



**XXIV SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GPT/06

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO - 2**

**GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT**

**COMPARAÇÃO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DE PROJETOS ON&OFF GRID COM DIFERENTES  
TECNOLOGIAS INSTALADAS NO NORDESTE BRASILEIRO**

**Milthon S. Silva(\*)**  
UFS

**Carlos E. G. da Silva**  
IFS

**Roberto F. A. Menezes**  
UFS

**Wislay K. A. e Silva**  
UFS

**RESUMO**

O nordeste brasileiro, principalmente o sertão nordestino, é considerado um dos melhores lugares do mundo para a instalação de sistemas fotovoltaicos, pois possui um elevado índice de luz solar durante todo o ano e imensas áreas sem habitação. O objetivo do trabalho é avaliar um sistema *on-grid* de geração fotovoltaica, que possui três subsistemas, com módulos fotovoltaicos de células monocristalinas, policristalinas e de filme fino. O projeto também contempla um sistema *off-grid* com tecnologia filme fino. Esses sistemas estão instalados e operando em simultâneo desde junho/2016 no Instituto Federal de Sergipe na cidade de Aracaju-SE.

**PALAVRAS-CHAVE**

Energias Renováveis, Painéis Fotovoltaicos, Geração Energia Fotovoltaica.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A energia solar é uma fonte de energia inesgotável e é considerada uma alternativa energética promissora, para enfrentar os desafios da expansão da oferta de energia com menor impacto ambiental. O Brasil possui um potencial solar enorme, se comparado com outros países líderes em geração tais como Alemanha, França e Espanha. A irradiação média anual no Brasil varia entre 1.200 e 2.400 kWh/m<sup>2</sup>/ano, enquanto os intervalos para Alemanha ficam em torno de 900 e 1.235 kWh/m<sup>2</sup>/ano, entre 900 e 1.659 kWh/m<sup>2</sup>/ano na França e entre 1.200 e 1.850 kWh/m<sup>2</sup>/ano na Espanha (1).

O nordeste brasileiro possui grande relevância para a instalação de sistemas fotovoltaicos pois possui um dos melhores índices de radiação solar do mundo. Além disso, também possui grandes cidades, com imensas e diversas áreas metropolitanas com viabilidade de instalação de geração distribuída, tanto nas instalações prediais atualmente existentes, bem como nos empreendimentos futuros. A implantação de sistemas fotovoltaicos e usinas de geração de energia solar darão mais oportunidades de emprego, incentivo à formação de mão-de-obra especializada e proporcionará ao Brasil entrar em sintonia com o novo cenário mundial de mudança na matriz energética, combatendo o aquecimento global e possibilitando um planejamento energético de longo prazo.

Segundo (2), a região nordeste costuma ser dividida em três climas principais, com precipitações anuais variando entre 300 e 2000 mm: clima litorâneo úmido, clima tropical e clima tropical semiárido, em todo o sertão nordestino. O Nordeste apresenta elevados valores de médias anuais de temperatura do ar, que variam de 20 a 28 °C, em virtude da alta incidência de radiação solar, que lhe confere o maior potencial de energia solar disponível no Brasil, com uma radiação global média estimada em 5,9 kWh/m<sup>2</sup> de acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar (3).

Esse projeto de pesquisa foi selecionado na Chamada Pública CNPq-SETEC/MEC Nº 17/2014, Processo nº 467151/2014-8 e este informe técnico objetiva gerar informações para estudos, avaliações e comparações das

características, desempenho e operação, de diferentes tecnologias de células fotovoltaicas. A pesquisa consolida informações a partir dos dados medidos e coletados de sistemas fotovoltaicos com diversas tecnologias de fabricação, de forma a ser mais uma referência para definições técnicas e econômicas para sistemas fotovoltaicos, bem como para o acompanhamento e comparação com sistemas em operação na região.

Os sistemas de microgeração fotovoltaicos foram instalados no Instituto Federal de Sergipe (IFS), em Aracaju-SE, com coordenadas: 10° 54' 55" S; 37° 03' 55" O. O trabalho consiste na avaliação de um sistema trifásico “*on-grid*” de geração solar fotovoltaica de 4,79 kWp de potência nominal instalada, que possui três subsistemas monofásicos, cada um com um potência nominal de saída na ordem de 1,5 kW, tensão de 220V na frequência de 60 Hz. Os arranjos contêm 5, 6 e 20 módulos fotovoltaicos de respectivamente células monocristalinas, células policristalinas e filmes fino (CdTe). Também contempla um sistema “*off-grid*” de potência instalada 0,96 kWp com um arranjo de 8 módulos fotovoltaicos com tecnologia filme fino (CIS). A potência monofásica de saída é de 1 kW, na tensão de 127 V e frequência 60 Hz. Esses sistemas estão instalados e operando desde junho/2016 em uma instituição de ensino localizada em uma capital do nordeste brasileiro. A Figura 1 ilustra a instalação do sistemas *on-grid* e *off-grid* no IFS.



FIGURA 1 – Layout da distribuição simulado e real dos paines fotovoltaicos no IFS.

Para a análise de desempenho entre as diversas tecnologias de conversão (módulos monocristalinos, módulos policristalinos e filme fino CdTe) foram estabelecidos diversos indicadores de desempenho, para cada subsistema, que são apresentados na seção 3.

## 2.0 - SISTEMA FOTOVOLTAICO IFS

### 2.1 Sistema *on-grid*

O sistema *on-grid* foi dividido em três subsistemas e a Tabela 1 traz as características de cada um deles. Mais detalhes sobre os módulos fotovoltaicos utilizados com células policristalinas, monocristalinas e de filme fino, além das características do inversor, podem ser vistos em (5), (6), (7) e (8) , respectivamente.

TABELA 1 - Características dos subsistemas *on-grid*

	Subsist. <i>on-grid</i> 01	Subsist. <i>on-grid</i> 02	Subsist. <i>on-grid</i> 03
<b>Nº de módulos</b>	06	05	20
<b>Fabricante</b>	Axitec	SunEdison	First Solar
<b>Modelo</b>	AC260P/156-60S	Silvantis F-325BzC	FS-280
<b>Tecnologia</b>	Policristalino	Monocristalino	CdS/CdTe (Filme Fino)
<b>Potência por Módulo</b>	260 Wp	325 Wp	80 Wp
<b>Potência do Subsistema</b>	1,56 kWp	1,625 kWp	1,6 kWp
<b>Área do Arranjo</b>	10,44 m <sup>2</sup>	10 m <sup>2</sup>	14,7 m <sup>2</sup>
<b>Fabricante do Inversor</b>	Fronius	Fronius	Fronius
<b>Modelo do Inversor</b>	Galvo 1.5	Galvo 1.5	Galvo 1.5
<b>Potência Nominal do Inversor</b>	1,5 kW	1,5 kW	1,5 kW
<b>Tensão de Saída do Inversor</b>	220 V	220 V	220 V

### 2.2 Sistema *off-grid*

Um resumo das características do sistema *off-grid* pode ser vistos na Tabela 2. Os detalhes sobre o módulo fotovoltaico utilizado com células de filme fino, além das características do inversor, podem ser vistos em (9) e (10), respectivamente.

TABELA 2 - Características dos subsistemas *off-grid*

<b>Nº de módulos</b>	08
<b>Fabricante</b>	Avancis
<b>Modelo</b>	PowerMax Strong 120
<b>Tecnologia</b>	CIS
<b>Potência por Módulo</b>	120 Wp
<b>Potência do Sistema</b>	0,96 kWp
<b>Área do Arranjo</b>	8,96 m <sup>2</sup>
<b>Fabricante do Inversor</b>	Xantrex
<b>Modelo do Inversor</b>	ProSINE 1000
<b>Potência Nominal do Inversor</b>	1,0 kW
<b>Tensão de Saída do Inversor</b>	220 V

A seguir serão exibidos os detalhes dos sistemas de microgeração fotovoltaicos *on-grid* e *off-grid* instalados no IFS. Esse sistema pode ser visualizado na Figura 2.



FIGURA 2 – Sistemas On e Off Grid: Inversores, quadros de força, controlador de carga e banco de baterias.

### 3.0 - INDICADORES DE QUALIDADE

Os indicadores de qualidade são itens levantados e avaliados para verificar o desempenho dos módulos fotovoltaicos de cada tecnologia, e é a partir deles que se pode ter uma noção de como cada tecnologia se comporta e qual a mais adequada para a situação estudada. São eles:

#### 3.1 - Curvas de geração

Trata-se do perfil de desempenho de cada subsistema relativo a geração de energia durante um determinado dia e aponta a evolução da potência gerada, por hora efetiva de funcionamento, durante o dia de referência. A média desse comportamento é usada na comparação.

Foram coletados diariamente dados de energia gerada em períodos de 5 min e, após tratamento estatístico, calculou-se os valores médios horários de todos os dias dos meses de junho/2016 a dezembro/2016. As curvas típicas de geração foram segregadas mensalmente para cada sistema fotovoltaico e, na comparação final, foi confrontada a média mensal dos sete meses estudados.

#### 3.2 - Desempenho Médio Mensal ( $\eta_{méd}$ )

É o rendimento mensal, calculado pela razão entre a potência média gerada ( $P_{méd}$ ) e a potência instalada do sistema ( $P_{inst}$ ), em um determinado mês, sendo um valor adimensional referente a capacidade de geração, ou seja, a parcela da potência instalada que foi efetivamente entregue pelo sistema. No cálculo da potência média gerada somente é considerado o tempo de efetiva geração.

$$\eta_{méd} = \frac{P_{méd}}{P_{inst}} \quad (1)$$

### 3.3 - Desempenho Máximo Mensal ( $\eta_{m\acute{a}x}$ )

Semelhante ao item anterior, este é o rendimento máximo, calculado pela razão entre a potência máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ ) registrada em um determinado mês e a potência instalada do sistema, o que representa a capacidade máxima de geração neste período. É dado pela equação a seguir:

$$\eta_{m\acute{a}x} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{inst}} \quad (2)$$

### 3.4 - Energia Mensal Gerada por Potência Instalada ( $E_{esp}$ )

É a quantidade de energia gerada ( $E_{méd}$ ), mensalmente, por unidade de potência instalada, denominada de energia específica produzida, dada em kWh/kWp. O cálculo é feito em função do kWp para se uniformizar a medida entre os subsistemas e assim permitir uma comparação mais precisa entre eles. Tal valor é dado pela equação a seguir:

$$E_{esp} = \frac{E_{méd}}{P_{inst}} \quad (3)$$

### 3.5 - Tempo Mensal de Geração (TMG)

É a parcela de horas de geração efetiva de energia em relação ao número total de horas de um determinado mês, para cada subsistema. Em outras palavras, é o tempo efetivo em que os módulos estão produzindo energia. Este cálculo é dado pela equação que segue:

$$TMG = \frac{n^{\circ} \text{ de horas de geração}}{n^{\circ} \text{ de horas totais}} \quad (4)$$

## 4.0 - SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Neste capítulo são apresentados resultados de simulação e de medição, referentes ao sistema proposto, os quais fornecem os indicadores de desempenho, que determinam a qualidade de cada tecnologia empregada. As medições foram realizadas por subsistema e estão discriminadas em cada gráfico, de forma a distinguir a análise individual.

A simulação foi realizada utilizando o *software* PVsyst versão 6.0, adquirido especificamente para análise de viabilidade técnica e estudo de desempenho do projeto apresentado.

### 4.1 - Curvas de Geração

O gráfico da Figura 3 apresenta o perfil de desempenho diário para cada subsistema *on-grid* e aponta também um desempenho médio. Em todos os meses do período analisado, foi constatada uma similaridade nas curvas de geração dos três subsistemas, com uma ligeira superioridade do sistema a filme fino (CdTe). Na média de junho a dezembro de 2016, os desempenhos médios desses sistemas foram de 40,0%, 38,4% e 37,6%, respectivamente. Também foi observado que, no período inicial de tomada de carga, o subsistema a filme fino apresenta um desempenho inferior em relação aos demais, igualando e superando-os após cerca de 2 horas de funcionamento.



FIGURA 3 - Curvas diárias de desempenho por subsistemas *on-grid*.

#### 4.2 - Desempenho Médio Mensal

O gráfico da Figura 4 ilustra o desempenho médio mensal, durante o tempo de efetiva geração, para cada um dos subsistemas. Nos meses mais chuvosos da região nordeste (junho a setembro), os indicadores apresentam os menores valores do gráfico, ao passo em que, nos meses de menor incidência de chuva (outubro a dezembro), o comportamento inverso é verificado. Ainda que os valores sejam próximos, verificou-se que o sistema de filme fino (CdTe) apresentou o melhor desempenho, seguido do policristalino e do monocristalino, com valores médios de 39,9%, 38,4% e 37,6% respectivamente, calculados ao longo período analisado.

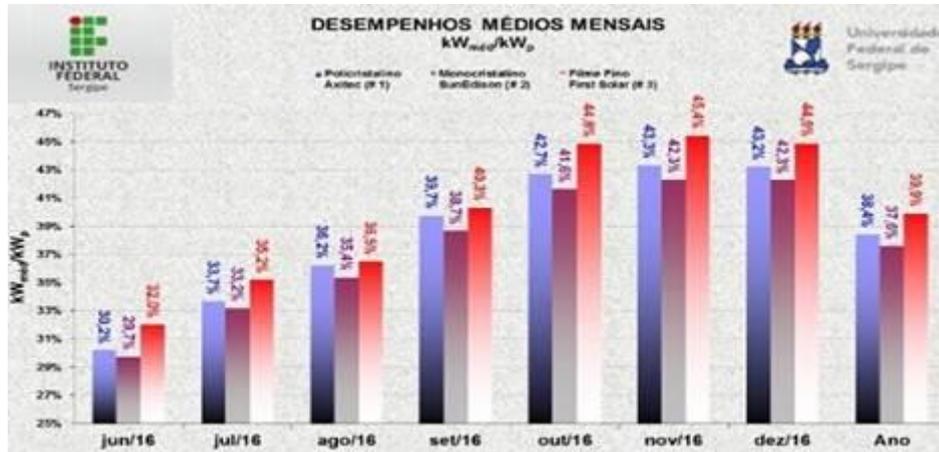


FIGURA 4 - Desempenho médio mensal por subsistema *on-grid*

#### 4.3 - Desempenho Máximo Mensal

O gráfico da Figura 5 mostra os desempenhos máximos mensais, durante o tempo de efetiva geração, para cada um dos subsistemas *on-grid*. Nos meses mais chuvosos (junho a setembro) da região nordeste, os indicadores de desempenho máximo do sistema de filme fino (CdTe) foram superiores, seguido pelo policristalino e monocristalino. Já nos meses menos chuvosos (outubro a dezembro), com radiação direta mais intensa, o melhor desempenho foi do sistema policristalino, seguido pelo filme fino (CdTe) e monocristalino.

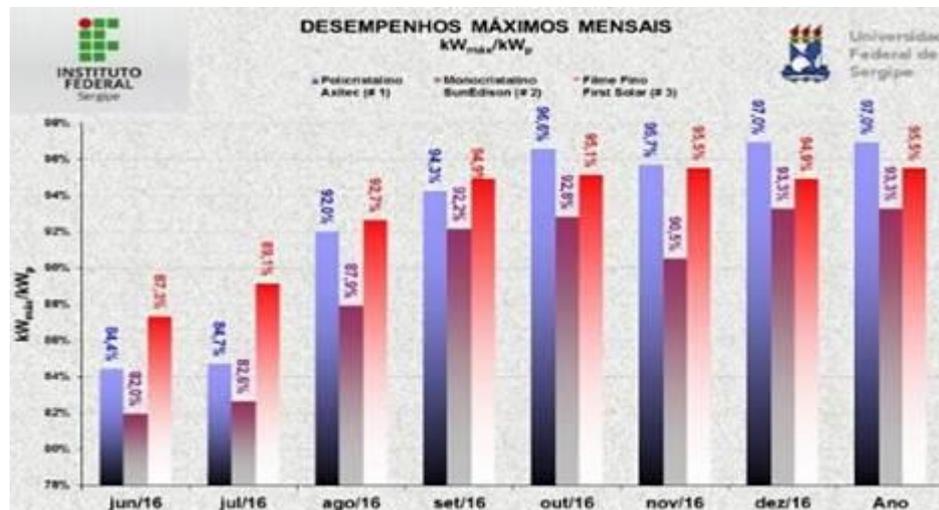


FIGURA 5 - Desempenho máximo mensal por subsistema *on-grid*

Ao longo do período analisado, os desempenhos máximos dos sistemas policristalino, filme fino (CdTe) e monocristalino foram de 97,0%, 95,5% e 93,3%, respectivamente.

#### 4.4 - Energia Mensal Gerada por Potência Instalada

O gráfico da Figura 6 ilustra a energia gerada mensalmente por unidade de potência instalada, para cada um dos subsistemas *on-grid*. Constatou-se que o indicador de melhor desempenho foi o do sistema de filme fino (CdTe), seguido pelo policristalino e, por fim, do sistema monocristalino, todos registrados no período de junho a dezembro de 2016.

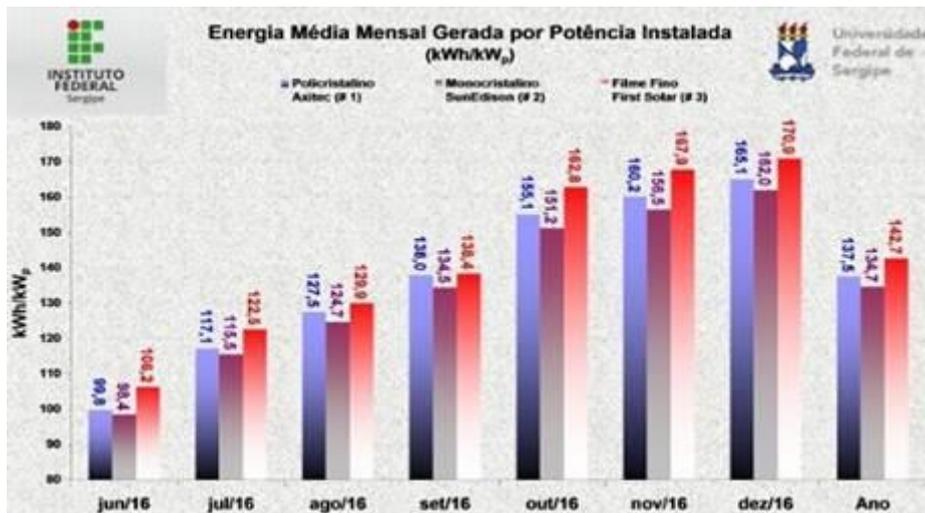


FIGURA 6 - Energia mensal gerada por potência instalada por subsistema *on-grid*.

#### 4.5 - Tempo Mensal de Geração

No gráfico da Figura 7 é mostrado o tempo de geração efetiva por mês para cada um dos subsistemas *on-grid*. Nos meses mais chuvosos da região nordeste (junho a setembro), o sistema de filme fino (CdTe) apresenta desempenho superior, seguido pelo policristalino e monocristalino, já nos meses menos chuvosos (outubro a dezembro), o melhor desempenho foi do sistema policristalino, seguido pelo filme fino (CdTe) e monocristalino. Em todo o período analisado, os indicadores apresentaram valores bem próximos, sendo 48,59%, 48,53% e 48,48% para os sistemas monocristalino, policristalino e a filme fino (CdTe), respectivamente.

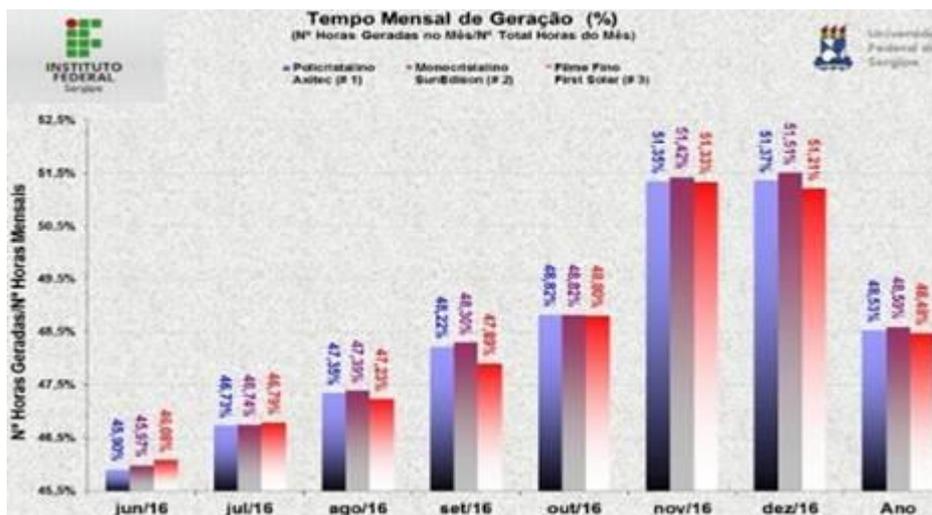


FIGURA 7 - Tempo mensal de geração nos subsistemas *on-grid*.

#### 4.6 - Comparativo entre Simulação e Medição da Energia Mensal Gerada

O gráfico mostrado na Figura 8 ilustra a quantidade de energia gerada por mês pelo sistema em comparação com a previsão inicialmente estipulada na simulação. A curva em verde representa a previsão mensal da produção de energia, simulada no programa PVsyst, enquanto que os valores efetivamente registrados estão na curva em azul. As barras vermelhas apontam os desvios verificados entre os valores registrados e os previstos. Todos os desvios verificados foram positivos e, no período analisado, esses valores estão no intervalo de 11,6% a 19,6%. No acumulado de junho a dezembro de 2016, o desvio médio foi de 15,7%, onde a previsão de geração foi de 3.972 kWh e o realizado foi de 4.597 kWh.

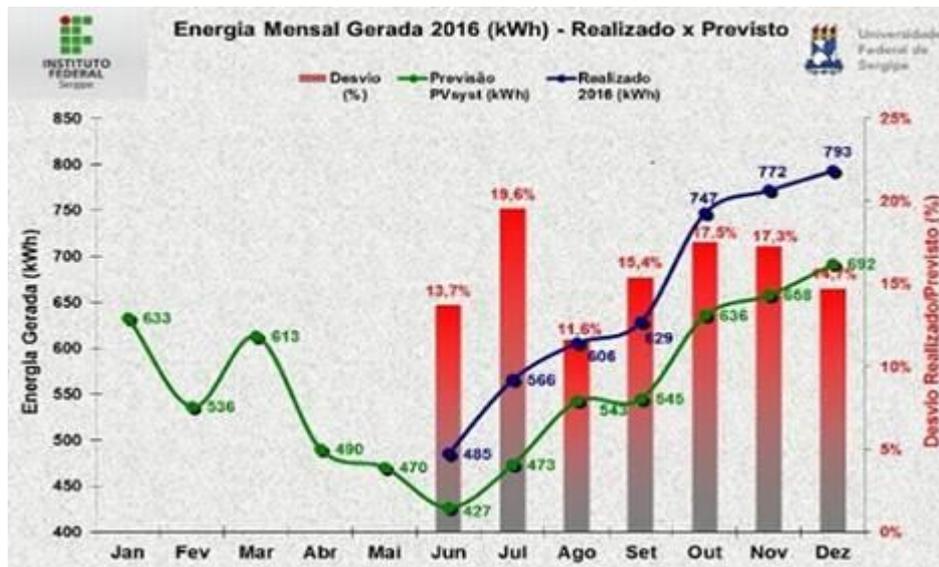


FIGURA 8 - Comparativos da energia gerada com a prevista para o sistema *on-grid*.

## 5.0 - CONCLUSÃO

Foram analisadas três tecnologias de módulos fotovoltaicos empregadas no projeto e, com base em todos os indicadores calculados, e na avaliação dos resultados obtidos, constatou-se que, apesar da similaridade dos valores, há uma pequena variação de desempenho entre essas tecnologias, e o subsistema a filme fino (CdTe) apresenta uma ligeira superioridade nos indicadores de energia, quando comparados aos de silício cristalino (conforme observado nas Figuras 4 e 6). Tal constatação pode ser justificada pela qualidade e o processo de fabricação dos módulos, características de perdas (principalmente térmicas) do material empregado na construção e também devido a característica de os módulos de filme fino (CdTe) obterem melhor rendimento em dias nublados ou chuvosos, nos quais os raios solares não incidem diretamente sobre a superfície dos módulos, incidindo de forma espalhada no plano coletor (radiação difusa ou indireta). Neste aspecto, os módulos de filme fino (CdTe) demonstraram melhor capacidade de geração do que os módulos de silício cristalino.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que nos meses de menor radiação solar, ou de radiação difusa, a tecnologia que melhor se comportou foi a constituída de filme fino (CdTe), sendo portanto a mais adequada para este período. Já nos meses de maior radiação solar (menos nuvens e chuvas) a tecnologia que melhor se comportou foi a de silício policristalino, sendo a que apresenta o melhor desempenho máximo e portanto a mais adequada no período mais seco do ano. Tais situações descritas referem-se ao nordeste brasileiro e aos equipamentos utilizados neste projeto, nas condições apresentadas, sendo ainda necessário o fechamento da análise no período de um ano completo, para que se possa fazer uma avaliação mais conclusiva, pois essas constatações foram feitas em sete meses de levantamento de dados (Figura 5).

Em relação ao sistema *off-grid* com módulos filme fino (CIS), não foi possível fazer uma análise mais detalhada do seu desempenho devido às limitações técnicas dos equipamentos empregados neste sistema, como a ausência de monitoramento remoto e de armazenamento de dados, por exemplo. Sendo assim, o desempenho foi observado mediante a alimentação de um circuito isolado de iluminação com 600 W de potência e foi constatado que a autonomia do sistema ficou em torno de 2,5 horas diárias em dias úteis, perfazendo um consumo médio mensal de 30 kWh, devido ao pequeno porte do banco de baterias. Nos horários em que havia geração fotovoltaica, o sistema recebia energia do ramal que vai para o inversor diretamente dos módulos fotovoltaicos, poupando assim o banco de baterias neste período.

Quanto às simulações feitas no programa adquirido para o projeto, verificou-se que o realizado em sete meses foi em média 15% superior ao previsto (Figura 8). Tal discrepância pode ter sido causada devido ao fato dos dados climatológicos para a região trabalhada terem sido estimados e coletados em mapas, visto que não havia instrumentos de medição e sensores instalados no local, o que afeta significativamente a qualidade das previsões.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) EPE, Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira, 2012.
- (2) KAYANO, M. T., ANDREOLI, R. V. Clima da Região Nordeste do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

- (3) PEREIRA, E. B., ABREU, S. L., STUHLMANN, R., RIELAND, M., COLLE, S. Survey of the incident solar radiation in Brazil by the use the METEOSAT satellite data. Solar Energy, v.57, n.2, p.125-132, 1996.
- (4) PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., ABREU, S. L., RUTHER, R. Atlas brasileiro de energia solar. São José dos Campos: INPE, 2006.
- (5) AXITEC. AXIPower. Axitec, 2016. Disponível em: <http://www.axitecsolar.com>.
- (6) SUNEDSON. Silvantis F-Series 310 W to 335 W. Sunedson, 2016. Disponível em: <http://www.sunedison.com/>.
- (7) FIRSTSOLAR. First Solar FS Series 2. First Solar, 2016. Disponível em: <http://www.firstsolar.com/>.
- (8) FRONIUS. Fronius Galvo. Fronius, 2016, Disponível em: < [www.fronius.com](http://www.fronius.com) >.
- (9) AVANCIS. PowerMax. Avancis, 2016. Disponível em: <<http://www.avancis.de/>>.
- (10) XANTREX. Prosine. Xantrex, 2016. Disponível em: <<http://www.xantrex.com>>.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Milthon Serna Silva** nasceu em 1972 na cidade de Cusco/Peru. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade São Antonio Abad (1993) - Peru, Mestrado e Doutorado em Sistemas de Potência pela Universidade de São Paulo (2002 e 2005) - Brasil e Pós-Doutorados em Geração Eólica na Brandenburgische Technische Universität (2006) - Alemanha e Geração Fotovoltaica na Universidade do Porto (2016) - Portugal. Trabalhou como consultor e pesquisador visitante da Siemens na Alemanha. Realizou cursos de especialização em diferentes países como EUA, Índia, Itália, Espanha e Áustria. Atualmente é professor associado da Universidade Federal de Sergipe (UFS). Tem experiência no desenvolvimento e implementação de projetos nas áreas de Monitoramento de sistemas elétricos e Geração de Energia Elétrica através de fontes não convencionais eólica, fotovoltaica e biomassa.



**Carlos Eduardo Gama da Silva** nasceu em 1957 na cidade de Aracaju. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (1980) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Sergipe (2013). Ex-colaborador como engenheiro eletricitista na Energisa Distribuidora de Sergipe (1980-2010). Desde 1995 é professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe (IFS). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, Mercado e Comercialização de Energia. Fez aperfeiçoamento em Engenharia de Operação - Despacho e Subdespacho (Eletrobrás/UFGM-1981) e especialização em Gestão de Empresas (Fapase/UFS-2003).



**Roberto Felipe Andrade Menezes** nasceu em 1988 na cidade de Aracaju. Possui graduação em Engenharia Elétrica com Habilitação em Eletrônica pela Universidade Federal de Sergipe (2013) e mestrado em Engenharia Elétrica pela mesma universidade (2017). Trabalhou na Comissão Interna de Conservação de Energia da UFS, na área de Eficiência Energética. Foi pesquisador do Sergipe Parque Tecnológico, trabalhando no mapeamento eólico do estado de Sergipe. Atuou como pesquisador na área de Planejamento da Operação Energética durante o mestrado. Trabalhou como engenheiro especialista no Instituto Federal de Sergipe, na área de geração fotovoltaica. Atualmente é doutorando na Universidade Federal de Pernambuco, trabalhando na área de Processamento de Energia.



**Wislay Klayson Abreu e Silva** nasceu em 1990 na cidade de Olho d'Água das Flores. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Sergipe (2016). Trabalhou na Comissão Interna de Conservação de Energia da UFS, na área de Eficiência Energética. Estagiou no Centro de Pesquisa da Petrobras, no polo de Atalaia, em Aracaju-SE. Trabalhou como engenheiro especialista em projeto e operação no sistema de geração de energia fotovoltaica do Instituto Federal de Sergipe (IFS). Atualmente cursando MBA em Projeto, Execução e Controle de Engenharia Elétrica no Instituto de Pós-graduação e Graduação de Maceió (IPOG Maceió) e fazendo projetos em geração de energia fotovoltaica.