

Estudo de Geração de Energia Elétrica de uma Micro-Usina Fotovoltaica na Configuração Grid-Tie: Sistemas Fixo e Tracker.

Alessandro Bogila, Joel R. Pinto, Ivan Luiz Moreira, Thales P. Franchi, Thiago P. Franchi.

Faculdade de Engenharia de Sorocaba, FACENS

alessandro.bogila@facens.br, joel.rocha@facens.br, ivan.moreira@facens.br, thales.prini@facens.br, thiago.prini@facens.br

Resumo — Este artigo propõe analisar a geração de energia elétrica de uma micro-usina fotovoltaica instalada na FACENS. Este projeto contempla dois sistemas de geração de energia elétrica, sendo um sistema *grid-tie* e outro *off-grid*. A potência total instalada é de 63,94 kWp, sendo 61,74 kWp oriundo do sistema *grid-tie*, cuja finalidade é gerar economia de energia elétrica e também para estudos dos princípios de geração fotovoltaica. No entanto, o sistema *off-grid* possui 2,19 kWp de potência instalada e é totalmente voltado para a área acadêmica, com foco em desenvolvimento de pesquisas. O objetivo principal deste trabalho é realizar a análise técnica do sistema *grid-tie*, que está em funcionamento desde abril de 2016. Este sistema representa uma economia de energia de 13,69%.

Palavras-chaves — Energia fotovoltaica, inversores de frequência fotovoltaicos, módulos solares fotovoltaicos, sistema *grid-tie*, sistema *off-grid*.

I. INTRODUÇÃO

A energia proveniente do Sol é uma energia limpa, renovável e gratuita para qualquer finalidade de sua utilização, seja ela utilizada para efeitos térmicos ou para geração de energia elétrica. No entanto, para uso de geração de energia elétrica é necessário ter equipamentos que convertam a energia solar em elétrica, sendo os módulos e inversores de frequência fotovoltaicos os equipamentos mais importantes para realizar essa conversão. Dependendo da finalidade de uso da energia elétrica gerada podem agregar a esses equipamentos os controladores de carga e baterias estacionárias [1].

Os módulos fotovoltaicos são os elementos constituídos por um arranjo de células solares e tem a finalidade de converter a energia proveniente do Sol em energia elétrica. No entanto, a energia gerada é em tensão contínua, e a maioria dos casos ocorre a necessidade de realizar a conversão para alternada [1]. A Fig. 1 mostra um módulo fotovoltaico [2].



Fig. 1. Módulo fotovoltaico.

As células solares são compostas basicamente por silício, que é um material que não conduz eletricidade, para se tornar condutivo é necessário realizar um processo de dopagem. A dopagem é realizada com a inserção de fósforo em uma das partes, resultando em uma região com elétrons livres na sua estrutura (material tipo N), na outra parte é inserido o boro gerando ausência de elétrons (lacunas) em sua estrutura (material tipo P). Esses dois materiais, após a dopagem, são colocados em contato e na região da junção surge uma barreira de potencial, que necessita de uma alta energia para ser vencida [3].

A energia proveniente do Sol ao incidir na célula fotovoltaica vence a barreira de potencial e gera uma diferença de potencial elétrica na ordem de 0,6 V entre seus terminais, que ao se conectar uma carga faz com que os elétrons entrem em movimento produzindo uma corrente elétrica, esse princípio é conhecido como efeito fotovoltaico [4], conforme mostra a Fig. 2 [5].

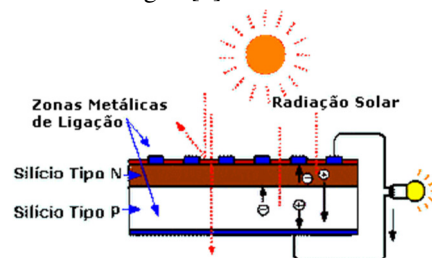


Fig. 2. Efeito Fotovoltaico.

No sistema *grid-tie*, após a geração da energia é necessário transformar da forma contínua em alternada e os inversores fotovoltaicos são os elementos responsáveis por realizar a conversão da energia elétrica contínua das baterias ou dos painéis fotovoltaicos em alternada [1]. Atualmente estão disponíveis no mercado os inversores de onda quadrada, onda senoidal modificada, onda senoidal pura e inversores de conexão com a rede elétrica (*grid-tie*).

O controlador de carga é o equipamento responsável pelo controle do nível de carga e descarga das baterias no sistema *off-grid*, evitando a sobrecarga ou descarga excessiva, protegendo dessa forma a vida útil da bateria [1]. Esta bateria pode ser estacionária ou de ciclo profundo, a qual corresponde ao acumulador de energia gerada pelo sistema fotovoltaico [5].

II. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Dependendo da forma de uso da energia fotovoltaica o projeto pode ser direcionado a dois tipos de sistemas, que são denominados de *grid-tie* (sistema conectado à rede elétrica da concessionária) e o *off-grid* (sistema desconectado da rede elétrica) [6].

A. Sistema grid-tie

O sistema *grid-tie* é utilizado para gerar economia na conta de energia elétrica, pois de dia o sistema gera energia elétrica e distribui para toda a instalação e o excedente é injetado na rede elétrica da concessionária de energia. De acordo com a política atual da ANEEL esse processo gera créditos na conta final do usuário no qual o mesmo terá um período de cinco anos para sua utilização [7].

Os equipamentos utilizados para este processo são os módulos fotovoltaicos e os inversores de frequência fotovoltaicos (os dispositivos de proteção e automação não fazem parte do escopo deste trabalho). Após feita a instalação do sistema é necessário solicitar junto a concessionária de energia local a troca do medidor de energia comum para um bi-direcional, sendo este medidor responsável pelo armazenamento da medição do consumo e da geração de energia elétrica [5]. A Fig. 3 representa um diagrama de blocos do processo de geração de energia elétrica até a entrega do excedente à rede de distribuição.

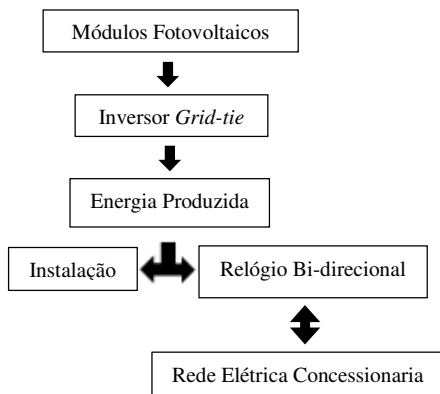


Fig. 3. Sistema grid-tie.

Esse conceito de geração de energia elétrica através do Sol é o mais usual encontrada em residências, condomínios e indústrias [6].

B. Sistema off-grid

O sistema *off-grid* é o mais utilizado em regiões onde não possui rede de distribuição de energia elétrica, como em casas de campo, de praia, sistemas de iluminação, sistemas de comunicações, entre outras [6]. O seu princípio de funcionamento é gerar energia elétrica durante o dia e armazená-la em um banco de baterias para, posteriormente, ou instantaneamente utilizá-la.

Os principais equipamentos para esse tipo de sistema são os módulos fotovoltaicos, controladores de carga e os inversores de frequência *off-grid* (este último pode ser dispensado se todas as cargas forem de tensão contínua) [5]. A Fig. 4 representa o diagrama de blocos de um sistema *off-grid*.

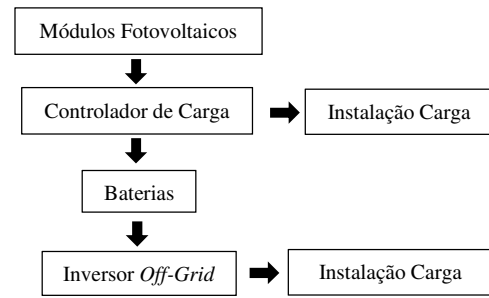


Fig. 4. Sistema *off-grid*.

C. Sistema Tracker

O sistema *tracker* é um sistema de rastreamento do Sol, onde o princípio deste mecanismo é melhorar a eficiência da geração de energia elétrica posicionando os módulos fotovoltaicos para receberem maior insolação. Para isso ocorrer é necessário a instalação de equipamentos na sua estrutura que permitem o movimento dos módulos, como motores, sensores de posicionamento e sistemas de controle [8].

Esse sistema tende a ser de 15 à 35% mais eficiente que os sistemas com módulos fixos [9].

III. ESTUDO DE CASO

O projeto fotovoltaico *grid-tie* instalado no campus da FACENS foi dividido em dois subsistemas, denominados de fixo e *tracker*, o sistema fixo corresponde a 51,45 kWp de potência instalada e o *tracker* 10,29 kWp. O projeto como um todo corresponde a 61,74 kWp e é previsto a geração de 90 MWh de energia elétrica por ano, este valor representa aproximadamente 15% do consumo de energia elétrica da instituição. A Fig. 5 representa a disposição dos sistemas fotovoltaicos instalados. A previsão da geração de energia elétrica mensal estimada com o software PVSyst, com referência ao índice solar métrico e nas coordenadas geográficas da instituição está representada pela Fig. 6.

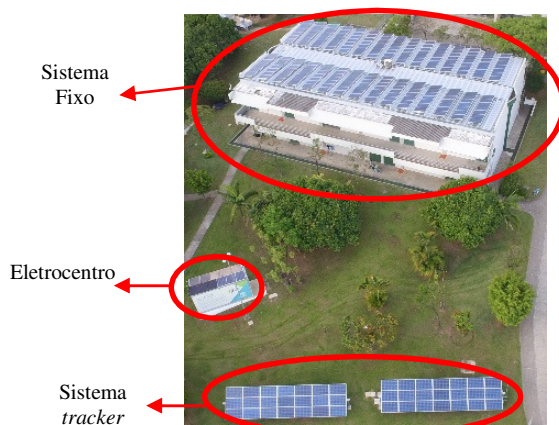


Fig. 5. Sistemas instalados.

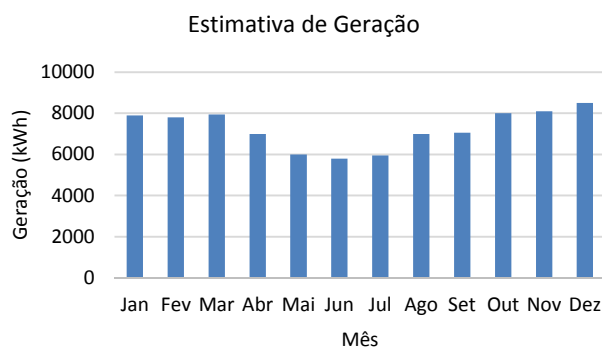


Fig. 6. Curva de geração de energia elétrica mensal do sistema *grid-tie*.

Todo o projeto fotovoltaico realizado foi composto por módulos policristalino do fabricante Yingli e os inversores da Fronius. Os dados desses componentes podem ser visualizados nas respectivas Tabelas I [10] e II [11].

TABELA I. DADOS DO MÓDULO POLICRISTALINO.

P (W)	245
Voc (V)	37,8
Vmp (V)	30,2
Isc (A)	8,53
Imp (A)	8,11
n (%)	15

TABELA II. DADOS DOS INVERSORES FRONIUS.

	Inv 1	Inv 2	Inv 3	Tracker
P (kW)	17,5	20	15	12,5
Vmppt-min (V)	370	420	320	320
Vmppt-max (V)	800			
Vmin (V)	200			
Vmax (V)	1000			
Imax (A)	33/27			27/16,5
Icurto (A)	49,5/40,5			40,5/24,8

Os inversores fotovoltaicos de maior potência possuem duas entradas de rastreamento de máxima potência (MPPT), sendo que nas conexões do conjunto dos módulos fotovoltaicos aos inversores, não podem ultrapassar os seus requisitos técnicos e elétricos estabelecidos na Tabela II. Isso permite que o inversor não sofra danos elétricos ao entrarem em funcionamento [5].

A. Sistema Fixo

O sistema fixo é compreendido por 210 módulos policristalino de 245 W cada e 3 inversores fotovoltaicos, com as respectivas potências nominais 17,5 kW, 20 kW e 15 kW, como mostra nas Tabelas I e II, respectivamente.

No inversor de 17,5 kW (Inv 1) estão conectados 63 módulos fotovoltaicos, sendo que na primeira entrada é conectado um conjunto de 21 módulos ligados em série e na segunda possui dois conjuntos em paralelo de 21 painéis conectados em série. O inversor de 20 kW (Inv 2) possui 84 módulos instalados, sendo que em cada entrada possui dois conjuntos de 21 módulos conectados em paralelo. Por fim, o inversor de 15 kW (Inv 3) possui 63 módulos instalados, sendo que na primeira entrada há dois conjuntos de 16 módulos conectados em série e na segunda entrada dois conjuntos de 15 e 16 módulos. A descrição detalhada das conexões dos módulos fotovoltaicos por cada entrada de

todos os inversores utilizados para esse sistema pode ser visualizada pela Tabela III.

TABELA III. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS POR INVERSOR.

	Inv 1 (17,5kW)	Inv 2 (20kW)	Inv 3 (15kW)
Entrada 1	21 módulos (série): 5,145kW	21 módulos (série) // 21 módulos (série): 10,29kW	16 módulos (série) // 16 módulos (série): 7,84kW
Entrada 2	21 módulos (série) // 21 módulos (série): 10,29kW	21 módulos (série) // 21 módulos (série): 10,29kW	16 módulos (série) // 15 módulos (série): 7,598kW
Total 1	63 módulos: 15,435 kW	84 módulos: 20,58kW	63 módulos: 15,435kW
Total	210 módulos: 51,45kW		

O levantamento da produção energética mensal de cada inversor fotovoltaico do sistema fixo é apresentado na Tabela IV, onde os dados foram tabulados de acordo com a soma da produção de energia elétrica dos módulos conectados nas entradas de rastreamento de máxima potência de cada inversor.

TABELA IV. PRODUÇÃO MENSAL DE ENERGIA ELÉTRICA POR INVERSOR.

Mês	Inv 1 (kWh)	Inv 2 (kWh)	Inv 3 (kWh)
Abril	1.790,81	1.286,14	715,57
Maio	1.828,97	1.346,90	1.438,89
Junho	1.756,21	1.304,79	1.417,90
Julho	2.059,81	1.478,23	1.605,08
Agosto	2.202,57	1.631,95	1.725,81
Setembro	2.453,05	1.809,05	1.869,39
Outubro	2.962,38	2.208,03	2.217,65
Novembro	2.678,39	1.839,25	1.981,25
Dezembro	1.638,01	1.216,81	1.210,55
Total	19.370,20	14.121,15	14.182,04

Somando a geração de energia elétrica de cada inversor fotovoltaico nos respectivos meses obtém-se a geração mensal total do sistema fixo, como pode ser visualizada pela Fig. 7 e de forma mais detalhada pela Tabela V.

Geração Mensal - Fixo

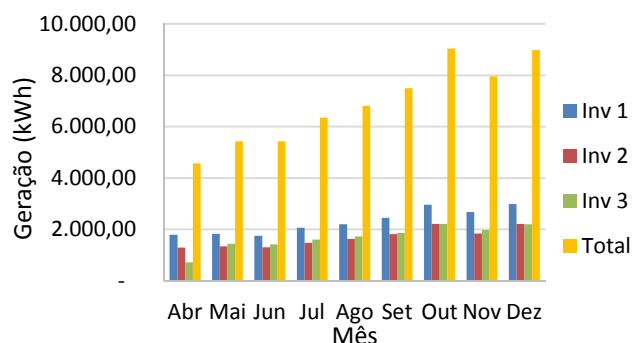


Fig. 7. Geração mensal de energia elétrica oriunda do sistema fixo.

TABELA V. PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA TOTAL DO SISTEMA FIXO.

Mês	Geração (kWh)
Abril	3.792,52
Maio	4.614,76
Junho	4.478,90
Julho	5.143,12
Agosto	5.560,33
Setembro	6.131,49
Outubro	7.388,06
Novembro	6.498,89
Dezembro	4.065,37
Total	47.673,39

A produção energética do sistema fixo é aproximadamente 82,4% do total da geração fotovoltaica do sistema *grid-tie* (sistema fixo mais *tracker*).

B. Sistema Tracker

O sistema *tracker* é composto por 42 módulos policristalino de 245 W cada e 1 inversor solar do fabricante Fronius com a potência nominal 12,5 kW, as informações técnicas podem ser observadas nas Tabelas I e II. Como esse inversor também possui duas entradas de rastreamento de máxima potência para a conexão de módulos fotovoltaicos, sendo conectados 21 módulos em série a cada entrada. A Tabela VI mostra a quantidade de módulos fotovoltaicos instalados por cada entrada do inversor.

TABELA VI. QUANTIDADE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS POR INVERSOR.

	Tracker
Entrada 1	21 módulos (série): 5,145kW
Entrada 2	21 módulos (série): 5,145kW
Total	42 módulos: 10,29kW

A produção mensal de energia elétrica do sistema *tracker* pode ser observada na Fig. 8 e mais especificamente na Tabela VII.

TABELA VII. PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DO SISTEMA TRACKER.

Mês	Tracker (kWh)
Abril	782,57
Maio	818,34
Junho	953,95
Julho	1.215,2
Agosto	1.258,91
Setembro	1.366,24
Outubro	1.652,98
Novembro	1.461,51
Dezembro	908,77
Total	10.418,47

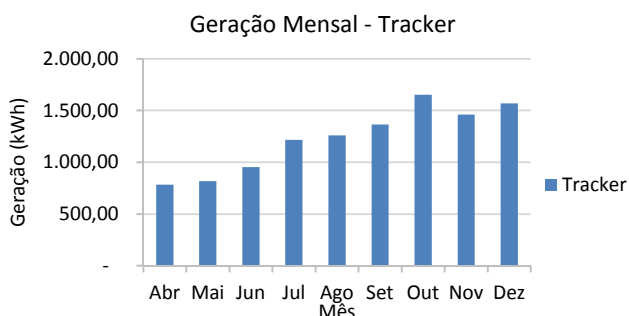


Fig. 8. Geração mensal de energia elétrica oriunda do Sistema Tracker.

Através das análises das Tabelas V e VII verifica-se que o sistema *tracker* é responsável por cerca de 17,6% do total da energia produzida pelo sistema *grid-tie*.

C. Sistema Grid-Tie (fixo+móvel)

O conjunto do sistema fixo com o sistema *tracker* completa o projeto *grid-tie* instalado no campus da FACENS, totalizando dessa forma 252 módulos fotovoltaicos instalados, que corresponde a 61,74 kWp de potência total instalada.

A Tabela VIII e a Fig. 9 mostra a energia elétrica total produzida pelo sistema *grid-tie*, tais valores são compostos da soma mensal dos valores mostrados nas Tabelas V e VII.

TABELA VIII. GERAÇÃO TOTAL DE CADA MÊS DO SISTEMA GRID-TIE.

Mês	Tracker (kWh)
Abril	4.575,09
Maio	5.433,10
Junho	5.432,85
Julho	6.358,32
Agosto	6.819,24
Setembro	7.497,73
Outubro	9.041,04
Novembro	7.960,40
Dezembro	4.974,14
Total	58.091,86

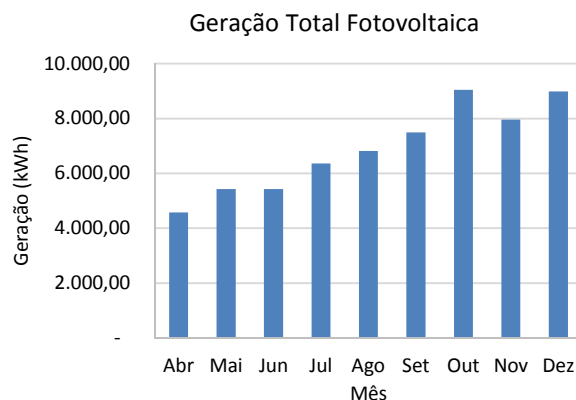


Fig. 9. Geração de energia elétrica do sistema Grid-Tie.

Além do estudo mensal, também foi realizado um estudo diário de produção de energia elétrica para cada tipo de sistema instalado e o total de energia produzida. A Fig. 9 mostra a geração de energia elétrica, a curva azul representa a energia produzida pelo sistema fixo, em vermelho pelo sistema *tracker* e em verde o total produzido pelos sistemas.

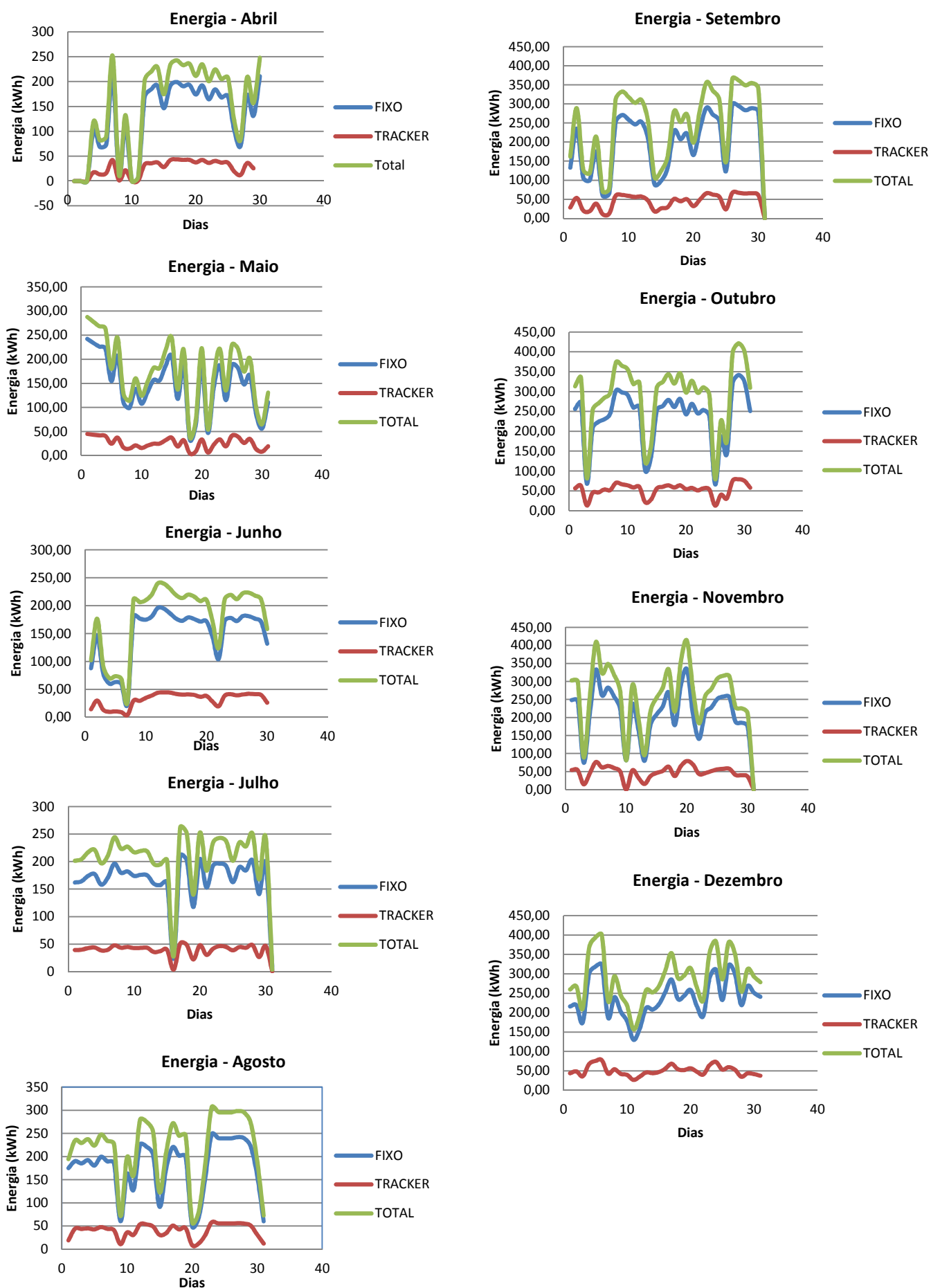


Fig. 9. Produção de energia elétrica diária do sistema *grid-tie*.

Para determinar qual sistema obteve a maior eficiência da produção de energia elétrica efetiva foi analisada a produção energética de cada sistema, dividido pelo número de módulos fotovoltaicos que possuem e multiplicado por 100. Pois dessa forma possui a relação direta de produção de energia por módulo, uma vez que os sistemas possuem diferentes dados de geração. A Tabela IX e a Fig. 10 mostram esse comparativo, ilustrando mensalmente o quanto e qual sistema foi mais eficiente.

TABELA IX. EFICIÊNCIA COMPARATIVA DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

	Fixo (%)	Tracker (%)	Tracker – Fixo (%)
Abr	49,22	50,78	1,56
Mai	53,00	47,00	- 6,00
Jun	48,43	51,57	3,14
Jul	45,84	54,16	8,32
Ago	46,90	53,10	6,20
Set	47,30	52,70	5,40
Out	47,20	52,80	5,60
Nov	47,10	52,90	5,80
Dez	47,20	52,80	5,60
Média	48,02	51,98	3,96

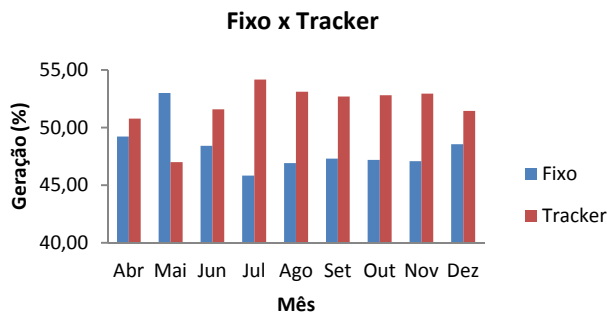


Fig. 10. Eficiência do sistema *grid-tie*.

A Tabela IX mostra que a o sistema *tracker* teve maior geração de energia elétrica em todos os meses, com exceção do mês de maio. Isso muito provavelmente ocorreu devido à necessidade da troca do sensor de inclinação que apresentou defeito. Caso seja desconsiderado o mês de maio, a média de geração do sistema *Tracker* fica pouco mais do que 5% em relação à geração do sistema *fixo*. Isso ocorre devido a esse tipo de sistema buscar a inclinação ideal dos módulos para melhorar a sua geração de energia.

A Fig. 11 mostra a comparação entre a geração fotovoltaica estimada em relação a geração real, mostrando que o comportamento é semelhante com certa discrepância nos meses de abril e outubro.

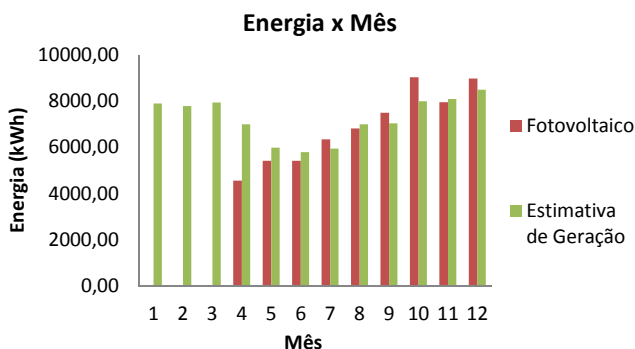


Fig. 11. Comparação entre a produção de energia estimada com a real.

IV. CONCLUSÃO

Através deste estudo realizado a partir do dia 04 de abril de 2016 e em funcionamento até o presente momento, pode-se verificar que a geração fotovoltaica atingiu a meta de geração de energia elétrica mensal, aproximando dessa forma os valores medidos com os valores estipulados pelo *software* PVSyst, apenas com uma exceção que pode ser verificada no mês de abril, pois foi nesta data que o sistema entrou em funcionamento e não foi registrado o valor total de medição, esses valores podem ser analisados na Fig. 11.

Os resultados apresentados na Tabela IX mostram que o sistema *tracker* tem geração de energia elétrica pouco mais que 5% em relação à geração do sistema *fixo*. Este valor está muito aquém dos valores preconizados pelos fabricantes, que se situam na ordem de 15 a 35%.

A média percentual da geração fotovoltaica nos 8 meses de funcionamento atingiu o valor de 13,69% do consumo da instituição. Este valor representa 62 MWh de toda a energia consumida, acredita-se que ao completar um ano de funcionamento o sistema chegará próximo do valor de 90 MWh que foi estipulado pelo *software* PVSyst, atendendo as expectativas iniciais de projeto.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Pinho, J. T., Galdino, M. A. "Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos", CEPEL-CRESESB, Rio de Janeiro, 2014
- [2] PaineisFotovoltaicos.com: <http://www.paineisfotovoltaicos.com/policristalinos.php>
- [3] Nascimento, C. A. "Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica", Monografia de Pós-Graduação, Universidade Federal de Lavras, 2004.
- [4] Pereira, F. A. S., Oliveira, M. A. S. "Laboratórios de Energia Solar Fotovoltaica", Publindústria, 2011.
- [5] Pereira, F. A. S., Oliveira, M. A. S. "Curso Técnico Instalador e Energia Solar Fotovoltaica", Publindústria, 2015.
- [6] Portal Energias, "Energia Fotovoltaica – Manual sobre Tecnologias, Projetos e Instalação", <http://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf>, 2004.
- [7] ANEEL, Micro e Minigeração Distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica. 2ª ed. Brasília, 2016.
- [8] Trevelin, F. C., "Estudo Comparativo entre Métodos de rastreamento Solar Aplicados a Sistema Fotovoltaicos", Monografia de Graduação de Engenharia Elétrica, São Carlos, 2014
- [9] Appleyard, D. "Solar Tracker: Facing the Sun", 2009. Disponível em: <http://www.renewableenergyeord.com/rea/news/article/2009/06/solar-trackers-facing-the-sun> Acesso em: jun 2014
- [10] YINGLI, Catálogo Módulo Fotovoltaico . Disponível em: http://www.yinglisolar.com/assets/uploads/products/downloads/YGE_60_Cell_Series_EN.pdf>. Acesso em: 01/02/2017.Catálogos da Yingli
- [11] FRONIUS, Catálogo Inversor . Disponível em: <http://download.aldo.com.br/pdfprodutos/Produto30439IdArquivo4168.pdf>>. Acesso em: 01/02/2017.