

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE TECNOLOGIAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM DIFERENTES MUNICÍPIOS BRASILEIROS

Catherine da Rosa Rossi – just.catherine@hotmail.com

Gelon de Freitas Leite – gelon@hotmail.com

Giuliano Arns Rampinelli – giuliano.rampinelli@ufsc.br

Curso de Engenharia de Energia

Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Araranguá

Resumo. O Brasil, com suas condições geológicas e climáticas muito favoráveis, possui um dos maiores e melhores potenciais energéticos do mundo, com grande utilização das fontes renováveis de energia, destacando-se entre elas a hidroeletricidade, a biomassa e a fotovoltaica. A cada dia novas pesquisas vêm apresentando diferentes tecnologias para utilização e aproveitamento da energia solar, fonte da tecnologia fotovoltaica citada anteriormente. Devido às diversas tecnologias de módulos fotovoltaicos presentes atualmente no mercado mundial, uma revisão teórica sobre o tema e uma simulação de sistemas de módulos fotovoltaicos utilizando diferentes tecnologias tornam-se essenciais. As simulações foram realizadas através do software System Advisor Model (SAM) e as análises do desempenho dos sistemas fotovoltaicos foram realizadas através de índices de desempenho. Os principais índices são fator de capacidade, produtividade anual do sistema e o desempenho global (performance ratio). O mesmo arranjo fotovoltaico foi utilizado em todas as simulações, nas quais envolveram diferentes tecnologias em três municípios brasileiros, Florianópolis, São Paulo e Recife, que foram escolhidos com o critério de maior abrangência das regiões do território nacional. As simulações forneceram dados mensais e anuais de cada sistema fotovoltaico, nos quais os índices de desempenho foram determinados e analisados. De modo geral, os sistemas fotovoltaicos simulados apresentaram excelentes índices de desempenho em todas as cidades e valores diferentes foram encontrados para cada tecnologia fotovoltaica analisada neste trabalho.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Módulos Fotovoltaicos, Tecnologia Fotovoltaica.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial, associado ao desenvolvimento tecnológico e industrial, acarretou em um grande aumento da demanda energética. Muitas das fontes de energia utilizadas atualmente têm volumes limitados e poderão se esgotar em algumas décadas. A sociedade está entrando em um período de redução de possibilidades energéticas, principalmente das originadas do petróleo, que é uma fonte de energia esgotável e não renovável; e outras fontes de energia, que substituirão as atuais, deverão ajustar-se às necessidades de utilizações para que não venham causar problemas ambientais (Marinoski, 2004). A energia solar fotovoltaica surge como uma alternativa promissora neste contexto, já que a radiação solar chega ao planeta Terra de forma abundante e pode ser considerada uma fonte inesgotável (Rüther, 2000).

O Brasil, com suas condições geológicas e climáticas muito favoráveis, possui um dos maiores e melhores potenciais energéticos do mundo. Além das reservas de combustíveis fósseis, a grande participação das fontes renováveis de energia, destacando-se entre elas a hidroeletricidade, a biomassa e, mais recentemente, a fotovoltaica, são abundantes para garantir a autossuficiência energética do país, considerada como uma das referências no uso de energias limpas (ANEEL, 2008). A cada dia novas pesquisas vêm apresentando diferentes tecnologias para utilização e aproveitamento desta fonte de energia, tornando sua aplicação uma realidade em muitos países, devido sua maior viabilidade econômica e ambiental, já que a tecnologia fotovoltaica pode ser considerada limpa (Fusano, 2013).

Este artigo tem como o objetivo realizar a simulação de diversas tecnologias de módulos fotovoltaicos em diferentes municípios brasileiros, utilizando o Software System Advisor Model (SAM) desenvolvido no Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL) dos Estados Unidos, comparando através de índices de mérito e analisando os resultados obtidos através das simulações com diferentes tecnologias aplicadas atualmente na geração de energia elétrica por meio da energia solar fotovoltaica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A presente revisão consiste primeiramente em uma abordagem sobre os conceitos e fenômenos elementares da geração de energia elétrica a partir da energia solar fotovoltaica, apresentando as células, os módulos e os sistemas fotovoltaicos. Também serão descritas as principais tecnologias fotovoltaicas utilizadas atualmente nesta geração, visando fornecer subsídios para as análises a serem realizadas posteriormente neste mesmo trabalho.

2.1 Características da radiação solar

A radiação solar é o recurso ou combustível necessário para o funcionamento dos módulos fotovoltaicos, os quais convertem esta energia proveniente do Sol em energia elétrica (Benedito, 2009). A disponibilidade desta radiação solar, também denominada de energia total incidente sobre a superfície terrestre, depende das condições atmosféricas (nebulosidade, umidade relativa do ar, etc), da latitude local e da posição no tempo, isto é, da hora do dia e dia do ano. Isso se deve à inclinação do eixo imaginário no qual a Terra gira diariamente, realizando o movimento de rotação, e à trajetória elíptica que a Terra descreve ao redor do Sol, realizando o movimento de translação (CRESESB, 2004).

Desta forma, a duração solar do dia varia em algumas regiões e períodos do ano, sendo as variações mais intensas nas regiões polares e nos períodos de solstício, e o inverso, isto é, menos intensa, ocorre próximo à linha do Equador e durante os equinócios. A maior parte do território brasileiro está localizada relativamente próxima da linha do Equador, de forma que não se observam grandes variações na duração solar do dia (ANEEL, 2008).

Como citado anteriormente, a radiação solar depende também das condições climáticas e atmosféricas, sendo que somente parte da radiação solar atinge a superfície terrestre, devido à reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera. Ainda assim, há a estimativa de que a energia solar incidente sobre a superfície terrestre seja da ordem de 10 mil vezes o consumo energético mundial (CRESESB, 2004). A irradiância média, também chamada de intensidade da radiação solar, que atinge a superfície da Terra ao meio dia, sem nuvens, é de aproximadamente 1000 W/m^2 , sendo este valor geralmente o utilizado como parâmetro para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos (Boyle, 2004).

A radiação solar pode atingir diretamente uma superfície absorvedora na Terra ou sofrer diversos efeitos antes que isso ocorra, devido a interações com gases atmosféricos e nuvens, além de reflexões no solo e objetos próximos, de forma que a radiação total que atinge a superfície absorvedora, também chamada de radiação global, seja a soma de três componentes: radiação direta, radiação difusa e albedo. A radiação direta consiste na radiação solar que percorre o caminho do Sol – superfície sem sofrer espalhamento ou reflexão. Já a radiação difusa consiste na porção que atinge a superfície absorvedora após ter sido espalhada pelos gases atmosféricos ou refletida pelas nuvens. Por fim, o albedo corresponde à componente da radiação que atinge o corpo absorvedor após ter sido refletida pelo solo e por outros objetos próximos (Benedito, 2009).

2.2 A célula e o efeito fotovoltaico

A célula fotovoltaica consiste na unidade básica para a transformação da radiação eletromagnética proveniente do Sol em energia elétrica, a qual é formada de semicondutores que produzem uma corrente elétrica quando expostos à luz, realizando a foto conversão (Seguel, 2009). Esta conversão direta da energia solar em energia elétrica, através do aparecimento de uma diferença de potencial, produzida pela absorção da luz, na extremidade de uma estrutura de material semicondutor, isto é, de uma célula fotovoltaica, é chamada de Efeito Fotovoltaico. Cada célula fotovoltaica consegue produzir apenas uma pequena potência elétrica quando ligada a uma carga consumidora, sendo necessário o agrupamento de células em série e em paralelo, formando um módulo fotovoltaico, a fim de produzirem uma tensão e uma corrente elétrica adequadas a uma determinada carga elétrica (Böhmer, 2006).

A utilização do efeito fotovoltaico para gerar eletricidade baseia-se na propriedade de semicondutores, que possuem uma banda de valência totalmente preenchida com elétrons e uma banda de condução totalmente vazia à temperaturas muito baixas, sendo o silício o elemento semicondutor mais utilizado atualmente. Quando os fótons da luz solar na faixa do espectro de radiação visível incidem sobre este material, excitam elétrons da banda de valência enviando-os à banda de condução, fazendo com que a energia presente nos fótons seja transferida para os átomos, liberando então estes elétrons com alta energia. Uma barreira consegue impedir que estes elétrons retornem a sua posição anterior, podendo direcioná-los para um circuito elétrico, gerando uma tensão e uma corrente elétrica (CRESESB, 2004).

Quando se adicionam impurezas nos elementos semicondutores, como o fósforo ou o boro, criam-se elementos, por exemplo, de silício com excesso, chamados de tipo N, ou com falta de elétrons, chamados de tipo P, sendo que esses elementos podem ser combinados em uma junção PN. A partir do momento em que os elétrons em excesso do lado N são excitados por fótons solares, eles atravessam a linha demarcatória formada na junção PN e são impedidos de retornar por uma barreira que se forma na junção. Com isso, os elétrons se acumulam do lado P, tornando-o um polo negativo, enquanto o lado N torna-se um polo positivo. Quando se interligam externamente os dois polos, através de um fio condutor, há passagem de uma corrente elétrica que tende a equilibrar os dois polos novamente. Se a incidência dos fótons solares sobre a superfície da célula é contínua, a corrente elétrica se manterá, transformando a célula em um gerador de eletricidade (Seguel, 2009).

2.3 Módulos fotovoltaicos

Os módulos FV também consistem em uma unidade básica, porém de todo o sistema, sendo um módulo composto por células fotovoltaicas conectadas em arranjos, produzindo desta forma tensão e corrente suficientes para a utilização da energia. Como já mencionado, é indispensável o agrupamento em módulos, já que uma célula fornece pouca energia elétrica, sendo que o número de células conectadas em módulo depende da tensão de utilização e corrente elétrica desejada. Porém, a utilização da célula isoladamente também apresenta outras desvantagens, já que a sua espessura é muito reduzida, necessitando de proteção contra esforços mecânicos e fatores ambientais (CRESESB, 2004).

Os módulos mais comuns são formados por células de mesmo tamanho compostas de silício cristalino, as quais são conectadas em série sobre uma placa de material plástico, recobertas com EVA e vidro temperado de elevada condução e alta resistência a impactos. O conjunto é ainda protegido por uma estrutura metálica, a qual garante rigidez contra danos decorrentes do manuseio do módulo. A garantia de um módulo composto de silício cristalino, fornecida por muitos fabricantes, é superior a 20 anos, tornando-se o equipamento mais confiável do sistema fotovoltaico (Benedito, 2009).

Os parâmetros ou características elétricas de um módulo precisam ser entendidos para que se possa selecionar o tipo de módulo apropriado para cada sistema de interesse. A potência dos módulos fotovoltaicos é dada pela potência de pico, porém, em certos casos, o que realmente importa é como um módulo pode carregar uma bateria mais rapidamente, sendo decidido pela corrente que o módulo pode gerar sob diferentes condições. A tensão de circuito aberto (V_{oc}), a corrente de curto-circuito (I_{sc}), a tensão de máxima potência (V_{mp}) e a corrente de máxima potência (I_{mp}), gerando a potência máxima (P_m), são outras características elétricas dos módulos fotovoltaicos. Dependendo da potência e tensão desejadas, os módulos também podem ser conectados em ligações em série e/ou em paralelo, assim como as células fotovoltaicas que os compõem. Porém, estas características elétricas podem ser afetadas por determinados fatores, tais como a intensidade luminosa, a temperatura das células, o sombreamento de células e a inclinação do módulo fotovoltaico, diminuindo assim a eficiência do sistema (CRESESB, 2004).

2.4 Tecnologias de módulos fotovoltaicos

A tecnologia fotovoltaica é considerada por muitos como um caminho ideal para a geração de energia, através de uma fonte inesgotável e não poluente, isto é, através do Sol. É um método de produção de energia sustentável e amigável ao meio ambiente, trazendo benefícios tanto ambientais quanto energéticos, já que há pouca ou quase nenhuma poluição na produção e utilização dos módulos fotovoltaicos. Desta forma, o mercado fotovoltaico vem crescendo a cada dia, sendo que, atualmente, existem diversas tecnologias de módulos fotovoltaicos baseadas em diferentes elementos (Salamoni, 2004).

Como já mencionado anteriormente, a conversão da energia solar em energia elétrica é obtida utilizando-se material semicondutor como elemento transformador, conhecido como célula fotovoltaica. Os semicondutores mais apropriados à conversão da luz solar são os mais sensíveis, ou melhor, aqueles que geram o maior produto corrente-tensão para a luz visível, já que a maior parcela de energia fornecida pelos raios do sol está dentro da faixa visível do espectro. Para que o material semicondutor se transforme realmente em uma célula fotovoltaica, ele deve passar por uma etapa de purificação e, em seguida, por uma etapa de dopagem, através da introdução de impurezas, dosadas na quantidade certa. Os principais tipos de células fotovoltaicas serão apresentados a seguir (CRESESB, 2004).

Em termos de aplicações terrestres, dentre os diversos semicondutores utilizados para a produção de células solares fotovoltaicas, destacam-se, por ordem decrescente de evolução tecnológica e utilização, o silício cristalino c-Si; o silício amorfo hidrogenado a-Si:H ou simplesmente a-Si; o Si do tipo HIT, o telureto de cádmio CdTe e os compostos relacionados ao disseleneto de cobre e índio CuInSe₂ ou CIS. O c-Si (multi ou monocristalino) é a tecnologia mais tradicional e a única dentre as já mencionadas que faz uso de lâminas cristalinas relativamente espessas, pois todas as outras tecnologias estão baseadas em películas delgadas (filmes finos) de material ativo semicondutor (Câmara, 2011). A tecnologia de filmes finos vem sendo cada vez mais utilizada, principalmente na integração com o entorno construído, por apresentar uma grande diversidade de modelos e também devido ao baixo custo de produção. Hoje, estão disponíveis no mercado painéis flexíveis, mais leves e resistentes, semitransparentes, ou até mesmo com superfícies curvas, que podem substituir elementos de revestimento na edificação (Marinoski, 2004).

Em termos de eficiência de conversão fotovoltaica, a tecnologia do c-Si é, entre as tecnologias utilizadas em aplicações terrestres, a que apresenta a maior eficiência, ao redor de 15% para módulos disponíveis no mercado. As tecnologias de filmes finos, sendo inerentemente menos eficientes e também por estarem ainda na infância de seu desenvolvimento, têm no momento um rendimento ao redor de 8% para módulos comerciais, o que significa que se necessita de aproximadamente o dobro da área em painéis solares de filmes finos para obter a mesma energia fornecida pelos módulos de c-Si (CRESESB, 2004).

O c-Si é a mais tradicional das tecnologias fotovoltaicas e ainda hoje apresenta maior escala de produção a nível comercial. O c-Si se consolidou no mercado fotovoltaico internacional por sua extrema robustez e confiabilidade. Entretanto, o custo de produção destes módulos fotovoltaicos é bastante elevado e as possibilidades de reduzi-lo são limitadas (Câmara, 2011). No caso do silício monocristalino (m-Si), as células são formadas em fatias de um único grande cristal, previamente crescido e fatiado. A grande experiência na sua fabricação e pureza do material garantem alta confiabilidade do produto e altas eficiências (CRESESB, 2004). Já as células de silício policristalino (mc-Si) são menos eficientes, mas também são mais baratas, já que a perfeição cristalina é menor que no caso do silício monocristalino e o processamento mais simples. Elas consistem de “wafers” de silício multicristalino tratado quimicamente, onde o material é solidificado em forma de um bloco composto de muitos pequenos cristais, do qual são obtidas fatias e fabricadas as células. O silício multicristalino é a tecnologia fotovoltaica mais tradicional, mas o fato de fazer uso de “wafers” representa uma maior limitação em termos de redução de custos de produção, tendo em vista a quantidade de material utilizado na fabricação das células (Câmara, 2011).

Um dos principais campos de investigação de tecnologias para produção de módulos fotovoltaicos é o de células de filmes finos, no qual se tem o objetivo de obter uma técnica através da qual seja possível produzir células fotovoltaicas confiáveis, utilizando pouco material semicondutor, obtido de forma passível de produção em larga escala,

resultando em custo mais baixo do produto e conseqüentemente da energia gerada. Estes estudos tem se dirigido a diferentes materiais semicondutores e técnicas de deposição destes em camadas finas com espessura muito pequena. Entre os materiais mais estudados estão o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), o disseleneto de cobre e índio (CIS) e o telureto de cádmio (CdTe) (CRESESB, 2004). A produção da tecnologia dos filmes finos difere significativamente da dos módulos de silício cristalino, além de ter uma eficiência consideravelmente menor, porém pode ser depositado diretamente sobre grandes superfícies e com uma variedade de substratos (Salamoni, 2004).

A tecnologia CdTe para módulos fotovoltaicos é a recente competidora das tecnologias c-Si e a-Si, estando comercialmente disponível para produtos há quase uma década, para aplicações em calculadoras. Estes módulos, também na forma de filmes finos, normalmente sob a forma de placas de vidro, apresentam um atrativo estético em comparação ao c-Si e as empresas envolvidas com esta tecnologia vêm buscando as aplicações arquitetônicas como um nicho de mercado enquanto desenvolvem seu produto, ampliam seus volumes de produção e reduzem custos. A relativamente baixa abundância dos elementos envolvidos e sua toxicidade são aspectos que têm de ser levados em conta, principalmente se esta tecnologia atingir quantidades significativas de produção. Além disso, os módulos solares encontrados no mercado internacional apresentam eficiência somente entre 7% e 9% (Salamoni, 2004).

Outra tecnologia de módulos fotovoltaicos consiste em células de compostos baseados no disseleneto de cobre e índio (CuInSe₂, ou simplesmente CIS), principalmente por seu potencial de atingir eficiências relativamente elevadas. As células de CIS de grandes áreas comercialmente disponíveis apresentam no momento eficiências em torno de 9% e 10% (Rüther, 2004). Assim como as tecnologias baseadas em a-Si e CdTe, apresentam uma excelente aparência estética, permitindo diversas aplicações arquitetônicas. Como no caso do CdTe, a pouca abundância dos elementos envolvidos e sua toxicidade são aspectos que têm de ser considerados (Salamoni, 2004).

Por último, a mais nova tecnologia de módulos fotovoltaicos disponível no mercado, desenvolvida pela empresa japonesa Sanyo é a tecnologia HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer), que utiliza avançadas técnicas de produção. A tecnologia é baseada em células cristalinas com camadas ultrafinas de silício amorfo, que apresenta os maiores percentuais de eficiência de conversão e até o momento, seus custos são maiores, se comparados com as outras tecnologias. Além disso, esta nova tecnologia, que combina a eficiência do silício cristalino com as características de temperatura do silício amorfo, pode prover uma potência 10% maior nas condições de altas temperaturas, além de oferecer um aumento de 36% na produção de energia anual se comparado com os módulos de silício cristalino para a mesma área de cobertura (Salamoni, 2004).

2.5 Sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos formam um conjunto de equipamentos cuja finalidade é converter a energia proveniente do Sol em energia elétrica e disponibilizá-la para uso instantâneo, ou armazená-la para uso posterior. Em geral, o armazenamento é feito em baterias recarregáveis e é aplicável apenas a pequenos sistemas, devido à capacidade limitada e ao elevado custo das baterias atualmente, sendo ainda necessário a utilização de um controlador de carga, cuja finalidade é proteger as baterias de sobrecargas e de descargas muito profundas, situações que diminuem a sua vida útil. Estes sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três categorias: sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas conectados à rede, sendo que a utilização e a complexidade de cada um dependerão da aplicação ou da disponibilidade dos recursos energéticos (Benedito, 2009).

Os sistemas não conectados à rede elétrica são chamados de sistemas autônomos, os quais podem ou não apresentar fontes de energia complementares à geração fotovoltaica. Porém, quando a configuração não se restringe à geração fotovoltaica, se têm os sistemas híbridos, combinando sistemas fotovoltaicos com, por exemplo, gerador diesel ou turbinas eólicas. Já quando o sistema é puramente fotovoltaico, então ele é chamado de sistema isolado. Os sistemas autônomos, isolados ou híbridos necessitam, em geral, de algum tipo de armazenamento, o qual pode ser em baterias quando se deseja utilizar aparelhos elétricos nos períodos em que não há geração fotovoltaica, ou em outras formas de energia. Por fim, os sistemas conectados à rede são aqueles em que a potência gerada pelo arranjo fotovoltaico é entregue à rede elétrica, sendo indispensável a utilização de um inversor, o qual deve satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que não degrade a qualidade do sistema no qual se interliga o arranjo fotovoltaico (CRESESB, 2004).

3. SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A presente pesquisa tem por finalidade verificar os potenciais de geração de energia elétrica de sistemas com diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos em diferentes municípios brasileiros, comparando as mesmas através de índices de méritos. As simulações foram feitas no software System Advisor Model (SAM), sendo os resultados analisados após as simulações. Os municípios brasileiros foram escolhidos aleatoriamente, porém com o propósito de abranger ao máximo diferentes regiões do país. Além disso, as tecnologias fotovoltaicas também foram escolhidas aleatoriamente, conforme a base de dados do software SAM disponibiliza atualmente.

3.1 Software System Advisor Model (SAM)

As simulações de sistemas com diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos foram realizadas com o auxílio do software System Advisor Model (SAM), o qual consiste em um modelo de desempenho potencial e financeiro destinado

a facilitar a tomada de decisão de pessoas envolvidas na indústria de energia renovável, que atuam tanto na área gerência de projetos, quanto na área de pesquisa acadêmica ou industrial. O SAM foi desenvolvido pela primeira vez em 2006 pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL), em conjunto com Sandia National Laboratories e em parceria com o Departamento de Energia dos EUA (DOE) do Programa de Tecnologias de Energia Solar.

Este software realiza previsões de desempenho de diferenciados sistemas, como de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de energia elétrica, sistemas concentradores de energia solar, sistemas de energia eólica, sistemas geradores de energia a partir de biomassa e sistemas de energia geotérmica. O SAM calcula a produção de um sistema total de energia elétrica em kWh para o primeiro ano, tudo com base em dados meteorológicos por hora para um determinado local, bem como as especificações físicas dos componentes do sistema gerador de energia elétrica, sendo que em seguida calcula a produção total para os anos seguintes com base em um fator de degradação anual. Há também a possibilidade de realização de previsões de custos, realizando toda a análise financeira com base no tipo de financiamento e incentivos fiscais aplicáveis ao sistema escolhido. Os resultados obtidos nas previsões são agrupados em gráficos e tabelas, os quais podem ser exportados para uso em relatórios ou trabalhos acadêmicos.

3.2 Arranjo fotovoltaico utilizado nas simulações no software SAM

Para a realização das simulações de diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos, é necessária a escolha dos municípios brasileiros e a determinação de um arranjo fotovoltaico padrão, o qual será utilizado em todas as análises. Os municípios brasileiros escolhidos para a realização das simulações foram Florianópolis, São Paulo e Recife. O município de Florianópolis, capital do estado de Santa Catarina, está localizado no sul do país nas coordenadas 27°35'49''S e 48°32'56''O e está no nível do mar, ou altitude de 0 m. Já o município de São Paulo, capital do estado de São Paulo, está localizado no sudeste do país nas coordenadas 23°32'52''S e 46°38'09''O e possui altitude de 760 m. Por fim, o município de Recife, capital do estado de Pernambuco, está localizado no nordeste do país nas coordenadas 08°03'14''S e 34°52'51'', possuindo altitude de 4 m. Estes municípios têm em comum a sua localização no litoral do Brasil, sendo todos banhados pelo oceano atlântico. Porém, este não foi o critério de seleção dos municípios, já que as suas localizações em diferentes regiões auxiliam na abrangência das simulações para todo o país, abrangendo as regiões sul, sudeste e nordeste, as quais possuem diferentes irradiações durante o ano, influenciando na quantidade de energia elétrica obtida através da conversão de energia solar nos módulos fotovoltaicos. A Tab.1 contém as irradiações médias globais anuais obtidas através do software SAM, as quais foram coletadas no plano inclinado igual à latitude dos municípios escolhidos para a realização das simulações. A irradiação média global de São Paulo, em particular, é menor que o esperado, mesmo estando em uma latitude maior que o município de Florianópolis, devido às características geográficas da serra onde se encontra e das características solarimétricas dos municípios de Florianópolis e Recife. Estes dados estão de acordo com o mapa da variação espacial da insolação no Brasil, produzido pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2009).

Tabela 1 – Irradiações médias dos municípios brasileiros selecionados

Municípios	Irradiação Média Global (kWh/m ²)
Florianópolis	1794
São Paulo	1608
Recife	1976

Optou-se nas simulações por um arranjo de módulos fotovoltaicos de 12 kWdc, e, com o objetivo de se comparar as diferentes tecnologias destes módulos, foi mantido o mesmo inversor em todas as simulações. O modelo escolhido foi o AP 12000, fabricado pela empresa AGEPOWER, cujas especificações técnicas estão contidas na Tab. 2.

Tabela 2 – Especificações técnicas do inversor AP 12000 utilizado no arranjo fotovoltaico

Características do Inversor	Valores
Tensão Nominal (Vn)	277 W
Máxima Potência (AC)	11620 W
Máxima Potência (DC)	12058 W
Tensão de Máxima Potência	600 V
Corrente de Máxima Potência	25 A
Tensão Nominal (DC)	422,68
Eficiência	95,77%
Parâmetros Elétricos	1000 W/m ² , 25°C, AM 1,5

O critério de direção dos módulos fotovoltaicos escolhido foi o norte, ou seja, com ângulo azimutal de 0°, e a inclinação considerada para os municípios escolhidos na realização das simulações foi idêntica à latitude para os municípios de Florianópolis e São Paulo, sendo que apenas em Recife foi considerado o ângulo de inclinação de 10°, já que, neste município em questão, este é o ângulo mínimo, não havendo sobreposição de sujeira nos módulos fotovoltaicos e conseqüente diminuição da eficiência de conversão de energia solar em elétrica.

Por último, as tecnologias dos módulos fotovoltaicos, utilizadas na realização das simulações, foram obtidas no software SAM, cujo critério de seleção foi a variedade de tecnologias e a adequação ao arranjo determinado para as simulações. A Tab. 3 contém as tecnologias, os modelos e outras características dos módulos fotovoltaicos simulados. As eficiências dos módulos fotovoltaicos variam entre 7 % e 18 % aproximadamente conforme a tecnologia. Uma vez que a potência nominal de cada sistema é da ordem de 10 kW_p, as áreas necessárias de cada sistema variam entre 60 m² e 150 m², aproximadamente. É importante destacar que estas diferenças têm impacto significativo no dimensionamento dos condutores e das instalações dos componentes do sistema. Além disso, em sistemas fotovoltaicos integrados em edificações, a área pode ser um fator decisivo na escolha da tecnologia fotovoltaica. Também deve ser lembrando que a tecnologia de silício cristalino é predominante no mercado, uma vez que é a tecnologia que apresenta o maior grau de maturidade e consequentemente, confiabilidade.

Tabela 3 – Tecnologia, modelo e outros dados dos módulos fotovoltaicos simulados

TECNOLOGIA	MODELO	EFICIÊNCIA (%)	ÁREA TOTAL (m ²)	POTÊNCIA NOMINAL (kW _p)
HIT-Si	VBHN21AA01B	17,28	62,40	10,77
Mono-c-Si	SDI LPC250SM-08	15,62	62,40	9,75
Multi-c-Si	SKA235P60-WN	14,44	68,30	9,87
3-a-Si	XRS18-150	7,06	148,70	10,50
CIGS	Powermax Strong 130	11,88	98,50	11,70

3.3 Simulações com diversas tecnologias fotovoltaicas em diferentes municípios brasileiros

A partir da seleção das tecnologias dos módulos fotovoltaicos e dos municípios, as simulações dos sistemas fotovoltaicos puderam ser realizadas através do software SAM, utilizando as ferramentas fornecidas no mesmo. O período considerado nas simulações foi de um ano, para que os resultados obtidos para a energia produzida mensalmente pudessem ser comparados entre as diferentes tecnologias, com o objetivo de chegar à tecnologia que produz mais energia elétrica a partir da energia solar durante este período. Na realização das simulações foi utilizado o mesmo arranjo para as diversas tecnologias selecionadas, montando um sistema no qual eram fornecidas as radiações, o tipo de tecnologia e suas respectivas características técnicas, realizando o mesmo procedimento para cada município selecionado, simulando as diferentes tecnologias e obtendo as produções mensais de energia elétrica. Os dados obtidos com as simulações, isto é, as produções mensais de energia gerada a partir de variadas tecnologias de módulos fotovoltaicos no arranjo determinado para as simulações, puderam ser exportados para o software Microsoft Office Excel, produzido pela empresa Microsoft, onde foram criados gráficos com os dados exportados para melhor visualização dos resultados. A produção mensal de energia gerada para o município de Florianópolis pode ser vista na Fig. 1.

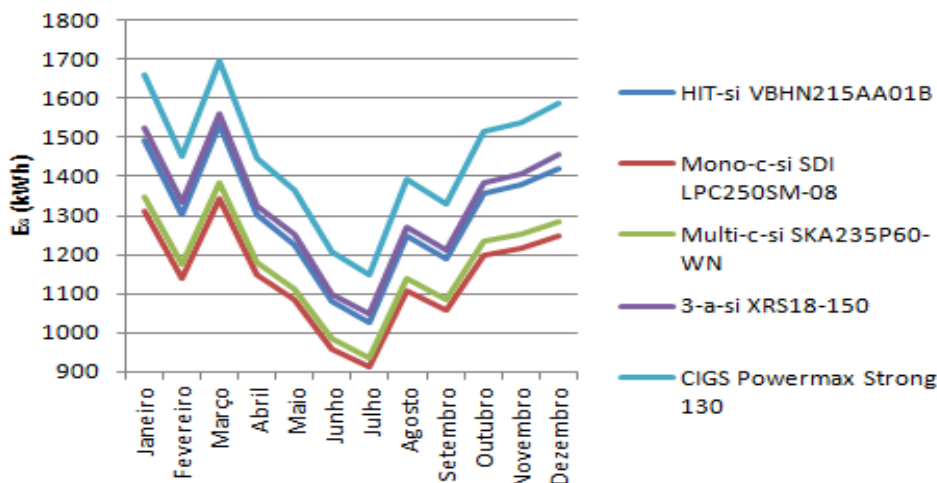


Figura 1 – Produção mensal (kWh) para o município de Florianópolis

Na Fig. 1 pode ser verificado que há variação da produtividade em relação às tecnologias de módulos fotovoltaicos na simulação para o município de Florianópolis, tendo maiores produtividades nos meses de verão, com valores mais elevados nos meses de março e abril. Além disso, a tecnologia que mais produz neste município é a CIGS, seguida da 3 a-Si. Já na Fig. 2, que apresenta a produção mensal de energia gerada para o município de São Paulo, as maiores produtividades podem ser verificadas no mês de janeiro, sendo que a tecnologia CIGS também possui maior produtividade neste município. Por fim, na Fig. 3, que apresenta a produção mensal de energia gerada para o município de Recife, pode ser visto que nos meses de outubro e março há as maiores produtividades ao longo do ano simulado,

sendo a tecnologia CIGS mais produtiva neste município. Foi confirmado desta forma que nos meses de verão há maior produtividade, sendo que nos dias mais ensolarados o desempenho é diminuído devido ao aumento de perdas em função da temperatura elevada dos módulos fotovoltaicos.

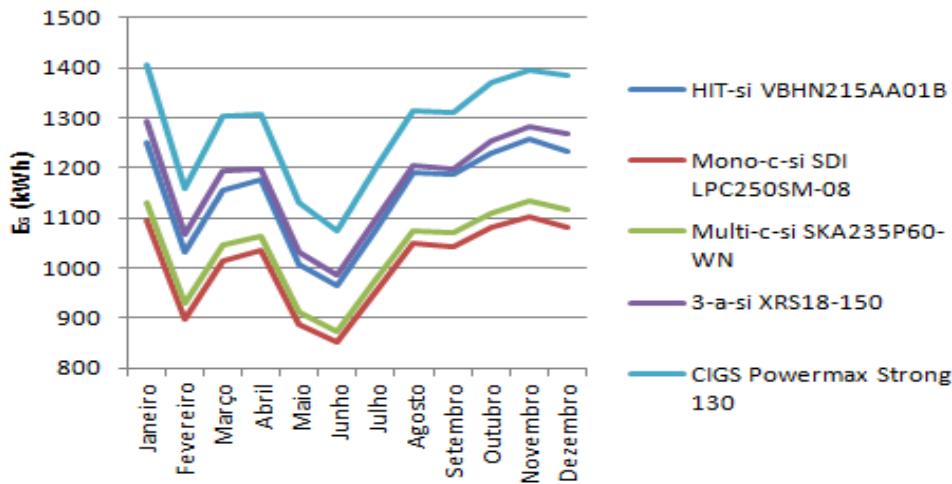


Figura 2 – Produção mensal (kWh) para o município de São Paulo

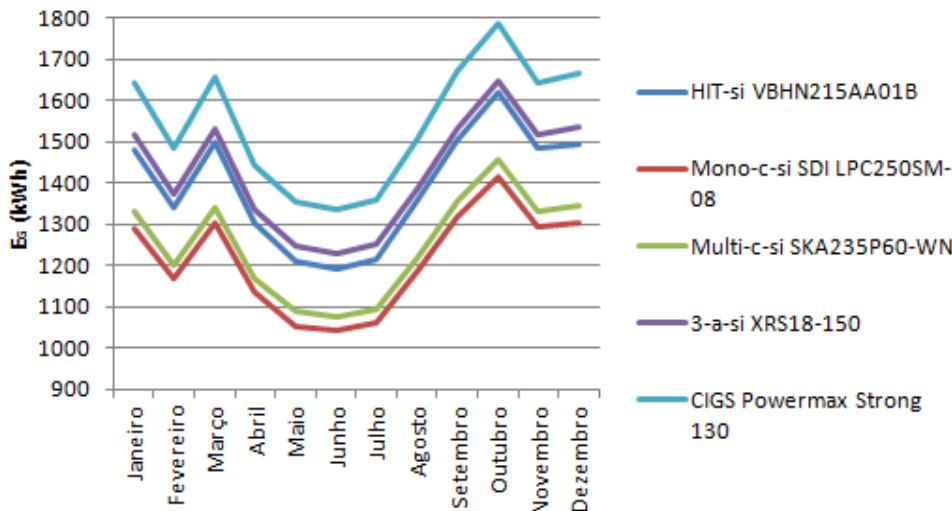


Figura 3 – Produção mensal (kWh) para o município de Recife

3.4 Análise de desempenho de sistemas fotovoltaicos simulados utilizando índices de mérito

Com o objetivo de comparar o desempenho de sistemas fotovoltaicos operando sob diferentes tecnologias fotovoltaicas e em diferentes municípios brasileiros, a engenharia de sistemas fotovoltaicos utiliza alguns indicadores de produtividade, conhecidos como índices de mérito, os quais permitem verificar se um determinado sistema fotovoltaico está produzindo energia de forma otimizada ou se deve ser reconfigurado para aproveitar ao máximo o recurso solar disponível. Os índices utilizados nas análises dos resultados são: fator de capacidade, produtividade anual de um sistema e desempenho global de um sistema (Benedito, 2009).

O fator de capacidade (FV), que representa a razão entre a energia de fato entregue pelo sistema, no período considerado, e a energia que ele entregaria se operasse 100% do tempo na sua potência nominal, pode ser definido de acordo com a Eq. (1).

$$FV = \frac{\int_0^T P(t)dt}{P_N \cdot T} \quad (1)$$

Já a produtividade anual (Y_F) representa o número de horas que o sistema deveria operar em sua potência nominal para produzir a mesma quantidade de energia entregue no período e corresponde à energia gerada, em kWh, por cada kWp de potência instalada, sendo expresso então em kWh/kWp ou também em horas, podendo ser definida pela Eq. (2):

$$Y_F = \frac{\int_0^T P(t)dt}{P_N} \quad (2)$$

Por último, o desempenho global (P_R) leva em contas as perdas ocorridas no processo de conversão da energia solar em eletricidade, representando a real capacidade do sistema em converter em corrente alternada a energia solar disponível no plano dos módulos, já que é a razão entre a energia entregue pelo sistema e a energia que esteve disponível no plano considerado. Este desempenho pode ser definido através da Eq. (3), onde H_t representa a irradiação no plano do arranjo, em kWh/m², e G_{ref} representa a irradiância nas condições padrão, 1 kW/m²:

$$P_R = \frac{Y_F(h)}{H_t / G_{ref}} \quad (3)$$

A partir das simulações realizadas, juntamente com a potência nominal dos sistemas simulados, os índices de mérito podem ser calculados, tendo assim a base para as análises dos desempenhos dos sistemas fotovoltaicos simulados com diferentes tecnologias. As irradiações no plano do arranjo, necessárias para o cálculo do índice de desempenho global, também foram obtidas através do software SAM. Desta forma, na Tab. 4, os valores dos índices de mérito de fator de capacidade, de produtividade anual e de desempenho global podem ser visualizados.

Tabela 4 – Índices de mérito dos sistemas simulados com diferentes tecnologias fotovoltaicas

Municípios	Índices de Mérito	HIT-Si	Mono-c-Si	Multi-c-Si	3-a-Si	CIGS
Florianópolis	FV	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17
	Y_F	1444,77	1407,44	1429,73	1511,86	1482,77
	P_R	0,81	0,78	0,80	0,84	0,83
São Paulo	FV	0,15	0,14	0,14	0,15	0,15
	Y_F	1276,85	1239,50	1260,46	1339,67	1311,66
	P_R	0,79	0,77	0,78	0,83	0,82
Recife	FV	0,18	0,17	0,17	0,19	0,18
	Y_F	1550,52	1494,22	1521,36	1629,02	1585,48
	P_R	0,78	0,76	0,77	0,82	0,80

A maioria dos valores obtidos do índice de fator de capacidade, segundo Benedito (2009), está dentro dos valores típicos, estando situados entre 13 e 18%. Os valores do fator de capacidade para o município de Recife são os mais elevados e, em especial para a tecnologia 3-a-Si, o índice ultrapassa o limite máximo da determinação, com 19% de capacidade de obtenção de energia elétrica. Já os menores valores se encontram no município de São Paulo, porém os mesmos ainda se encontram acima do limite mínimo determinado. Isso se deve ao fato de que o índice de fator de capacidade pode variar de acordo com a disponibilidade do recurso solar, da tecnologia e da forma de dimensionamento adotadas, fazendo com que os fatores variem tanto de acordo com os municípios selecionados, quanto nas diferentes tecnologias dos módulos fotovoltaicos.

No caso do índice de produtividade anual, que indica a energia gerada, observa-se que os valores não estão dentro dos valores típicos, conforme Fusano (2013), já que os valores estão demasiadamente elevados, com exceção do município de São Paulo, que possui os índices de produtividade anual dentro da determinação. Novamente o município de Recife possui os maiores valores, com destaque para a tecnologia 3-a-Si, que possui uma produtividade anual de 1629,02 kWh/kWp. Já os menores valores se encontram no município de São Paulo, com destaque para a tecnologia Mono-c-Si, com índice de produtividade anual de 1239,50 kWh/kWp. Isso se deve ao fato de que o município de São Paulo possui menor incidência solar ao longo do ano, fazendo com que as produtividades anuais sejam menores comparando aos outros municípios, como Recife, que possui a maior irradiação média global dos municípios selecionados para a realização das simulações. A Fig. 4 mostra a variação do índice de produtividade anual em relação às diferentes tecnologias para os municípios selecionados, na qual pode ser visto que São Paulo e Recife possuem os menores e maiores valores, respectivamente, de produtividade anual.

Finalmente, os índices de desempenho global obtidos demonstram a real capacidade do sistema em converter em corrente alternada a energia solar disponível no plano dos módulos, levando em conta as perdas. O município de Florianópolis apresentou os maiores valores de desempenho global, sendo que a tecnologia 3-a-Si teve destaque novamente por apresentar o maior valor desse índice de mérito, com 84%. Em contraste com os outros índices, o município de Recife possui os menores valores de desempenho global, com 76% para a tecnologia Mono-c-Si. A Fig. 5 mostra a variação do desempenho global conforme a tecnologia simulada para os municípios de Florianópolis, São Paulo e Recife, confirmando visualmente o alto desempenho global da tecnologia 3-a-Si e do município de Florianópolis em geral.

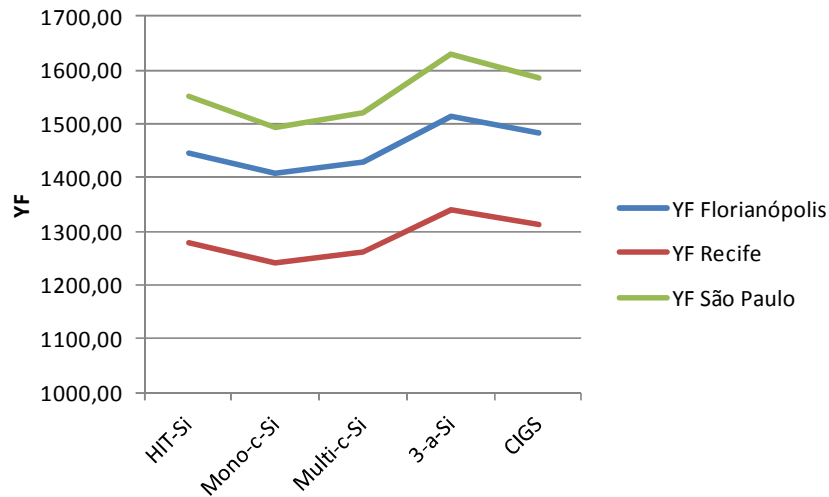


Figura 4 – Índice de produtividade anual dos municípios simulados com diferentes tecnologias fotovoltaicas

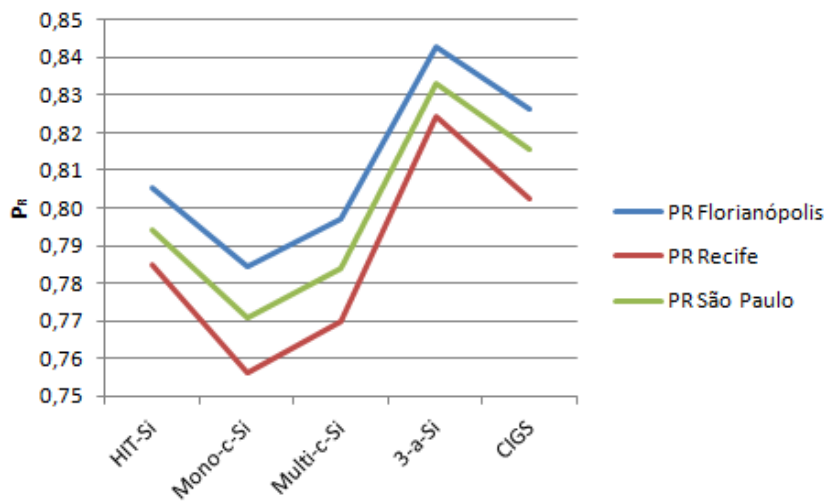


Figura 5 – Índice de desempenho global dos municípios simulados com diferentes tecnologias fotovoltaicas

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o presente trabalho foi possível verificar o desempenho de sistemas fotovoltaicos utilizando diferentes tecnologias de módulos, através das simulações em municípios brasileiros selecionados, obtendo resultados que demonstraram quais tecnologias e municípios convertem com mais eficiência a energia solar em energia elétrica. O desempenho dos sistemas pode ser verificado através dos índices de mérito, os quais variaram conforme a tecnologia e o município, já que estes dois fatores são determinantes na conversão fotovoltaica, devido, primeiramente, pela eficiência do módulo e, segundo, pela quantidade de radiação solar fornecida para esta conversão. Cabe ainda considerar que os valores obtidos para os índices de mérito foram obtidos das simulações realizadas para o presente trabalho, justificando a variação ou aumento demasiado de determinados índices.

A partir dos valores obtidos dos índices de mérito, foi verificado que o município de Recife possui o melhor desempenho em relação à capacidade de produção de energia elétrica e à produtividade anual, já que este município possui a maior radiação solar incidente dos municípios selecionados. Porém, em relação ao índice de desempenho global, se verificou que o município de Florianópolis possui o melhor desempenho, levando em consideração que o desempenho global é o índice mais útil já que considera as perdas ocorridas no processo de conversão de energia solar disponível no plano dos módulos fotovoltaicos em eletricidade. Com os índices de mérito também pode ser verificada a tecnologia fotovoltaica com maior desempenho, sendo que nos três índices utilizados, isto é, o fator de capacidade, a produtividade anual e o desempenho global, a tecnologia 3 a Si teve os valores mais elevados, mesmo em alguns deles ultrapassando os valores típicos. Esta tecnologia consiste em células de silício amorfo em formato de filmes finos, as quais possuem alta absorção de energia solar e são leves e flexíveis. Desta forma, esta tecnologia, que alcançou grande desempenho nas simulações, possibilita a integração das mesmas na arquitetura de casas e edifícios, aumentando as possibilidades de uso e consequente produção de energia elétrica a partir da energia solar. Além disso, esta tecnologia possui excelente resposta quando a radiação solar difusa é elevada, como no caso do município de Florianópolis, fazendo com que haja grande desempenho da tecnologia a-Si nesta localização, entretanto, estes módulos apresentam

eficiências menores implicando em áreas maiores e maior utilização e necessidade de fios, conexões e condutores.

De modo geral, pode-se verificar que os sistemas fotovoltaicos simulados resultaram em produções anuais significativas de energia elétrica, além de apontar o município e a tecnologia com maiores desempenhos no processo de conversão de energia solar em eletricidade. Entretanto estes resultados apenas consideram o desempenho das tecnologias, mas sem considerar outras variáveis importantes e que devem ser observados no momento de projeto e dimensionamento de um sistema. Além disso, a variação dos valores simulados pode ter sido consequência de que a potência nominal do módulo informada pelo fabricante pode não corresponder ao seu valor real ou o rendimento do inversor ser inferior ao informado. Por fim, a área disponível para a instalação dos sistemas simulados também deve ser considerada, além do município e tecnologia com maiores desempenhos, já que algumas tecnologias necessitam de maior quantidade de módulos fotovoltaicos, aumentando assim a área do arranjo fotovoltaico para produção de energia elétrica a partir da energia solar.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil), 2008.
- Benedito, R. S. Caracterização da Geração Distribuída de Eletricidade por meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, no Brasil, sob os Aspectos Técnico, Econômico e Regulatório. 2009. 110f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Energia.
- Böhmer, C. R. K. Otimização da Inclinação de Módulos Fotovoltaicos em Função da Radiação Solar Incidente na Região de Pelotas, RS. 2006. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal de Pelotas, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia.
- Boyle, G. Renewable Energy, 2nd edition. Oxford, UK: Oxford University Press & The Open University, 2004.
- Câmara, C. F. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica. 2011. 68f. Monografia (Especialista em Formas Alternativas de Energia). Universidade Federal de Lavras, Pós-Graduação Lato Sensu em Formas Alternativas de Energia.
- CRESESB. Centro de Pesquisas de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, CRESESB, 2004.
- Fusano, R. H. Análise dos Índices de Mérito do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede do Escritório Verde da UTFPR. 2013. 94f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso de Engenharia Industrial Elétrica.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia, 2009. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 15 de Fevereiro de 2014.
- Marinoski, D. L., Salamoni, I. T., Rütther, R., 2004. Pré-Dimensionamento de Sistema Solar Fotovoltaico: Estudo de Caso do Edifício Sede do CREA-SC. I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, São Paulo.
- Rütther, R. Edifícios Solares Fotovoltaicos: o Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil. Florianópolis: UFSC/LABSOLAR, 2004.
- Salamoni, I. T. Metodologia para Cálculo de Geração Fotovoltaica em Áreas Urbanas Aplicada a Florianópolis e Belo Horizonte. 2004. 155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- SAM. System Advisor Model (SAM 2013.9.20). National Renewable Laboratory, 2006. Disponível em: <<https://sam.nrel.gov/content/downloads>>. Acesso em: 6 de Novembro de 2013.
- Seguel, J. I. L. Projeto de um Sistema Fotovoltaico Autônomo de Suprimento de Energia usando Técnica MPPT e Controle Digital. 2009. 222f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

SIMULATION AND PERFORMANCE ANALYSIS OF TECHNOLOGIES OF PHOTOVOLTAIC MODULES IN DIFFERENT CITIES FROM BRAZIL

Abstract. Brazil has very favorable geological and climatic conditions and has one of the largest and best energy potential in the world. The matrix has a significant share of renewable energy sources, notably including hydroelectricity and biomass. Every day new studies are showing different technologies to use and utilization of solar energy. Due to many of PV modules present technologies currently on the world market, a theoretical review on the subject and a simulation of photovoltaic systems using different technologies become essential. The simulations were performed using the System Advisor Model (SAM) software and analyzes the performance of PV systems were implemented through performance indexes. The main indexes are the capacity factor, annual productivity and performance ratio. The same PV array was used in all simulations in which different technologies involved in three cities. The simulations provided monthly and annual data from each PV system. The performance indexes were determined and analyzed. In general, the simulated PV systems showed excellent performance levels in all cities and different values were found for each PV technology analyzed in this paper.

Key words: Photovoltaic Solar Energy, Photovoltaic Modules, Technology Photovoltaic.