

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE DIFERENTES SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM OPERAÇÃO NA CIDADE DE ITUMBIARA, GOIÁS

Nayara S. Paula, Caio C.S. Camargo, Evaristo N. Amorim, Hérica C.C. Cardoso, Olívio C.N., Souto, Sergio B. Silva

NUPSOL – Núcleo de Pesquisa em Energias Renováveis, Instituto Federal de Goiás/IFG, Engenharia Elétrica, Itumbiara-GO
nayasantana50@yahoo.com.br; caiosantoscamargo@hotmail.com, evaristo_iub@hotmail.com,
hericacarolinne@hotmail.com, olivio.souto@ifg.edu.br, sergio.silva@ifg.edu.br

Resumo - Desde a publicação da resolução normativa 482/2012 da ANEEL, o número de sistemas fotovoltaicos vem crescendo a cada ano no país. Assim, este artigo, tem como objetivo, apresentar os resultados iniciais da pesquisa em desenvolvimento na cidade de Itumbiara-GO, com vistas a determinar o desempenho de diferentes sistemas atualmente em funcionamento. Parâmetros como produtividade específica (Y_F) e rendimento global (PR) são utilizados de forma a avaliar os diferentes sistemas.

Palavras-Chave – Desempenho, Energia Solar, Sistemas Fotovoltaicos.

PERFORMANCE ANALYSIS GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM IN ITUMBIARA, GOIÁS-BRAZIL

Abstract - The insertion of grid-connected PV in Brazil, had the legal framework, the normative resolution 482/2012 of ANEEL. Since its publication, the number of systems is growing every year in the country. Thus, this article aims to present the initial results of research in development in the city of Itumbiara-GO, in order to determine the performance of different systems in operation and installed in local units. Parameters as final yield (Y_F) and performance ratio (PR) are used to measure two different systems.

Keywords - Performance, Solar Energy, Photovoltaic Systems.

I. INTRODUÇÃO

Com o aumento da conscientização ambiental por parte da população, a busca por meios alternativos de produção de energia tem sido bastante investigados nos últimos anos. Entre todas as fontes renováveis de energia, a geração solar fotovoltaica (FV) é a que mais tem se destacado, com enfoque na geração distribuída (GD). A GD é aquela na qual a produção de energia e o consumidor estão no mesmo local

ou bem próximos. Com o aumento do interesse em sistemas de energia renováveis, os governos têm incluído esse tema em programas de energia e em suas políticas energéticas principalmente em países desenvolvidos[1].

A energia solar se destaca por ser uma fonte limpa, silenciosa, de fácil instalação, além de sua característica modular. Outro benefício da procura de produção de energia solar FV foi a queda nos preços desses sistemas, apesar de, no caso brasileiro, os valores ainda impedirem que essa tecnologia se popularize com maior facilidade.

A proximidade entre produção e consumo traz alguns benefícios, como redução de gastos para os consumidores, economia dos investimentos em transmissão, redução de perdas nas redes e melhoria da qualidade do serviço de energia elétrica. A expansão da GD, implica na melhoria da relação entre consumidores e concessionária, na economia do país, estendendo-se a todo sistema elétrico brasileiro [2].

De acordo com o relatório elaborado por [3], o mercado global de energia solar FV em 2015 cresceu 25% em relação a 2014, alcançando uma capacidade total de 227 GW. A capacidade acumulada em 2015 foi de quase 10 vezes a capacidade de energia solar fotovoltaica acumulada do mundo de uma década antes. China, Japão e Estados Unidos são os países que possuem maior capacidade instalada de SFCR, no entanto mercados emergentes em todos os continentes contribuem significativamente para o crescimento mundial, impulsionado em grande parte pelo aumento do custo-benefício da energia solar FV. A capacidade instalada mundial de energia solar FV tem crescido exponencialmente nos últimos anos, conforme pode ser observado na Figura 1.

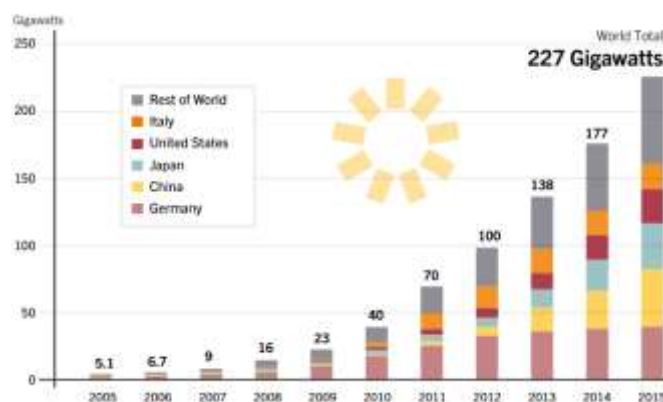


Fig. 1. Capacidade Global Solar FV por região 2005-2015.

No Brasil, apesar das altas incidências de radiação solar diária, a aplicação de tecnologia solar FV ainda é recente e insignificante na participação da matriz elétrica [4]. O



XIII CEEL - ISSN 2178-8308
12 a 16 de Outubro de 2015
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

interesse pela geração solar FV na GD teve como marco regulatório os anos de 2011 e 2013, a partir do qual a ANEEL aprovou a resolução normativa 482 [5], permitindo aos consumidores finais a utilização da micro e minigeração distribuída. Até outubro de 2015 foram registrados pouco mais de 1000 microsistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR). Este número alcançou o valor de 2983 unidades instaladas até maio de 2016 [4], representando um aumento de cerca de 280% em pouco mais de 6 meses. A evolução do número de SFCR instalados no Brasil é apresentada na Figura 2.

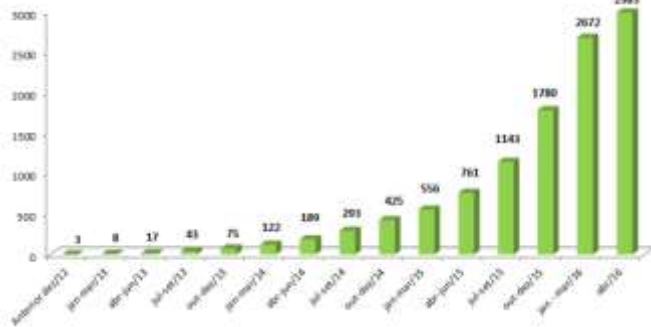


Fig. 2. Capacidade Instalada de Sistemas FV no Brasil.

O número de sistemas fotovoltaicos instalados no estado de Goiás ainda é insignificante, quando se compara com os demais estados brasileiros. Isto se deve a diversos fatores: falta de conhecimento por parte dos consumidores de energia, número reduzido de empresas e de mão de obra qualificada para atender a expansão destes sistemas e inexistência de incentivos financeiros. Estes fatores impedem a rápida expansão, embora, mesmo diante destas dificuldades, a partir da publicação da Resolução 482 o número de consumidores gerando sua própria energia cresceu de forma exponencial. A Figura 3 apresenta a capacidade total e o número de SFCR instalados no estado de Goiás registrados pela ANEEL até o final de junho deste ano.

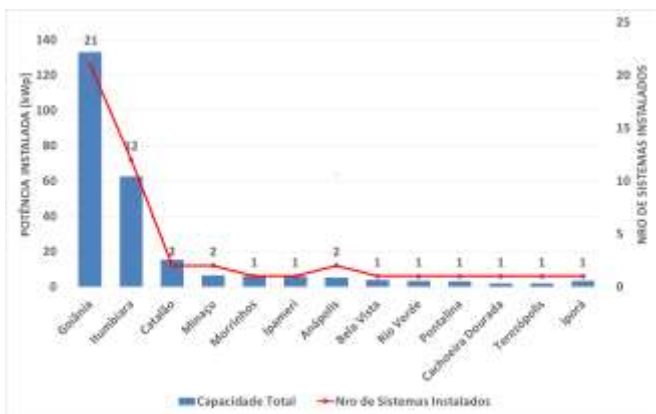


Fig. 3. Capacidade Instalada de SFCR no Brasil.

É importante destacar que por mais que os SFCR venham superando a barreira econômica, estes sistemas ainda necessitam de estudos técnicos que demonstrem o real desempenho dessa aplicação nas diversas condições de operação [6]. Embora em alguns países, devido ao grande número de sistemas instalados em pleno funcionamento, as avaliações técnicas estejam avançadas. O Brasil encontra-se

no início deste processo e, devido as particularidades próprias há uma necessidade de maiores investigações científicas.

Diante deste contexto, inúmeros questionamentos surgem no meio científico, tais como: quais as melhores estratégias para garantir a melhor eficiência do sistema fotovoltaico como um todo? Quais as vantagens econômicas para consumidor e concessionária? Quais os impactos no sistema de distribuição da expansão de sistemas fotovoltaicos instalados nos telhados das residências?

Desta forma, este artigo procura contribuir com a comunidade científica ao realizar uma análise comparativa entre dois sistemas fotovoltaicos instalados em unidades residenciais na cidade de Itumbiara-GO. Para realizar a comparação entre os SFCR os índices de méritos são calculados e avaliados para cada sistema com vistas a identificar as características de cada um. Os dados reais foram armazenados no período entre novembro de 2015 a maio de 2016.

II. METODOLOGIA

Neste trabalho, dois SFCR que se encontram em funcionamento desde novembro de 2015 na cidade de Itumbiara-GO foram selecionados para a análise de desempenho operacional dos mesmos. Os dois sistemas, possuem características distintas, sendo inversores e placas de diferentes fabricantes. Outros sistemas FV em pleno funcionamento estão sendo monitorados e posteriormente serão realizados estudos de desempenho, de modo semelhante ao apresentado neste trabalho de pesquisa.

A. Características dos Sistemas

Os dados técnicos de cada sistema fotovoltaico são apresentados nas Tabelas I e II. A Tabela I mostra as informações referentes às placas solares e a Tabela II os dados dos inversores conectados à rede (*grid-tie*).

Tabela I – Dados dos módulos FV.

Características do Módulo	Risen energy	Sun Earth
Potência Máxima (Pmax)	250 Wp	250 Wp
Tensão de Máxima Potência (Vmax)	30,00 V	29,4 V
Corrente de Máxima Potência (Imax)	8,34 A	8,34 A
Tensão de Circuito Aberto (Voc)	37,4 V	36,9 V
Corrente de Curto Circuito (Isc)	8,88 A	8,68 A
Eficiência do módulo	15,3 %	14,8 %

Conforme se observa na tabela acima as placas apresentam diferentes valores de eficiência na produção de energia.

Tabela II – Características Técnicas dos Inversores.

Descrição	B&B power	SMA
Potência Máxima em CC	5.200 W	3.200 W
Máxima Tensão em CC	550 V	750 V
Tensão Partida em CC	100/120 V	125/150 V
Corrente Máxima em CC	15 A	15 A
Potência Nominal em CA	5.000 W	3.000 W
Tensão Nominal em CA	220/240 V	220/240 V
Corrente Máxima em CA.	24 A	13.1 A
Máxima Eficiência	98,1 %	97 %
Distorção Harmônica (THD)	< 3%	-
Número de MPPT	2	1

Quanto aos inversores, aquele de maior potência apresenta um rendimento superior no processo de transformação de corrente contínua para corrente alternada. A seguir apresenta-se uma descrição mais detalhada das instalações.

1) Sistema A

O sistema A é composto por um gerador fotovoltaico formado por um arranjo de 22 módulos de 250Wp, totalizando 5,5 kWp de potência instalada. Os módulos são fornecidos pelo fabricante *Risen Energy*, o qual possui 60 células de silício policristalino.

O inversor utilizado é da *B&B Power*, modelo SF5000TL. As condições físicas e estruturais do telhado onde se encontra este arranjo resultou em uma inclinação de 20°, com orientação para o norte geográfico, portanto na direção de máxima irradiação solar.

A Figura 4 mostra os painéis fotovoltaicos instalados no telhado da residência escolhida para realização dos estudos.



Fig. 4. Capacidade Instalada de Sistemas FV no Brasil.

2) Sistema B

O sistema B é composto por um gerador fotovoltaico formado por um arranjo de 14 módulos de 245 Wp, do fabricante *Sun Earth*, o qual possui 60 células de silício policristalino (modelo TPB156x156-60-P245W).

O inversor utilizado é de 3 kW fabricado pela SMA, cujo modelo é o *Sunny Boy 3000TL Single Tracker*. A potência instalada de placas fotovoltaicas é de 3,43 kWp. Em função da inclinação e orientação do telhado disponível para instalação do arranjo fotovoltaico, a inclinação resultante foi de 19°, com um desvio azimutal de 73° a leste. A Figura 5 mostra o sistema instalado.



Fig. 5. Capacidade Instalada de Sistemas FV no Brasil.

B. Características da Localização

Para determinar os níveis de irradiação solar para os locais onde os dois sistemas encontram-se instalados utiliza-se informações disponíveis em estações meteorológicas. Para o caso em questão tem-se a cidade de Itumbiara-GO, localizada na região Centro-Oeste com latitude igual a 18° 25' Sul e longitude igual a 49° 13' Oeste. A altitude em relação ao nível do mar é de 448m.

A média mensal diária para o plano horizontal conforme a coordenada supracitada é da ordem de 5,07 kWh/m²/dia. Para o período de estudo, a Figura 6 apresenta a variação da radiação solar, tanto para o plano horizontal, quanto para o plano do arranjo dos módulos FV para os sistemas A e B.

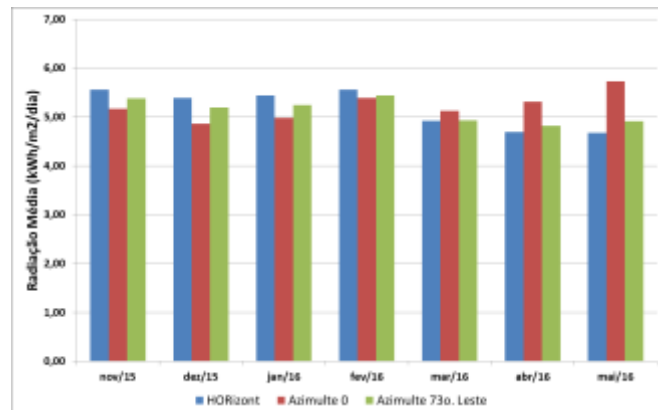


Fig. 6. Médias das Radiações Diárias.

C. Índices de Méritos

Os índices de mérito são indicadores universais que permitem realizar comparações entre sistemas fotovoltaicos. Eles podem estar relacionados à produção de energia, à eficiência do sistema, à produtividade, ao desempenho ou às perdas do sistema.

Para o cálculo dos índices de mérito inicialmente faz-se necessário determinar a irradiação média diária no plano fotovoltaico, a qual é dada pela Equação 1.

$$H(\gamma, \beta) = \frac{1}{\Gamma} \int G(t) dt \quad (1)$$

Onde:

- γ - Ângulo do desvio azimutal.
- β - Ângulo de inclinação do arranjo.
- G - Irradiância no plano do arranjo.
- Γ - Período de operação do sistema.

O fator de capacidade (FC) é definido pela razão entre a produção de energia elétrica real e a produção de energia teórica se o sistema operasse 24h por dia em sua potência nominal nas condições padrão (STD - 1000W/m² e 25°C). A Equação 2 apresenta a sua formulação.

$$FC = \frac{E_{CA}}{E_{STD}} = \frac{\int_0^{\Gamma} P_{CA}(t) dt}{\int_0^{\Gamma} P_{STD}(t) dt} \quad (2)$$

Onde:

- E_{CA} - Energia entregue a rede
- E_{STD} - Energia que seria entregue se o sistema operasse 24h em condições padrão (STD)
- P_{CA} - Potência entregue à rede elétrica.
- P_{STD} - Potência do sistema se o mesmo operasse 24h em condições padrão (STD)

A produtividade do sistema (Y_F) é a relação entre a energia elétrica produzida pela capacidade instalada do sistema, conforme apresentado pela Equação 3.

$$Y_F = \frac{1}{P_{STD}} \left[\frac{1}{\Gamma} \int_0^{\Gamma} P_{CA}(t) dt \right] \quad (3)$$

A produtividade de referência (Y_R) é determinada pela relação entre a irradiância no plano inclinado dividido pela irradiância padrão, conforme apresentada pela Equação 4.

$$Y_R = \frac{H(\gamma, \beta)}{G_{STD}} \quad (4)$$

Sendo:

$H(\gamma, \beta)$ - Irradiância no plano do arranjo.
 G_{STD} - Irradiância padrão de 1000 W/m².

Em fim, é importante determinar o rendimento global ou a razão de performance (PR), que é a relação entre a produtividade do sistema e a produtividade de referência, apresentada pela Equação 5. Este índice é utilizado para avaliações e comparações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de diferentes latitudes [7].

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \quad (5)$$

Os índices de mérito (FC , Y_F e PR) são empregados para caracterizar o desempenho de um SFCR, no que diz respeito ao aproveitamento da radiação solar, a produção de energia e os efeitos das perdas do sistema [8]. Estudos mostram que o monitoramento de tais índices pode auxiliar na identificação de problemas operacionais dos SFCR [9-10]. Uma variação significativa do índice PR em intervalos curtos de tempo (como dias) pode estar relacionada a uma falha de algum componente do sistema. Já a variação gradual do PR pode estar relacionado ao surgimento de sombreamentos, neve ou sujeira e/ou degradação do sistema FV. Os valores de PR tendem a ser maiores no inverno do que no verão devido a influência da temperatura.

D. Ferramenta Computacional Auxiliar

Utilizando a configuração e as características físicas dos microgeradores, os mesmos foram modelados no programa computacional PVsyst® versão 6.38, utilizando informações solarimétricas do CRESESB [11].

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os principais resultados obtidos para análise de desempenho dos sistemas avaliados.

A. Energia Produzida

A energia produzida por ambos os sistemas durante os meses de Novembro/2015 a Maio/2016 é apresentada na Figura 7. Estes dados foram utilizados para calcular os índices de méritos para a comparação dos SFCRs.

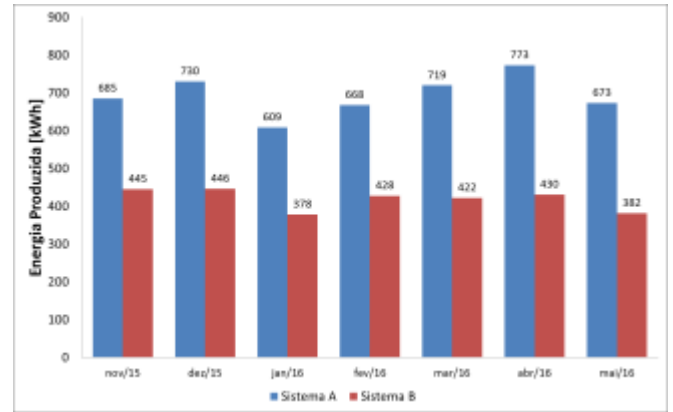


Fig. 7. Energia Produzida Mensalmente

Durante o período avaliado, os sistemas A e B produziram 4.856 kWh e 2.931 kWh respectivamente, tendo uma média mensal de produção de energia equivalente a 694 kWh para o sistema A e de 419 kWh para o sistema B. O mês de abril resultou na maior média mensal para o sistema A, mesmo não sendo este o melhor mês para a média diária mensal, conforme pode se observar na Figura 6. Para o sistema B, a maior média foi encontrada no mês de novembro/dezembro.

B. Fator de Capacidade (FC)

A Figura 8 apresenta o fator de capacidade médio mensal para os dois sistemas avaliados. O maior índice ocorreu para o sistema A no mês de abril, o qual foi o mês com maior produtividade do sistema A. A média do fator de capacidade para os sistemas A e B foi de 17,3% e 16,7%, respectivamente.

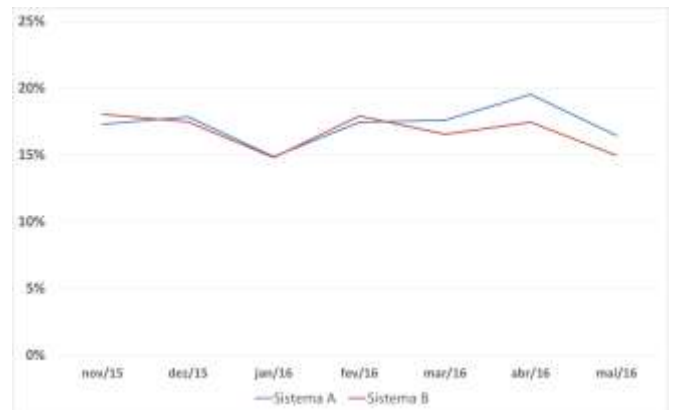


Fig. 8. Média mensal do fator de capacidade (FC).

C. Produtividade do Sistema (Y_F)

A Y_F relaciona a geração de energia com a capacidade total dos SFCRs. A vantagem Y_F está relacionada à utilização da potência nominal do gerador FV, sendo possível comparar o desempenho entre sistemas com diferentes eficiências de conversão ou de geradores FVs com diferentes formas de montagem [12].

A Figura 9 apresenta os valores da produtividade específica mensal. A média mensal da produtividade específica para os sistemas A e B no período analisado foram de 126,1 kWh/kWp e 122,0 kWh/kWp, respectivamente.

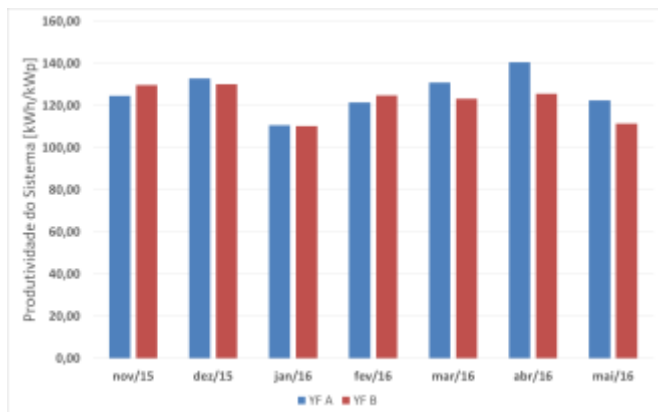


Fig. 9. Produtividade mensal para os sistemas A e B.

A produtividade específica para os meses de novembro de 2015 a fevereiro de 2016 para os dois sistemas teve pouca variação. Porém, para os meses de março a maio de 2016 a diferença chegou a 12,8% a mais para sistema A em relação ao sistema B. Durante o período de análise, verificou-se ainda que as produtividades específicas totais para os dois sistemas assumiram valores da ordem de 883 kWh/kWp e 854,5 kWh/kWp, respectivamente, para os sistemas A e B.

D. Rendimento Global ou Razão de Performance (PR)

De forma simplificada, o PR relaciona a produtividade do sistema com a energia disponibilizada pelo sol em horas de sol pleno (HSP). O PR de um SFCR indica quão próximo do desempenho ideal está um sistema operando em condições reais. Este índice de mérito permite a comparação de sistemas independente da sua localização, ângulo de inclinação, orientação e da sua capacidade de potência nominal. Os percentuais mensais para o rendimento global dos sistemas A e B são mostrados na Figura 10. De acordo com a figura observa-se que o mês de Abril/2016 apresentou o melhor desempenho para os dois sistemas, com percentuais de 88,2 %, para o sistema A, e 86,8 %, para o sistema B.

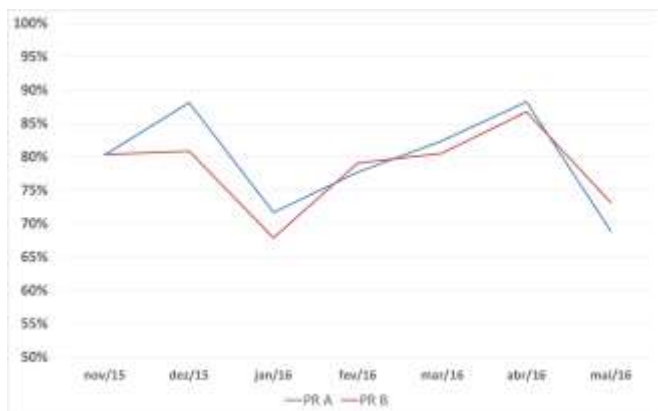


Fig. 10. Média mensal do rendimento global (PR).

Por outro lado, os meses de janeiro e maio de 2016 foram os meses que apresentaram os menores percentuais de PR, com valores de 71,7 % e 68,9 % para o sistema A e de 67,9 % e 73,1 % para o sistema B. Considerando os 7 meses de observação, o sistema A obteve um desempenho global de 79,6 % e o sistema B obteve um percentual de 78,3 %.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise comparativa entre os índices de mérito para dois sistemas fotovoltaicos instalados em telhados de residências da cidade de Itumbiara-GO. Os resultados mostram que o sistema A apresentou um desempenho relativamente melhor que o sistema B. A título de exemplificação, a diferença mensal da produtividade específica foi da ordem de 3% superior para o sistema A. O rendimento global deste mesmo sistema também se mostrou superior ao do sistema B, com uma diferença de 1,5%. Estudos adicionais têm sido realizados com vistas a uma avaliação mais profunda sobre o desempenho operacional de cada sistema, bem como dos demais que serão abordados em trabalhos futuros. É importante ressaltar que a escolha de fabricantes de inversores e das placas solares é de extrema importância para que se tenha um SFCR mais eficiente e, com isso, um retorno financeiro em tempo menor.

REFERÊNCIAS

- [1] T. Erge, V.V. Hoffmann, K. Kiefer, "The German Experience with grid-connected PV Systems", *Solar Energy*, 70, 479-487, 2001.
- [2] ANEEL "Novas regras para geração distribuída entram em vigor". Acedido em: 07 de Março de 2016 em <http://www.aneel.gov.br>.
- [3] REN21 - Renewable Energy Policy Network for The 21st Century. REN21. Renewables 2016 Global Status Report. 2016.
- [4] ANEEL. BIG - Banco de Informações de Geração - Capacidade de Geração do Brasil. Acedido em 01 de Outubro de 2015 em: <http://www.aneel.gov.br>.
- [5] ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA N_ 482. Brasil: Agência Nacional de Energia Elétrica; 2012. Acedido em 01 de Outubro de 2014 em: <http://www.aneel.gov.br>.
- [6] B.T. Mailson, J.S.R Marinaldo, L.C Renato, T.P. João, N.M. Wilson, G.M.O. Luis. "Análise do desempenho de dois sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica instalados na região Norte do Brasil". VI Congresso Brasileiro de Energia Solar – Belo Horizonte, 04 a 07 de abril de 2016.
- [7] G.A.Rampinelli. "Estudo De Características Elétricas E Térmicas De Inversores Para Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede". 2010. 285 f. Tese – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- [8] R.S. Benedito. "Caracterização Da Geração Distribuída De Eletricidade Por Meio De Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede, No Brasil, Sob Os Aspectos Técnicos, Econômico E Regulatório". 2009. 110 f. Dissertação - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- [9] R.H. Fusano. "Análise Dos Índices De Mérito Do Sistema Fotovoltaico Conectado À Rede Do Escritório Verde Da UTFPR". 2013. 94 f. TCC - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- [10] IEA-PVPS. Analytical Monitoring of Grid-connected Photovoltaic Systems. St. Ursen: Report Iea-pvps T13-03:2014, 2014. 90 p.

[11] Centro de Referência para a Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito: CRESESB. Acedido em 22 abril de 2016 em: www.cresesb.cepel.br.

[12] Zilles, R.; Macêdo, W. N.; Marcos A. B. Galhardo; Oliveira, S. H. F., 2012. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. São Paulo: Oficina de Textos.

DADOS BIOGRÁFICOS

Caio César dos Santos Camargo, nascido em 21/12/1994 em Araguari-MG, é aluno do curso de engenharia elétrica do Instituto Federal de Goiás - Campus Itumbiara.

Evaristo Nunes de Amorim, nascido em 21/04/1991 em Itumbiara-Go, é aluno do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Goiás - Campus Itumbiara.

Hérica Carolinne Campos Cardoso, nascida em 03/10/1994 em Itumbiara-Go, é aluna do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Goiás - Campus Itumbiara.

Nayara Santana de Paula, nascida em 20/05/1995 em Itumbiara-GO, é aluna do curso de engenharia elétrica do Instituto Federal de Goiás - Campus Itumbiara.

Olívio Carlos Souto do Nascimento, nascido em 05/06/1963 em Uberlândia-MG, Brasil. Graduou-se como Engenheiro Eletricista e obteve o título de Mestre e Doutor pela Universidade Federal de Uberlândia em 1998 e 2003, respectivamente. Atualmente, é professor no curso de engenharia elétrica do Instituto Federal de Goiás, em Itumbiara, GO. Sua área de pesquisa está relacionada a qualidade da energia elétrica, eficiência energética, fontes renováveis de energia, geração distribuída e impacto no sistema elétrico.

Sergio Batista Silva, nascido em 28/02/1975 em Tupaciguara-MG, Brasil. Graduou-se como Engenheiro Eletricista e obteve o título de Mestre pela Universidade Federal de Uberlândia em 1998 e 2003, respectivamente. Doutor pela Universidade de Brasília em 2010. Atualmente, é professor na engenharia elétrica do Instituto Federal de Goiás, em Itumbiara. Atuando principalmente na área de energia solar fotovoltaica.