação (ponto 3) e também utilizada para avaliação computacional do desempenho do sistema.

B. Sistema Fotovoltaico Executado

A Fig. 4 as instalações dos módulos FV e componentes utilizados para aquisição de dados de sensores (SensorBox), aquisição de dados de geração (Datalogger) e o inversor solar utilizado para injeção de potência na rede. Todos os componentes

utilizados foram especificados para a obtenção da máxima geração de energia elétrica com o mínimo de perdas seguindo-se as normas nacionais [8], [12], [13] assim como normas internacionais [10], [12], [6].

Os valores de tensão e corrente para o ponto de máxima potência dos módulos são fornecidos levando em consideração as Condições Padrão de Testes (STC), conforme apresentado na Tabela I.

Na Tabela II são apresentados os principais parâmetros encontrados na folha de dados do Inversor Solar utilizado. Este é responsável pela extração da máxima potência instantânea disponibilizada pelo arranjo fotovoltaico instalado e efetua o paralelismo e o sincronismo com a rede elétrica. Maiores detalhes acerca do dimensionamento de cabos e dispositivos de proteção utilizados podem ser encontrados em [7].



(a)



(b)

Fig. 4. (a) Foto dos 16 módulos instalados; (b) Inversor Fronius IG e componentes de sensoriamento e monitoramento.

TABELA I. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS (STC: $T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{ W/m}^2$, $AM=1.5$).

08 Módulos Fotovoltaicos Kyocera KD135SX-UPU	
Potência, P_{max}	= 135 W
Tensão MPP, V_{MPP}	= 17,7 V
Corrente MPP, I_{MPP}	= 7,63 A
Tensão de Circuito Aberto, V_{OC}	= 22,1 V
Corrente de Curto-Circuito, I_{SC}	= 8,37 A
Eficiência do Módulo, η	= 14,0% - Classe A
08 Módulos Fotovoltaicos Kyocera KD140SX-UPU	
Potência, P_{max}	= 140 W
Tensão MPP, V_{MPP}	= 17,7 V
Corrente MPP, I_{MPP}	= 7,91 A
Tensão de Circuito Aberto, V_{OC}	= 22,1 V
Corrente de Curto-Circuito, I_{SC}	= 8,68 A
Eficiência do Módulo, η	= 14,0% - Classe A

TABELA II. CARACTERÍSTICAS DO INVERSOR FRONIUS IG 2000.

Dados de entrada CC	
Potência do Painel recomendada	1500 a 2500 Wp
Máxima tensão de entrada DC	500 V
Faixa de tensão de operação DC de MPPT	150 a 450 V

Máxima corrente de entrada DC	13,6 A
Dados de saída CA	
Máxima potência de saída a 40°C	2000 W
Tensão nominal de saída CA	220 V
Faixa de tensão da rede elétrica CA	180 a 264 V
Máxima corrente CA	8,35 A
Máxima corrente de retorno	0 A
Faixa de frequência de operação	59,3 a 60,5 Hz
Distorção harmônica	< 5 %
Fator de potência	1
Dados gerais	
Máxima eficiência	95,2 %
Consumo durante a operação	7 W
Consumo em <i>stand-by</i>	<0,15 W (noite)
Faixa de temperatura ambiente	- 25 a 50 $^{\circ}\text{C}$

III. DISCUSSÃO ACERCA DOS RESULTADOS OBTIDOS

A. Análise de desempenho

O sistema em questão foi colocado em operação no dia 28 de maio de 2013 em caráter experimental e a partir de janeiro de 2014 foi conectado à rede em definitivo. A partir de então, a geração de energia elétrica foi monitorada e os dados da geração diária foram armazenados em um sistema de aquisição dedicado. Os dados obtidos foram confrontados com os dados de projeto e a elevada eficiência do sistema foi comprovada. A Tabela III evidencia a síntese dos resultados obtidos ao longo do período de operação avaliado do sistema.

TABELA III. SÍNTESE DOS RESULTADOS ENCONTRADOS

Item	Projetado	Medido
Geração de Energia Anual	3.215 kWh/Ano	3.077,11 kWh/Ano
Produção Normalizada	1.489,00 kWh/kWp	1.454,21 kWh/kWp
Fator de capacidade	16,99%	16,26%
Taxa de Desempenho	71,5%	69,18%

Para desenvolvimento de um projeto e estimativa de produção energética, utilizou-se o software PVSYST, cujo juntamente com dados climatológicos, gera o nível de geração a se esperar.

Para a região de Uberlândia, em que a irradiação global média no plano horizontal em torno de $1.984,5\text{ kWh/m}^2\cdot\text{ano}$, os resultados apresentados na Tabela III se mostram bastante satisfatórios. A Fig. 6 evidencia a concordância entre a geração esperada por projeto e a geração averiguada durante a operação do sistema no ano de 2014, onde a geração de projeto foi baseada nos dados de irradiancia fornecidos pelo INPE [2], [7].

Para o ano de 2015, de forma a se obter melhores fundamentos de desempenho através de comparações de geração medida e geração esperada, confrontou-se os dados medidos do sistema e os dados de projetos derivados de diversas fontes de irradiancia. As plataformas utilizadas como referência foram: NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) [3], INPE, NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) [4] e até as próprias informações de irradiancia derivadas do Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos da UFU. Portanto, a Fig. 7 em sequência apresenta, em gráficos, comparações entre a geração avaliada durante 2015 e a geração estipulada em projeto devido a cada plataforma de dados climatológicos. Vale mencionar que devido ao desligamento do inversor solar, para utilização da geração CC dos módulos em pesquisas desenvolvidas por membros do próprio laboratório, o mês de abril/2015 não foi monitorado e que a partir junho/2015 o inversor solar

apresentou problema técnicos que o impossibilitou de continuar operando, portanto, também não foi possível realizar o monitoramento dos últimos 7 meses do ano. De forma complementar, implementou-se um gráfico para comparação das taxas de desempenho de cada projeto e a taxa de desempenho do próprio sistema, como mostra a Fig. 8. Em geral, pode-se afirmar que o sistema está operando conforme o previsto em projeto pois, em média, os dados reais e os dados de projeto são próximos.

Um dos principais fatores que contribuíram para uma geração de energia média mensal inferior ao estimado por projeto

pode ser atribuído, principalmente, às perdas por *Mismatch* (associação de módulos diferentes no painel fotovoltaico), as quais serão objeto de estudo futuramente, assim como pela baixa eficiência dos módulos utilizados (14%) e à diferença entre a potência real e a informada pelo fabricante.

Dessa forma, esses resultados indicam que ainda se faz necessário analisar a eficiência do inversor solar, assim como os padrões de insolação e de temperatura de operação dos módulos ao longo do ano.

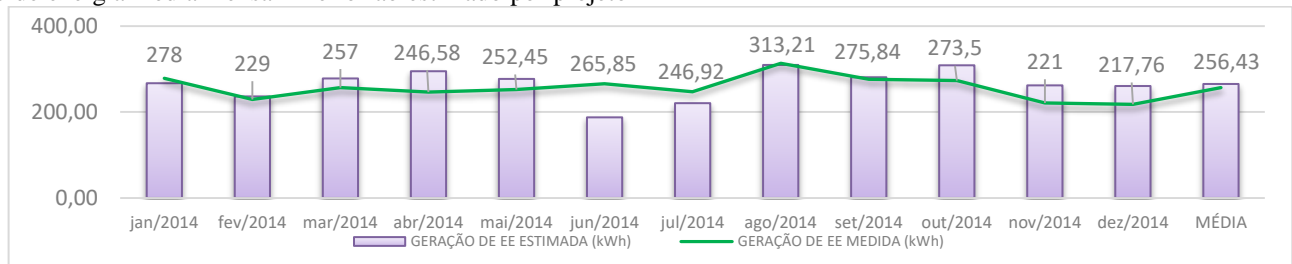


Fig. 6. Comparação entre os valores medidos e estimados via plataforma computacional utilizados dados do INPE.

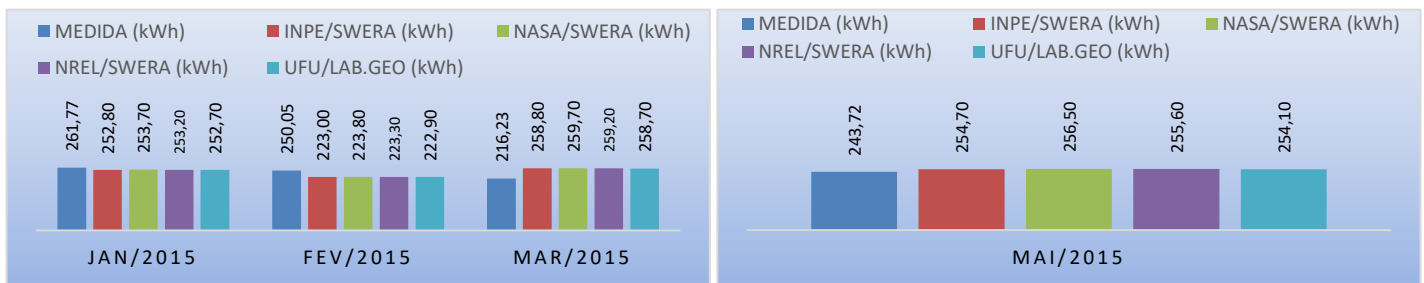


Fig. 7. Comparação entre geração estimada e projetada de acordo com as 4 plataformas de dados climatológicos.

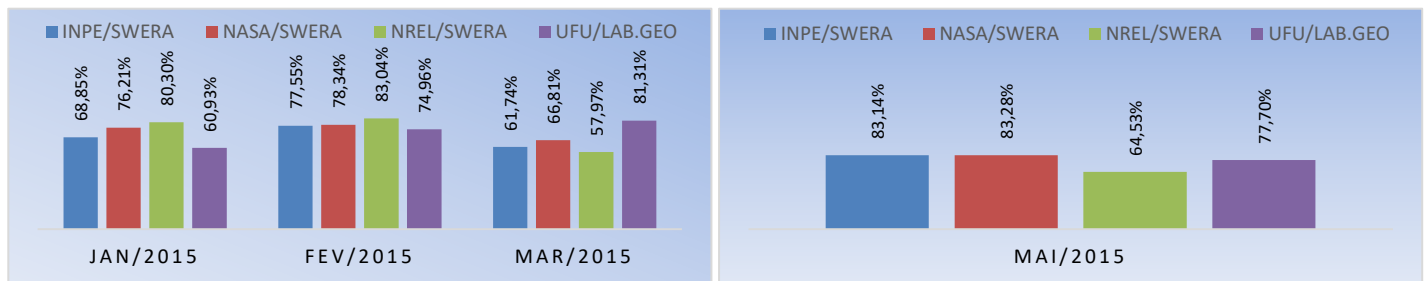


Fig. 8. Comparação entre taxa de desempenho estimada e projetada de acordo com as 4 plataformas de dados climatológicos.

B. Análise da qualidade de energia injetada na rede

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos através de medições dos parâmetros de qualidade de energia elétrica no ponto de conexão da UFV à rede de distribuição interna do Campus, a saber: Distorção Harmônica Total da Tensão – DHT_V ; Distorção Harmônica Total da Corrente - DHT_I e Frequência. A Fig. 11(a) mostra a forma de onda da Tensão e Corrente na saída do inversor, e as Fig. 11(b) e Fig. 11(c) apresentam o conteúdo harmônico destas no ponto de conexão com a

rede, no qual a distorção harmônica da tensão medida foi em torno de 2,99% e da corrente medida foi de 6,42%. Conforme esperado, a distorção harmônica da tensão na saída do inversor fica abaixo dos 5% previstos pela norma. Já os elevados valores da DHT_I , conforme evidenciado em [15], podem ser atribuídos às cargas não lineares presentes na instalação (Reatores eletrônicos, fontes de alimentação chaveadas, etc.) e deve ser aferida durante os ensaios de conformidade a que os inversores solares devem ser submetidos.

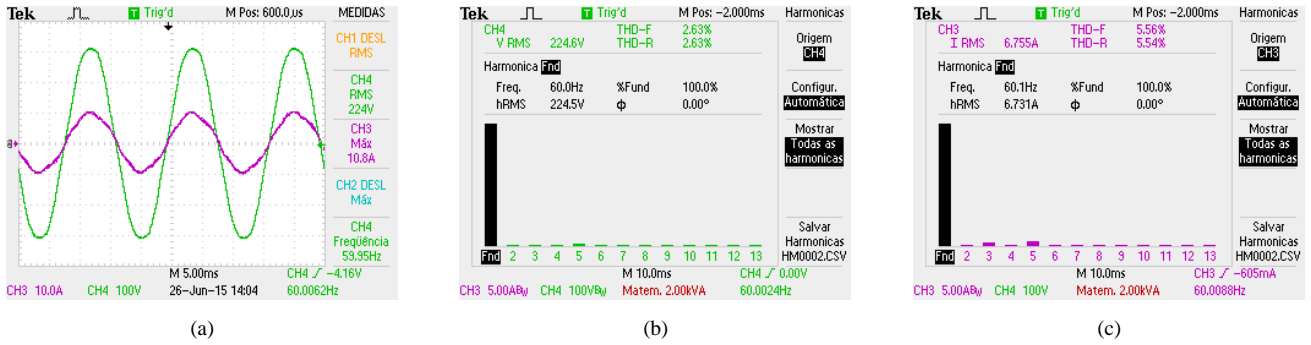


Fig. 11. (a) Tensão e Corrente no ponto de conexão do inversor FRONIUS com a Rede Elétrica, (b) Componentes harmônicas da tensão no ponto de conexão do inversor FRONIUS com a Rede Elétrica, (c) Componentes harmônicas da corrente no ponto de conexão do inversor FRONIUS com a Rede Elétrica.

IV. EXPANSÃO DA UFV NUPEP

C. Expansão do Sistema Fotovoltaico em Estudo

Com o intuito de estar sempre em crescente desenvolvimento em pesquisas acadêmicas, o NUPEP, em parceria com a FAPEMIG, CNPQ e a empresa BRC ENERGIA LIMPA, planejou e implementou uma nova estrutura de geração fotovoltaica de maior porte e de melhores fundamentos para a elaboração de pesquisas científicas voltadas para a área de energias renováveis. As novas instalações do laboratório de pesquisa foram implementadas com o intuito de fornecer aos alunos de graduação, pós-graduação e doutores, maiores fontes de informações para elaboração de planos de trabalho diversificados e inovadores.

O novo arranjo fotovoltaico do NUPEP conta com uma variedade de marcas de módulos FV, onde estes diferenciam-se entre si em capacidade de geração e parâmetros intrínsecos aos modelos de cada marca. O laboratório conta também com um novo inversor.

Atualmente, estão instalados 48 módulos FV sobre o telhado do NUPEP, sendo, 16 módulos na marca Canadian Solar, 8 módulos da SunEarth, 8 da Amerisolar e 16 da Kyocera, o novo inversor solar possui capacidade de 5 kW e é da fabricante ABB. A Tabela IV a baixo expressa de forma detalhada o modelo, marca e as respectivas informações mais relevantes de cada tipo de equipamento implementado.

TABELA IV. PRINCÍPAIS CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES.

ABB / PVI-5000-TL-OUTD	
Potência de operação recomendada	5000 W
Número de strings na entrada	2 strings
Número de inversores instalados	1
FRONIUS / FRONIUS IG 2000	
Potência de operação recomendada	2000 W
Número de strings na entrada	1 string
Número de inversores instalados	1
KYOCERA / KD135X-UPU	
Potência no ponto máximo de atuação	135 Wp
Tipo de células	Policristalino
Número de módulos instalados	8
KYOCERA / KD140X-UPU	
Potência no ponto máximo de atuação	140 Wp
Tipo de células	Policristalino
Número de módulos instalados	8
CANADIAN SOLAR / CS6P-255P	
Potência no ponto máximo de atuação	255 Wp
Tipo de células	Policristalino
Número de módulos instalados	16
SUNEARTH / TPB156x156-60-P	
Potência no ponto máximo de atuação	250 Wp
Tipo de células	Policristalino

AMERISOLAR / AS-6P30-250W	
Número de módulos instalados	8
Potência no ponto máximo de atuação	250 Wp
Tipo de células	Policristalino
Número de módulos instalados	8

Sendo distribuídos em 3 fileiras, inclinadas em 20° e seu azimute fixado em -13°, estando orientadas para o norte. A estrutura de fixação dos novos arranjos FV foram alteradas para que se evitasse qualquer tipo de sombra projetada sobre os painéis por alguma árvore próxima ao telhado ou estrutura predial. A Fig. 12 expõe a distribuição dos painéis FV, seus posicionamentos, estrutura de fixação ao telhado do prédio e a localização da fileira de cada marca de módulo FV.



Fig. 12. Arranjos FV e seu formato de distribuição segundo suas respectivas marcas.

Optou-se pela ligação do arranjo dos módulos da Canadian Solar ao inversor ABB e a ligação do arranjo SunEarth ao inversor FRONIUS. No momento o arranjo Kyocera está sendo utilizado apenas para extração de dados em pesquisas e o arranjo Amerisolar está isolado à espera da chegada de um novo inversor para sua conexão. A Fig. 13 a seguir apresenta os inversores com seus respectivos cabos de entrada.

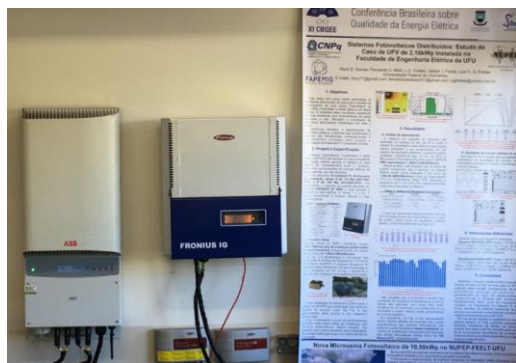


Fig. 13. Inversores de conexão à rede e seus respectivos cabos de entrada.

D. Produção Avaliada da Nova UFV

De forma a continuar os trabalhos acerca do monitoramento da produção energética dos inversores, estão sendo desenvolvidas atividades para coleta e aquisição de tais dados para elaboração de novos estudos. O gráfico a seguir, Fig. 14, expõe a geração dos inversores operantes no NUPEP, ressaltando que o atual nível de produção ainda está a baixo do real potencial de geração, isto devido aos módulos Amerisolar ainda estarem inoperantes devido a necessidade de instalação de mais um inversor solar para seu acoplamento. Esta medida já está em andamento e o equipamento será evidenciado em futuros projetos.

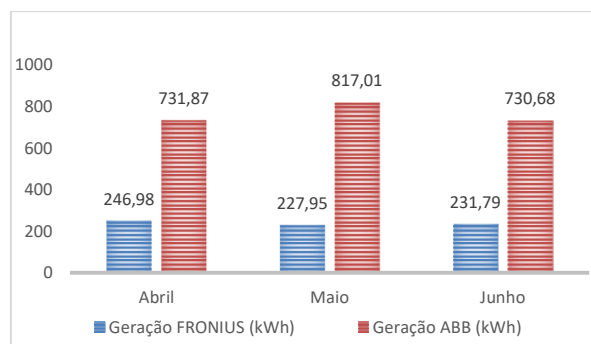


Fig. 14. Geração elétrica dos inversores FRONIUS e ABB desde o início das operações da nova UFV.

V. DESDOBRAMENTO DO PROJETO

A. Para o Grupo de Pesquisa

Além dos trabalhos de pesquisa e desenvolvimento de Inversores e técnicas de controle para extração de máxima potência e para injeção de potência na rede elétrica, em parceria com a empresa BRC ENERGIA LIMPA, trabalhos voltados para avaliação de desempenho de Micro e Miniusinas fotovoltaicas distribuídas vem sendo realizados. Sistemas instalados em Uberlândia e região estão sendo monitorados e os resultados práticos encontrados até agora confirmam o grande potencial da região sudeste e centro-oeste para geração fotovoltaica.

B. Equipe NUPEP

Como agradecimento e homenagem a todos os membros envolvidos na implementação da nova UFV NUPEP, a Fig. 15 a seguir expõe os responsáveis por tal feito.



Fig. 15. Equipe do NUPEP envolvida na implementação da UFV de 10,28 em frente ao sistema em questão.

VI. CONCLUSÕES

Dentre as várias possibilidades de microgeração e minigeração distribuída existentes, as quais foram regulamentadas pela RN 482 da ANEEL, o emprego dos painéis fotovoltaicos tem ganhado expressivo destaque, devido, entre outros motivos, ao elevado nível de radiação solar média existente em nosso país; à facilidade de instalação e manutenção deste sistema quando comparado por exemplo ao eólico; à não necessidade de ocupação de novas áreas uma vez que os painéis, via de regra, são instalados em telhados e terraços e, por fim, ao fato da incidência solar anual sofrer menor variação média quando comparada à energia eólica.

Neste cenário, este trabalho apresenta resultados práticos e teóricos que evidenciam a eficácia das ferramentas computacionais assim como de equipamentos utilizados para o projeto e implantação de Usinas Fotovoltaicas Distribuídas. O sistema em questão foi colocado em operação no dia 28 de maio de 2013 em caráter experimental e a partir de janeiro de 2014 foi conectado à rede em definitivo. Os dados obtidos foram confrontados com os dados de projeto e a elevada eficiência do sistema foi comprovada.

No contexto da qualidade da energia elétrica injetada, conforme esperado, a distorção harmônica da tensão na saída do inversor fica abaixo dos 5% previstos pela norma. Já a distorção harmônica da corrente é variável, estando fortemente atrelada às características das cargas não lineares presentes na instalação (reatores eletrônicos, fontes de alimentação chaveadas, etc.) e deve ser aferida durante os ensaios de conformidade a que os inversores solares devem ser submetidos.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] MARTINOT, E.; SAWIN, J. L. **Renewables Global Status Report**. REN 21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century), Frankfurt School, p. 18-25, 2013. Disponível em: <<http://www.ren21.net/REN21Activities/GlobalStatusReport.aspx>>. Acesso em: 04 out. 2013;
- [2] INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Projeto SWERA/INPE**. Disponível em: <<http://maps.nrel.gov/SWERA>>. Acesso em: 07 ago. 2014.
- [3] **National Aeronautics and Space Administration. Projeto SWERA/NASA**. Disponível em: <<http://maps.nrel.gov/SWERA>>. Acesso em: 12 dez. 2015.
- [4] **National Renewable Energy Laboratory. Projeto SWERA/NREL**. Disponível em: <<http://maps.nrel.gov/SWERA>>. Acesso em: 12 dez. 2015.
- [5] SALAMONI, I.T.; RÜTHER, R. **O Potencial Brasileiro da Geração Solar Fotovoltaica Conectada à Rede Elétrica: Análise de Paridade**

- de Rede.** IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. 2007.
- [6] ROVERE, E. L. L.; VALLE, C.; PEREIRA, A. **Subsídios para o Planejamento da Promoção da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil. Relatório Técnico do Projeto “A Carta do Sol”**; elaborada pela Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia (Coppe) – UFRJ; assinada pelos secretários estaduais do Meio Ambiente, Carlos Minc, e de Desenvolvimento Econômico, Energia, Indústria e Serviços, Júlio Bueno, 2011.
- [7] PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R., ABREU, S.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 1ª Edição, 2006.
- [8] ALMEIDA, M. P. **Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**, 2012. 161 f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- [9] SPADUTO, R. R.; MELO, F. C.; CARVALHO, R. A.; FREITAS, L. C. G. **Projeto de um sistema fotovoltaico de 2,16 kWp conectado à rede elétrica.** XI CEEL - XI Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, Uberlândia, 2013.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410:** Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004.
- [11] IEEE. **IEEE Std 1547:** IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, p. 1-16, 2003
- [12] IEEE. **IEEE Std 929:** Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems. 2000.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16149:** Sistemas Fotovoltaicos (FV) – Características da Interface de Conexão com a Rede Elétrica de Distribuição. Rio de Janeiro, 2013.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16150:** Sistemas Fotovoltaicos (FV) – Características da Interface de Conexão com a Rede Elétrica de Distribuição – Procedimento de Ensaio de Conformidade. Rio de Janeiro, 2013.
- [15] MELO, F. C.; SPADUTO, R.; FREITAS, L.C.G.; TAVARES, C. E.; MACEDO JR., J. R.; REZENDE, P. H. **Harmonic Distortion Analysis in a Low Voltage Grid-Connected Photovoltaic System.** Revista IEEE América Latina, v. 13, p. 136-142, 2015.
- [16] TSUKAMOTO, D. B. **Estudo de impacto da implantação de uma Usina Fotovoltaica na Curva de Carga da UFU e seus Desdobramentos no Contexto da Eficiência Energética**, 2015. Trabalho de Conclusão de Curso em Desenvolvimento, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2015.