

# COMPARAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM DIFERENTES TECNOLOGIAS NO NORDESTE

MILTHON SERNA SILVA, VINICIUS SOUZA SILVA, DANIEL R. DE OLIVEIRA FORTES, FLÁVIO COUVO T. MAIA

*Universidade Federal de Sergipe  
Departamento de Engenharia Elétrica  
São Cristóvão, Sergipe, Brasil*

*E-mails: milthons@yahoo.es, vini.eolica@gmail.com, drfortes93@gmail.com,  
flavioctm@yahoo.com.br*

**Abstract** — Different types of photovoltaic panels are inserted in the market to be commercialized and used in systems of microgeneration, minigeneration, or in large photovoltaic plants connected on-grid. However there are some factors that limit the generation of each type of panel, mainly the energy of the solar radiation incident, the place, and predominant type of climate in which it is inserted, and the position in which they are installed, thus making certain kind of panel impracticable to a specific region. The insertion of new technologies of photovoltaic panels with solar trackers has been growing lately due to the greater yield achieved in the generation of electric energy with this type of system, as much the application of movement of the photovoltaic panels in single-axis as in two-axes. Considering the variation of electric power generation for each type of installed system (with and without the insertion of solar trackers) and with different technologies of photovoltaic panels in a specific locality, this work has the main objective the comparison among these systems. The study modelled each type of photovoltaic system in the PVsyst software, simulating the generation in a year, obtaining a final result of the best technical and economic adequacy, in a facility developed at the Sergipe state.

Technical & Economic comparison of the PV projects with different technologies in the Brasilein northeast installations.

**Keywords**— Power generation, Renewable energies, PV technologies.

**Resumo**— Diferentes tipos de módulos fotovoltaicos estão inseridos no mercado para serem comercializados e utilizados em sistemas de microgeração, minigeração, ou em usinas fotovoltaicas de grande porte On-Grid, porém existem alguns fatores que limitam a geração em cada tipo de módulo, principalmente a energia da radiação solar que é incidida, o local a serem instalados, o tipo de clima predominante em que ela está inserida, e até mesmo a posição as quais estão instalados, tornando assim, certo tipo de tecnologia de fabricação de módulo inviável para uma determinada região. A inserção de novas tecnologias de painéis fotovoltaicos com seguidores solares vem crescendo ultimamente devido ao maior rendimento alcançado na geração de energia elétrica com esse tipo de sistema, tanto com a aplicação de movimentação dos painéis em um eixo quanto em dois eixos. Tendo em vista a variação da geração de energia elétrica para cada tipo de sistema instalado (com e sem a inserção de seguidores solares) e com diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos em uma determinada localidade, este trabalho tem como principal objetivo a comparação entre estes sistemas. O estudo modelou cada tipo de sistema fotovoltaico no software PVsyst, simulando a geração no período de um ano, obtendo como resultado final a melhor adequação técnica e econômica, em uma instalação para Sergipe.

**Palavras-chave**— Geração de energia, Energias renováveis, Tecnologia solar-fotovoltaica.

## 1 Introdução

Em 1980 o mundo todo consumia cerca de 7.000 terawatts-hora ou 7.000.000 gigawatts-hora de eletricidade. Segundo previsões da Agência Internacional de Energia (AIE), esse número vai subir para quase 30.000 terawatts-hora em 2030 (VILLALVA e GAZOLI, 2012). Em países como o Brasil, a energia produzida pelas usinas hidrelétricas está chegando a sua capacidade máxima, pois faltam grandes bacias hidrográficas propícias para a instalação de novas usinas. Então, com o crescimento da demanda por energia será necessário diversificar a matriz energética Brasileira a fim de reduzir a dependência da geração hidráulica. Dentre as formas de geração de energia renovável se pode citar a energia solar fotovoltaica, que vem ganhando destaque por ser uma forma de produção limpa, e assim evitando a grande devastação ambiental registradas nas últimas décadas causadas pelo uso de centrais termelétricas que utilizam carvão, gás natural e álcool como fonte de energia.

Além disso, a construção de parques solares é mais atrativa do que outras formas de geração, devido à dificuldade de implementação de outros meios de produção de energia elétrica pela falta de espaços apropriados, como os aerogeradores em grandes centros urbanos, como também pelo receio e alta periculosidade trazida pelas usinas nucleares.

O sol, como uma grande fonte de energia inesgotável e de possível alcance em todas as localidades da terra, tornou a utilização da geração de energia elétrica através da instalação de placas fotovoltaicas um caminho alternativo para trazer um desenvolvimento no setor energético aliado à preservação ambiental. O território brasileiro recebe elevados índices de irradiação solar, quando comparado com países europeus, onde a tecnologia fotovoltaica é disseminada décadas atrás para a produção de energia elétrica. Constatase, entretanto, que o avanço tecnológico no Brasil esta passando por fases de crescimento (PINHO e GALDINO, 2014). Sendo que as Regiões Nordeste e Centro-Oeste são as que possuem maiores valores de insolação no Brasil.

Os módulos solares fotovoltaicos apresentam vários tipos de elementos que podem ser empregados na sua fabricação, porém o elemento silício é o mais comumente utilizado para o desenvolvimento das células de silício monocristalino, policristalino e a de filme fino de silício. Dependendo de qual tecnologia de fabricação é utilizada, o módulo fotovoltaico apresenta um rendimento e desempenho para um determinado ambiente a qual foi designado. Aliado ao tipo de tecnologia utilizado na fabricação dos módulos, o ângulo de inclinação dos painéis em relação ao solo e orientação norte ou sul geográfico apresentam um fator primordial nos números da geração de energia elétrica. Um estudo sobre a variação de geração de energia elétrica para cada tipo de tecnologia de fabricação de módulos fotovoltaicos, juntamente com o estudo de implementação de seguidores solares de um ou dois eixos de rotação apresentam extrema importância quando uma região desponta como uma forte candidata para geração solar fotovoltaica conectada à rede, isso porque o custo de instalação e o retorno financeiro para esse caso apresentam forte ligação com o tipo de tecnologia de placas aplicada e o sistema utilizado.

## 2 Energia solar fotovoltaica

O sol é uma fonte de energia inesgotável, que apresenta uma parcela de importância para a sobrevivência dos seres vivos na terra. Para a geração de energia elétrica através de módulos fotovoltaicos o sol torna-se uma fonte essencial, pois consegue emitir radiação eletromagnética com diferentes níveis de frequências e energias.

A radiação emitida pelo sol, conhecida como banda solar, encontra-se na faixa de comprimento de onda de 0,1 a 3  $\mu\text{m}$ , e 7% da energia da banda solar, encontram-se na região do ultravioleta, 46,8% na região visível e o restante na região do infravermelho (SANTOS, 2013).

Essa energia provoca nos módulos o efeito fotovoltaico que é a base dos sistemas que utilizam esse tipo de geração de energia, caracterizando-se pelo aparecimento de uma diferença de potencial nos pólos de uma estrutura de material semicondutor, ocasionada pela absorção da luz.

### 2.1 Irradiância e insolação

A irradiância e a insolação são conceitos importantes para o quesito de geração de energia elétrica, isso porque a quantidade de energia solar recebida em uma determinada localidade na terra pode ser um critério crucial para a instalação de um sistema fotovoltaico. A irradiância se caracteriza como a potência que é conseguida em uma determinada área, já a insolação é uma grandeza que expressa a razão da energia pela área ao longo de um intervalo de tempo. A irradiância se caracteriza como uma das principais medições feitas e sendo seus valores disponibilizados através dos mapas solarimétricos.

A irradiação média anual brasileira varia entre 1.200 e 2.400 kWh/m<sup>2</sup>/ano, bem acima da média da Europa, mas há no mundo regiões com valores acima de 3.000 kWh/m<sup>2</sup>/ano, como Austrália, norte e sul da África, Oriente Médio, parte da Ásia Central, parte da Índia, sudoeste dos USA, além de México, Chile e Peru (MME, 2016).

### 2.2 Localização e orientação dos módulos fotovoltaicos

Segundo Villalva e Gazoli (2012), em cada localização na terra, os raios solares de forma direta incidem com uma determinada inclinação em relação ao solo, dependendo da hora do dia, fazendo com que seja necessária a instalação de painéis com uma orientação adequada para maximizar o rendimento do módulo fotovoltaico. Tendo em vista a movimentação do sol, do Leste (nascente) para o Oeste (poente), a orientação ideal para se instalar um painel fotovoltaico é virar a sua face para o Norte geográfico caso a localização da instalação seja no Hemisfério Sul, ou voltada para o Sul geográfico caso a localização da instalação seja no Hemisfério Norte, fazendo assim com que se consiga um melhor aproveitamento da energia proporcionada pelo sol.

Outro ponto que deve ser analisado é a inclinação que os raios solares incidem na superfície da placa fotovoltaica, apresentando um melhor aproveitamento quando os raios solares incidem de forma perpendicular com o plano da placa. Tendo em vista que existe uma variação do ângulo de incidência solar diariamente e que o custo de instalação de mecanismos para o acompanhamento da radiação solar é muitas vezes inviável de aplicar, deve-se instalar a placa com um determinado ângulo de inclinação, que depende da latitude geográfica da instalação, tendo como referência a Linha do Equador.

Na Tabela 1 é apresentada uma lista com as inclinações necessárias para as placas fotovoltaicas instaladas em alguns estados do Brasil. Não se recomenda a instalação de placas fotovoltaicas com ângulos de inclinação inferiores a 10°, de modo a evitar o acúmulo de poeira sobre sua superfície e consequentemente diminuição do seu rendimento.

Tabela 1 - Ângulo de inclinação para as placas fotovoltaicas fixas.

Estado	Ângulo	Estado	Ângulo
Acre	15°	Paraíba	15°
Alagoas	15°	Paraná	25°
Amapá	15°	Pernambuco	15°
Amazonas	15°	Piauí	15°
Bahia	15°	Rio de Janeiro	22°
Ceará	15°	Rio Grande do Norte	15°
Espírito Santo	20°	Rio Grande do Sul	40°
Goiás	16°	Rondônia	15°
Maranhão	15°	Roraima	15°
Mato Grosso	15°	Santa Catarina	32°
Mato Grosso do sul	20°	São Paulo	23°
Minas Gerais	19°	Sergipe	15°
Pará	15°	Tocantins	15°

Fonte: Adaptado de (AQUINO, 2016).

### 2.3 Funcionamento dos módulos fotovoltaicos

As células fotovoltaicas são fabricadas com materiais semicondutores que precisam passar por um processo de purificação e em seguida um processo de dopagem com a adição de determinada quantidade de elementos químicos, como boro e fósforo, para que possa ocorrer o efeito fotovoltaico. O princípio de funcionamento do efeito fotovoltaico está ligado diretamente à existência de uma junção conhecida como P-N (SANTOS, 2013).

O silício puro quando dopado com um elemento que apresente mais elétrons na sua camada de valência comparado ao elemento que está sendo utilizado como base resultará um semicondutor do tipo N. Caso use um elemento para dopagem com menos elétrons na camada de valência do que o elemento base resultará um semicondutor do tipo P.

A junção P-N é criada quando elétrons livres do lado N se deslocam para o lado P, onde existem lacunas que os capturam. Dessa forma, os elétrons se acumulam do lado P e o tornam carregado negativamente. Consequentemente, o N tem a quantidade de elétrons reduzida e fica carregado positivamente. Essas cargas dão origem a um campo elétrico que impede a passagem de mais elétrons através da junção. Quando a junção P-N é exposta a radiação solar, a incidência de fótons faz com que elétrons se desloquem através do campo elétrico criado e gerem uma corrente elétrica quando os terminais da junção são conectados a um circuito elétrico.

Dependendo do tipo de carga conectada ao sistema ocorre a variação de potência fornecida pela placa fotovoltaica. Circuitos que demandam altas correntes tendem a cair o nível de tensão gerada, em contrapartida, circuitos com baixas correntes aumentam o nível de tensão. Existe um ponto ideal em que corresponde a situação da máxima potência fornecida pela placa fotovoltaica, devendo assim, para um bom desempenho de uma instalação, que os sistemas trabalhem próximo a essa região, como pode ser visto nas Figuras 1 e 2.

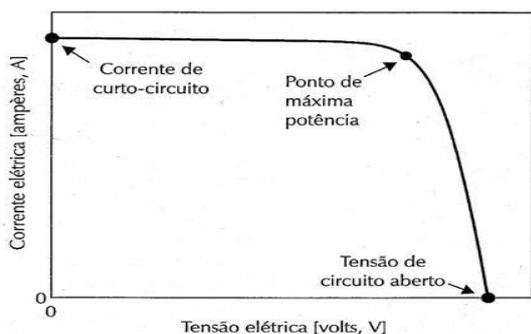


Figura 1 – Curva Característica I-V de um módulo fotovoltaico.

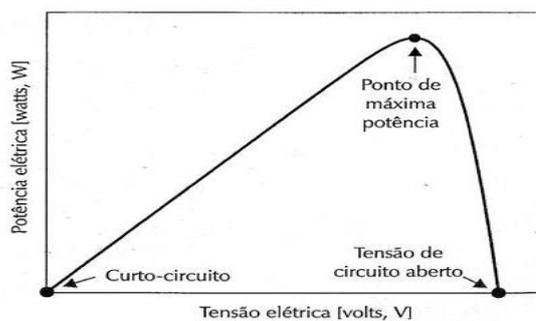


Figura 2 – Curva característica P-V de um módulo fotovoltaico.

### 2.4 Influências na geração fotovoltaica

As células fotovoltaicas variam na sua sensibilidade aos diferentes níveis espectrais da radiação incidente, dependendo da tecnologia e do material utilizado na fabricação. A sensibilidade espectral relativa diz respeito à resposta espectral da célula, ou seja, à capacidade do dispositivo absorver a energia proveniente dos fótons da radiação solar em diferentes níveis de comprimento de onda (ZILLES, 2012).

As próprias células fotovoltaicas apresentam uma resistência série e paralelo, dois parâmetros que afetam suas características elétricas, sendo a resistência paralelo ocasionada pela imperfeição criada na junção P-N e a resistência série sendo ocasionada pelo contato entre o silício e os contatos metálicos, da resistência dos contatos metálicos e da resistência dos bornes.

A irradiância solar incidente afeta a curva I-V de uma célula fotovoltaica de silício, mantida na temperatura de 25 °C. A corrente elétrica gerada por uma célula fotovoltaica aumenta linearmente com o aumento da irradiância solar incidente, enquanto que a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) aumenta de forma logarítmica (PINHO e GALDINO, 2014). Como pode ser visto na Figura 3.

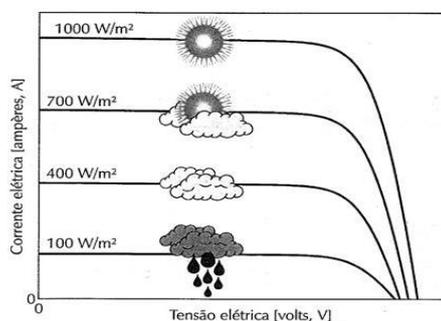


Figura 3 – Influência da radiação solar na operação de módulos fotovoltaicos.

As variações da irradiância solar incidente e da temperatura ambiente afetam a temperatura de operação das células fotovoltaicas que compõem os módulos fotovoltaicos. O aumento da irradiância incidente e/ou da temperatura ambiente produz um aumento da temperatura da célula e, consequentemente, tende a reduzir a sua eficiência. Isto se deve ao fato de que a tensão da célula diminui significativamente com o

aumento da temperatura, enquanto que a sua corrente sofre uma elevação muito pequena, quase desprezível. Tal comportamento pode ser observado na Figura 4.

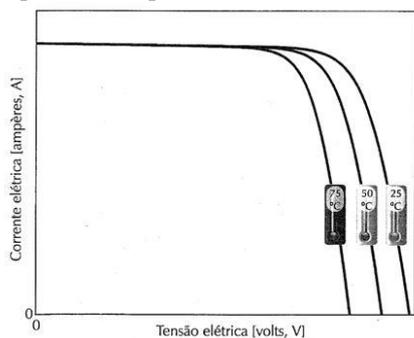


Figura 4 – Influência da temperatura na operação dos módulos fotovoltaicos.

### 3 Tipos de sistemas de geração solar fotovoltaica

#### 3.1 Sistemas fotovoltaicos fixos

Os sistemas fotovoltaicos fixos apresentam um ângulo pré-determinado de inclinação dos módulos em relação ao solo, o qual é escolhido para haver uma melhor captação dos raios solares incidentes sobre esse sistema durante todo o período de produção, otimizando assim a quantidade de energia elétrica gerada.

Sempre que possível, deve-se orientar o módulo com sua face voltada para o norte geográfico caso a localização esteja no hemisfério sul, pois isso maximiza a produção média diária de energia. Caso a localização esteja no hemisfério norte deve-se posicionar para o sul. Deve-se fazer o ajuste do ângulo de inclinação correto do módulo com relação ao solo para otimizar a produção de energia ao longo do ano. Portanto, a escolha do ângulo ideal de acordo com a latitude geográfica da localidade onde o sistema será instalado é imprescindível.

#### 3.2 Sistemas fotovoltaicos com rotação em 1 eixo

De acordo com Pereira (2012), os seguidores solares de um único eixo são desenvolvidos de uma forma os quais os painéis fotovoltaicos acompanham apenas um eixo de movimentação do sol, acompanhando no sentido leste-oeste ou no sentido norte-sul. O sistema de um eixo é considerado mais simples pelo fato do uso de apenas um motor e dessa forma apresenta um menor consumo de energia. O eixo de acompanhamento leste-oeste é o mais utilizado por esse ser o movimento de maior variação do sol.

Um sistema que possui apenas um grau de liberdade para rotação permite que ajuste apenas um dos ângulos de instalação do módulo, o ângulo azimutal (orientação com relação ao norte geográfico, em localidades no hemisfério sul ou com relação ao sul geográfico, em localidades no hemisfério norte) ou o ângulo de inclinação do painel em relação ao solo.

Os seguidores de um único eixo podem ser classificados como: Eixo horizontal, onde é alterado somen-

te o ângulo dos painéis em relação ao solo; eixo vertical ou azimutal, onde os painéis, ao se movimentarem, provocam uma variação do azimute ao longo do dia, ou eixo único, onde esse sistema apresenta um eixo colocado na posição norte-sul em que as placas estarão apoiadas e esse eixo é quem sofrerá a rotação e seguirá a posição do sol (CORTEZ, 2013). Os modelos dos três tipos de sistemas citados acima podem ser vistos na Figura 5.

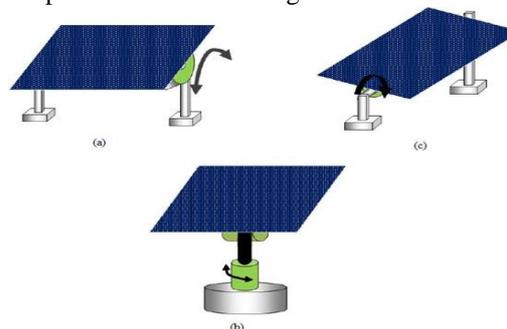


Figura 5 – Sistemas rastreados de 1 eixo: Horizontal (a); Vertical (b); Polar (c).

Segundo Solar Choice (2010), a instalação de seguidores de movimentação de eixo horizontal é mais adequada para regiões de pequenas latitudes (locais nos trópicos e mais perto do Equador), enquanto que os rastreadores de movimentação de eixo polar e vertical são mais adequados para latitudes maiores (locais longe do Equador).

Em um estudo realizado em Bagdá, Al-Najjar (2013) mostra a ocorrência de um ganho de aproximadamente 29,6% na geração de energia elétrica em um período de um ano utilizando-se seguidor de um único eixo em relação a painéis com eixo fixos, fazendo o acompanhamento do sol de leste a oeste tentando buscar a maior incidência solar, ganho este suficiente para cobrir o consumo de energia devido à instalação do sistema de rastreamento.

#### 3.3 Sistemas fotovoltaicos com rotação em 2 eixos

Seguidores de eixo duplo permitem que os painéis acompanhem o movimento do sol nos dois eixos, com o aumento no consumo e na complexidade devido a um motor a mais, mas esse sistema garante que os painéis estejam apontados diretamente para o sol a qualquer hora e em qualquer lugar que este seja instalado, aumentando o percentual de energia convertida em relação ao sistema de eixo simples (TREVILIN, 2014). A estrutura do sistema fotovoltaico com movimentação em dois eixos pode ser observada na Figura 6.

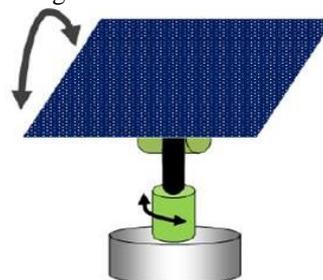


Figura 6 – Sistema rastreado de 2 eixos.

O seguidor solar de duplo eixo apresenta um maior rendimento quando instalado em locais com maiores latitudes, isso se dá ao fato dessa localização sofrer uma variação sazonal na altura do sol e no seu arco que percorre ao longo do dia.

Estudos feitos por Axaopoulos e Fylladitakis (2013) onde dados coletados através de simulação em software com características de Atenas na Grécia, de Stuttgart na Alemanha e de Aberdeen na Escócia, mostraram ganhos percentuais anuais na geração de energia elétrica de 34,8%, 28,7% e 30,4% nos sistemas fotovoltaicos dessas respectivas cidades fazendo a utilização de um sistema de rastreamento de duplo eixo, capaz de acompanhar o movimento diário do sol na orientação leste-oeste e também o movimento em torno do zênite do painel evidenciado ao longo de um ano.

Esses estudos mostraram também que em todas as simulações feitas no seu trabalho os sistemas com dois eixos de movimentação apresentaram números maiores de geração em comparação com os sistemas fixos, porém quanto mais distante do Equador existe a tendência do valor de geração diminuir.

Na Europa Central os testes têm mostrado que o rendimento de um sistema com seguidor nos dois eixos é cerca de 30% maior do que o rendimento de energia de um sistema fotovoltaico estacionário. Em locais onde a parcela de luz direta do sol é mais abundante, este valor pode ser ainda maior (FERNANDES, 2014).

#### 4 Métodos de controle e posicionamento

Existem dois métodos primordiais para o posicionamento e controle dos painéis fotovoltaicos que utilizam a tecnologia de seguidores solares de um eixo ou dois eixos, através de equação horária ou através de sensores específicos para esse tipo de função.

Segundo Krug e Lopes (2016), no método utilizado com um algoritmo de posicionamento é introduzido no microprocessador do circuito um controle de malha aberta simples e objetivo, utilizando-se fórmulas matemáticas, de modo que o painel siga a trajetória do sol de acordo com a data e horário pré-estabelecidos. Desse modo, essa trajetória pré-estabelecida para o painel fotovoltaico será realizada do início ao fim do dia independente de condições climáticas, localização de nuvens durante o dia, ou percurso do sol.

O controle em malha aberta é um sistema que não possui realimentação, a entrada não depende da saída. Este sistema consiste em aplicar um sinal à entrada do sistema esperando-se que na saída o sinal consiga atingir um comportamento desejado. Assim, os dados que forem inseridos na entrada serão projetados para a saída, como é possível ver na Figura 7.



Figura 7 – Controle em malha aberta.

O segundo método é utilizando sensores específicos instalados nos painéis para fazer o rastreamento da radiação solar, desse modo, o painel sempre será posicionado de acordo com a direção de maior incidência luminosa possível ao decorrer do dia fazendo assim com que não necessite de um algoritmo programado para cada local, já que a alteração da latitude do local não trará dificuldade para o sensor rastreador operar.

Na Figura 8 é possível ver um sistema de controle de malha fechada, onde está presente um controlador associado a um atuador que será atualizado com recursos dos sensores colocados no painel fotovoltaico. Lembrando que o atuador faz parte os motores que rotacionam o eixo ligado aos painéis fotovoltaicos e o bloco de sensores está associado aos foto-sensores.

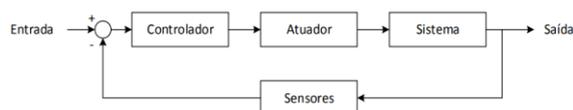


Figura 8 – Controle em malha fechada.

## 5 Aplicação

### 5.1 Local

O Campus IFS Aracaju, onde serão dimensionados os sistemas fotovoltaicos para simulação, está localizado na cidade de Aracaju na Av. Engenheiro Gentil Tavares, nº 1166, com coordenadas: 10° 54' 55" S; 37° 03' 55" O. Atualmente neste local estão instalados a mais de um ano e meio, três subsistemas fotovoltaicos monofásicos, cada um com um potência nominal de saída na ordem de 1,5 kW com tecnologias monocristalino, policristalino e filme fino, conforme ilustrado na Figura 8. Os dados desses subsistemas foram utilizados como base para as simulações no PVsyst.



Figura 9 – Subsistemas fotovoltaicos instalados.

### 5.2 Clima

De acordo com o Site CLIMATE-DATA (2018), a temperatura média anual em Aracaju é de 25,6 °C, sendo o mês de março o mais quente do ano com uma temperatura média de 26,8 °C e julho o mês que registra menores temperaturas, média de 24,0 °C. A pluviosidade média anual é de 1409 mm por ano, com o mês de maior precipitação sendo maio, com 251 mm e o mês de menor precipitação dezembro com um valor de 40 mm, apresentando assim uma diferença entre a precipitação do mês mais seco e do mês mais chuvoso de 211 mm. Já a umidade relativa

do ar média anual é de 80%. A Tabela 2 ilustra os valores da temperatura e pluviosidade média por mês na cidade de Aracaju.

Tabela 2 - Temperaturas e índices pluviométricos em Aracaju.

Temperaturas e Índices Pluviométricos – Aracaju		
Mês	Temperatura Média [°C]	Índice Pluviométrico Médio [mm]
Janeiro	26,70	49,0
Fevereiro	26,60	80,0
Março	26,80	123,0
Abril	26,30	204,0
Maio	25,50	251,0
Junho	24,60	194,0
Julho	24,00	180,0
Agosto	24,20	107,0
Setembro	25,00	77,0
Outubro	25,60	56,0
Novembro	26,00	48,0
Dezembro	26,20	40,0

### 5.3 Irradiação

Segundo o CRESESB (2016), a região de Aracaju apresenta valores de irradiação global horizontal média por dia de 5,47 kWh/m<sup>2</sup>, chegando aos maiores índices nos meses de novembro e dezembro, com valores próximos de 6,44 kWh/m<sup>2</sup>.dia em ambos meses devido aos baixos índices pluviométricos para esse período, acarretando dias mais ensolarados e sem interferências da incidência de radiação solar devido à alta densidade de nuvens.

Tabela 3 – Irradiação global horizontal em Aracaju.

Irradiação Global Horizontal - Aracaju	
Mês	Irradiação Global Horizontal Mensal Média [kWh/m <sup>2</sup> ]
Janeiro	187,86
Fevereiro	159,32
Março	181,66
Abril	149,10
Maio	142,91
Junho	128,40
Julho	141,36
Agosto	162,75
Setembro	162,60
Outubro	187,86
Novembro	193,20
Dezembro	199,64

### 5.4 Equipamentos Utilizados

Os módulos utilizados para simulação foram: Monocristalino *Canadian* 315 Wp (CS3K-315MS), Policristalino *Canadian* 330 Wp (CS6U-330P-AG) e Filme fino *Firts Solar* 90 Wp (FS-390-PLUS). O inversor utilizado foi *Fronius* PRIMO 8.2-1. O sistema com método de rastreamento em 1 eixo se diferencia do sistema fixo unicamente por apresentar entre os seus equipamentos de série a presença de um motor para cada grupo de painéis, que possibilite a rotação dos módulos em um eixo de direção. Os rastreadores solares utilizados foram *SIRIUS* em conjunto com uma central *smart-box* comandado via CLP. O sistema com o método de rastreamento em 2 eixos de rotação acrescenta um motor a mais em

relação ao sistema de 1 eixo, o qual possibilitará a movimentação dos módulos em duas direções. Acoplado ao sistema de 2 eixos estará também o sistema de controle do rastreamento da melhor incidência de radiação solar.

## 6 Simulações e Comparações

### 6.1 Software PVsyst

O PVsyst é um *software* que fornece auxílio ao projetista destinado a instalar um sistema fotovoltaico, ele disponibiliza uma pré-visualização em números do quanto determinado sistema fotovoltaico poderá gerar de acordo com as escolhas técnicas inseridas pelo projetista, tornando-se assim uma ferramenta bastante utilizada para auxiliar na escolha dos tipos de sistemas fotovoltaicos (fixo, um eixo e dois eixos).

### 6.2 Simulação do Sistema Solar Fotovoltaico Fixo

O primeiro FV fixo foi dimensionado com a instalação de 30 módulos monocristalinos *Canadian* de 315 Wp, totalizando assim uma potência de 9,45 kWp. O segundo FV utilizou 30 módulos policristalinos *Canadian* de 330 Wp, com potência instalada de 9,9 kWp. O terceiro FV fixo usou 110 módulos filme fino *First Solar* de 90 Wp, totalizando uma potência de 9,9 kWp.

Em todos os sistemas os módulos ficaram dispostos com um ângulo em relação ao solo de 10°, inclinação propícia para instalações fotovoltaica em Aracaju, e com a orientação dos módulos voltada para o norte geográfico. A Figura 10 ilustra os resultados desta simulação.

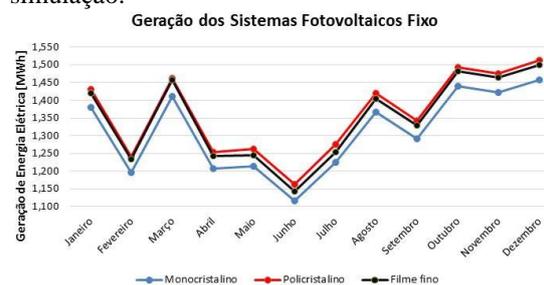


Figura 10 – Geração de energia dos FV fixos.

### 6.2 Simulação do Sistema Solar Fotovoltaico com Rotação em 1 Eixo

Os FVs foram simulados utilizando as mesmas configurações dos sistemas fixos. Em todos os casos foi utilizado um seguidor polar de eixo único, os módulos ficaram dispostos com um ângulo de 10° em relação ao solo, e com a direção dos módulos voltada para o norte geográfico, ou seja, disposto em um eixo com direção Norte-Sul. Ao decorrer do dia existe uma inclinação dos módulos, girando sobre o eixo, com angulações de -60° até 60°, fazendo que acompanhe a trajetória do sol descrita na direção Leste-Oeste.

É mostrado na Figura 11 um comparativo da energia elétrica gerada para cada sistema.

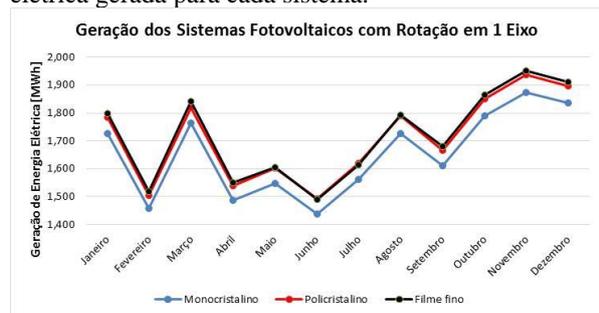


Figura 11 – Geração de energia dos FV 1 eixo.

### 6.3 Simulação do Sistema Solar Fotovoltaico com Rotação em 2 Eixos

Configuração idêntica aos anteriores sistemas, mas com a utilização de um sistema seguidor de dois eixos, os grupos de módulos ficaram dispostos com um ângulo de 10° em relação ao solo, podendo haver uma variação do ângulo de posicionamento dos módulos durante o dia, chegando até uma inclinação de 80°. A orientação dos módulos está voltada para o norte geográfico, ou seja, disposto em um eixo com direção Norte-Sul. Ao decorrer do dia existe uma rotação dos módulos acoplados ao eixo Norte-Sul, variando a angulação de -60° até 60°, fazendo assim com que acompanhe a trajetória do sol descrita na direção Leste-Oeste.

A Figura 12 mostra um comparativo da geração de energia elétrica para cada tipo de módulo usando seguidores de dois eixos.

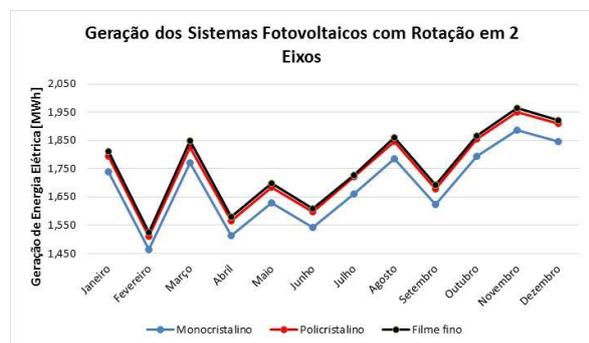


Figura 12 – Geração de energia dos FV 2 eixos.

### 6.4 Custos e Economia

Os custos empregados para cada sistema fotovoltaico com diferentes tipos de tecnologia de módulo e sistemas de rastreamento (vide Tabela 4) foram obtidos através de orçamentos feitos com empresas que fornecem toda a estrutura e instalação de sistemas FV “turn key”, bem como através de simulações de valores.

Tabela 4 – Custos Sistemas FV.

Preços dos Sistemas Fotovoltaicos			
Características do Sistema	Pot [kWp]	Tecnologia	Preço [R\$]
Sist. Fotovoltaico Fixo	9,45	Mono	58.204,96

(Mono)			
Sist. Fotovoltaico Fixo (Poli)	9,90	Poli	51.920,26
Sist. Fotovoltaico Fixo (Filme Fino)	9,90	Filme Fino	81.095,26
Sist. Fotovoltaico 1 Eixo (Mono)	9,45	Mono	81.486,94
Sist. Fotovoltaico 1 Eixo (Poli)	9,90	Poli	73.000,00
Sist. Fotovoltaico 1 Eixo (Filme Fino)	9,90	Filme Fino	113.533,36
Sist. Fotovoltaico 2 Eixos (Mono)	9,45	Mono	97.784,33
Sist. Fotovoltaico 2 Eixos (Poli)	9,90	Poli	87.600,00
Sist. Fotovoltaico 2 Eixos (Filme Fino)	9,90	Filme Fino	136.240,03

Adotando a tarifa de consumo de energia elétrica fora de ponta praticada pela concessionária Energisa em Sergipe no valor de R\$ 0,20737 e usando as médias das alíquotas federais de PIS, COFINS e a alíquota estadual de ICMS correspondentes a 23,03% mensal, foi possível a construção das Tabelas 5, 6 e 7, onde foram feitas as análises do tempo em que os sistemas apresentarão um retorno financeiro, ou seja, será expresso o ano em que os acúmulos das economias anuais irá superar o valor do custo para a implementação do sistema. Vale ressaltar que não estão sendo considerados eventuais reajustes da tarifa do consumo de energia elétrica, bem como inclusão das bandeiras tarifárias ao longo dos anos, além de depreciações nos rendimentos dos módulos fotovoltaicos e inversores utilizados.

Tabela 5 – Avaliação econômica sistemas FV fixos.

Sistema Fotovoltaico Fixo			
Tecnologia do Módulo	Mono	Poli	Filme Fino
Custo [R\$]	58.204,96	51.920,26	81.095,26
Economia por Ano [R\$]	4.237,96	3.607,90	4.358,66
Ano de Retorno	14º Ano	15º Ano	19º Ano
Economia Gerada no Ano de Retorno [R\$]	59.331,44	54.118,50	82.814,54

Tabela 6 – Avaliação econômica sistemas FV 1 eixo.

Sistema Fotovoltaico com Rotação em 1 Eixo			
Tecnologia do Módulo	Mono	Poli	Filme Fino
Custo [R\$]	81.486,94	73.000,00	113.533,36
Economia por Ano [R\$]	5.339,82	5.524,90	5.554,53
Ano de Retorno	16º Ano	14º Ano	21º Ano
Economia Gerada no Ano de Retorno [R\$]	85.437,12	77.348,60	116.645,13

Tabela 7 – Avaliação econômica sistemas FV 2 eixos.

Sistema Fotovoltaico com Rotação em 2 Eixo			
Tecnologia do Módulo	Mono	Poli	Filme Fino

<b>Custo [R\$]</b>	97.784,33	87.600,00	136.240,03
<b>Economia por Ano [R\$]</b>	5.458,89	5.642,36	5.687,35
<b>Ano de Retorno</b>	18º Ano	16º Ano	24º Ano
<b>Economia Gerada no Ano de Retorno [R\$]</b>	98.260,02	90.277,76	136.496,40

## 7 Resultados e Conclusões

Os sistemas simulados no PVsyst compararam a quantidade de energia elétrica gerada para três tipos de rastreamento (fixo, 1 eixo, 2 eixos) e tipos diferentes de módulos fotovoltaicos (mono, poli e filme fino), onde o valor de cada um dos sistemas foi estipulado através de orçamentos e simulações de custos de implementação. Através dos estudos realizados foi notório que houve um melhor retorno financeiro no espaço de um ano na utilização de um sistema fotovoltaico com rotação em 1 eixo e com a utilização de módulos fotovoltaicos policristalinos devido ao equilíbrio dos custos para implementação do sistema e da economia gerada ao longo dos meses.

Apesar do sistema com rotação em 1 eixo apresentar uma geração de energia elétrica um pouco inferior em relação ao sistema com rotação em 2 eixos, houve uma grande vantagem pelo fato do custo para implementação ser relativamente mais barato em comparação com o sistema de 2 eixos, aproximadamente 16,7%. Comparando a geração de energia elétrica do sistema com 1 eixo de rotação e o sistema fixo houve uma grande disparidade, ou seja, uma geração de 25,5% a mais de energia comparado ao sistema fixo.

A aplicação de um sistema fotovoltaico com 1 eixo de rotação, associados a utilização de módulos fotovoltaicos com tecnologia policristalina apresentará um melhor desempenho e uma melhor economia, se instalado em uma área com características semelhantes ao do IFS em Aracaju, onde apresenta um clima tropical úmido, com temperatura ambiente em torno de 25,6°C, períodos de chuvas entre março e julho e uma irradiação global anual média de 1.996,80 kWh/m<sup>2</sup>, com altos índices nos meses de outubro a janeiro. Além disso, esse sistema apresentou um melhor retorno financeiro se comparado aos outros sistemas simulados.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio econômico para implantação do sistema fotovoltaico base instalado no IFS, cujos dados foram utilizados na pesquisa.

### Bibliografia

AL-NAJJAR, H. Experimental Evaluation of the Performance of One-Axis Daily Tracking and Fixed PV Module in Baghdad, Iraq. *Journal of*

- Engineering*, V. 19, P. 1145-1157, 2013.
- AQUINO, E. Inclinações necessárias para as placas fotovoltaicas instaladas em alguns estados do Brasil. Online; Acessado em 21/01/2018. Disponível: <https://www.eduardoaquino.com.br/posicionamento-correto-do-painel-solar/>
- AXAOPoulos, P. J.; FYLLADITAKIS, E. D. Energy and economic comparative study of a tracking vs. A fixed photovoltaic system. *European Scientific Journal*, V. 09, P. 50-69, 2013.
- CLIMATE-DATA, Clima: Aracaju. 2018. Online; Acessado em 18/01/2018. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/location/2192>
- CORTEZ, R. J. M. Sistema de Seguimento Solar em Produção de Energia Fotovoltaica. 2013. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2013.
- CRESESB, Potencial solar – Sun data. 2016. Online; Acessado em 18/01/2018. Disponível: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>
- FERNANDES, A. A. Desenvolvimento de um rastreador de baixo custo para sistemas de energia fotovoltaicos. 2014. Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2014.
- KRUG, G.L.; LOPES, M.B. Desenvolvimento de um sistema de posicionamento automático para painel solar fotovoltaico através de sensores e estudo de eficiência. 2016. Dissertação (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – UTFPR, Paraná, 2016.
- MME. Energia Solar – Brasil e Mundo – Ano referência 2015. Online; Acessado em 21/01/2018. <http://www.mme.gov.br>
- PEREIRA, F. Guia de manutenção de instalações fotovoltaicas. 1.ed. Anduriña: Publindústrias Edições Técnicas, 2012.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: Cepel-Cresesb, 2014.
- SANTOS, M. A. Fontes de energia nova e renovável. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- Solar Choice. Solar Trackers. Online; Acessado em 21/01/2018. Disponível: <http://www.solarchoice.net.au/blog/solartrackers>
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. 1 ed. São Paulo: Érica, 2012.
- ZILLES, R. et al. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.