

# AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO AZIMUTAL E DA INCLINAÇÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

**Maurício Darabas Ronçani** – mauriciodarabas@hotmail.com  
**Lucas Parmigiani Zanchetta** – lucaspzanchetta@hotmail.com  
**Giuliano Arns Rampinelli** – giuliano.rampinelli@ufsc.br  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá

**Resumo.** *Existem diversas tecnologias disponíveis no mercado para a geração de energia elétrica assistida por energia solar fotovoltaica, sendo as de silício cristalino as de maior utilização. A integração dos sistemas fotovoltaicos em edificações começa a ter participação significativa no cenário mundial, especialmente pelos diversos benefícios como a geração distribuída, ou seja, há redução nas perdas de transporte e distribuição de energia que são proporcionadas por essa tecnologia. O presente trabalho trata sobre as influências do ângulo azimutal e da inclinação dos painéis fotovoltaicos integrados a edificações na localidade de Florianópolis – SC. O sistema fotovoltaico estudado é composto por 24 módulos de 225 W e eficiência de 15,06 %, dispostos em 2 strings em paralelo de 12 painéis. A partir de simulações realizadas no software System Advisor Model obteve-se a orientação azimutal ótima e a inclinação do módulo ótima para a geração de energia elétrica. As perdas anuais podem chegar a 18,1% para o ângulo azimutal e 6,3% para a inclinação, assim, sistemas deslocados da posição ideal tem uma perda considerável principalmente no que diz respeito ao azimute.*

**Palavras-chave:** *Energia Solar Fotovoltaica, Ângulo Azimutal, Inclinação, Edificação*

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, 86,7% da matriz energética mundial provêm de fontes de energia não renováveis (IEA, 2013). Sabendo-se que em um horizonte de algumas décadas estas poderão ser esgotadas, esforços vêm sendo realizados na busca de novas alternativas para a geração de energia a um nível sustentável. Uma das tecnologias renováveis mais recentes e que se encontra em grande expansão no mercado é a energia solar fotovoltaica. Os sistemas fotovoltaicos podem ser instalados em grandes centrais, em áreas com amplo espaço, ou em pequenas centrais, normalmente no meio urbano. Nas grandes centrais, como há uma vasta área sem obstáculos, a disposição dos painéis fotovoltaicos é feita de forma a evitar sombreamentos e maximizar a geração de energia elétrica ao longo do ano. No entanto, em instalações urbanas, como o espaço é restrito e normalmente há obstáculos, as instalações muitas vezes são feitas de forma integrada às edificações, estando sujeitas, portanto, a arquitetura das mesmas.

A integração de sistemas fotovoltaicos às edificações pode ser vista como uma estratégia para o aumento da eficiência energética das mesmas. Esta alternativa também é interessante, na perspectiva de que elimina as perdas por transmissão e distribuição da produção centralizada convencional. Contudo, ao contrário das grandes centrais fotovoltaicas, a integração aos edifícios apresenta algumas condicionantes, nomeadamente, no que diz respeito à orientação dos edifícios e da sua envolvente urbana. (Pereira, 2009).

Além do possível sombreamento causado pela envoltória urbana, o posicionamento do módulo fotovoltaico é também afetado pela arquitetura da edificação. Dessa maneira, torna-se necessário desenvolver ferramentas capazes de estudar o potencial do recurso solar, de modo a fundamentar as decisões de uma possível integração fotovoltaica em uma determinada região (Pereira, 2009). Baseado nesses fatores, este trabalho tem por objetivo avaliar a influência que o ângulo azimutal e a inclinação do módulo fotovoltaico exercem sobre a geração de energia elétrica do mesmo, nos períodos de verão, inverno, e ao longo de todo o ano, na cidade de Florianópolis, Santa Catarina.

## 2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Neste item serão abordadas de forma breve as diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos disponíveis comercialmente destacando sua participação no mercado e a integração dos sistemas fotovoltaicos às edificações.

### 2.1 Tecnologias dos módulos fotovoltaicos

Existem diversas tecnologias disponíveis no mercado para a geração de energia elétrica assistida por energia solar fotovoltaica, sendo essas divididas em três gerações: a primeira geração, como módulos de silício, a segunda geração, composta por filmes finos e a terceira geração e mais recente, de células solares sensibilizadas por corante

(Zomer, 2010), porém neste artigo serão apresentados apenas as de silício amorfo (a-Si) e silício multicristalino (mc Si). O módulo de tecnologia de silício cristalino tem uma barreira econômica e este ainda é o principal obstáculo na difusão desta tecnologia (Green, 2004). Apesar disso, o módulo possui elevada eficiência, em torno de 10 a 16 %.

Os módulos de a-Si são incluídos na tecnologia de filmes finos pela pequena quantidade de material em sua produção, aproximados 1 $\mu$ m de espessura que são depositados sobre vidro, aço ou plástico, dando origem aos módulos fotovoltaicos que podem ser flexíveis, semitransparentes e leves. Este tipo de painel tem sua utilização facilitada devido à adaptabilidade ao projeto arquitetônico da edificação, boa resposta sob a radiação difusa e iluminação artificial, porém seu rendimento é de cerca de 7%. Outro fator relevante é que a temperatura do painel não reduz a eficiência (Rüther, 2004). A tecnologia de silício multicristalino é a mais utilizada na produção de módulos fotovoltaicos e possuem eficiência média de 13% com espessura entre 200 e 300 $\mu$ m de material semiconductor de silício depositado sobre uma estrutura rígida. Por se tratar de uma tecnologia bastante desenvolvida, encontram-se barreiras tecnológicas para aumentar o rendimento desta tecnologia. A Fig. 1 apresenta a evolução da participação das diferentes tecnologias fotovoltaicas nas últimas décadas e a produção por tecnologia em 2012 (ISE Fraunhofer, 2013). As tecnologias apresentadas são silício monocristalino (Mono-Si), silício multicristalino (Multi-Si), silício em cinta (Ribbon-Si) e filmes finos (Thin film).

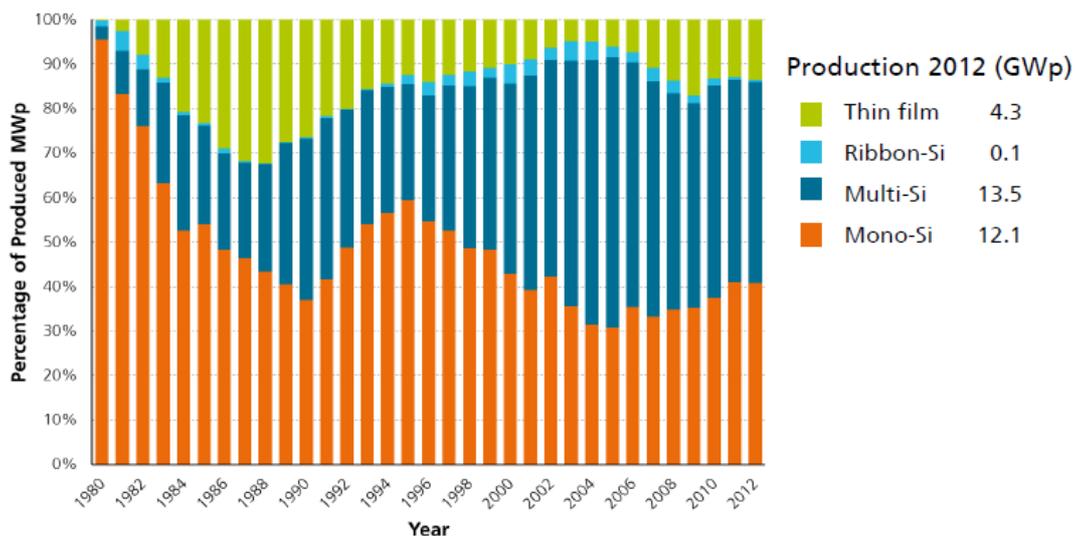


Figura 1 – Participação na produção de módulos por tecnologia (ISE Fraunhofer, 2013).

## 2.2 Integração dos Sistemas fotovoltaicos às edificações

A energia solar fotovoltaica é uma alternativa promissora para a geração de energia elétrica. A inserção de painéis fotovoltaicos nas edificações resulta em uma geração mais próxima aos pontos de consumo (geração distribuída), desta forma há uma redução nas perdas de transporte e distribuição de energia. Para esta tecnologia de painéis integrados a edifícios têm-se a vantagem de não ocupação de áreas físicas extras, visto que o sistema substitui ou se sobrepõe a materiais de cobertura e/ou revestimento. Os painéis fotovoltaicos são apropriados para a integração com a edificação, esses são fabricados para serem utilizados por muito tempo em ambientes externos (Salamoni e Rüther, 2004).

Um sistema fotovoltaico integrado a edificação e conectado a rede elétrica necessita de vários dispositivos, sendo eles os painéis solares, sistema de fixação ao envoltório da construção, inversor, diodos de bypass, fusíveis, cabos elétricos, diodos de bloqueio e proteções contra sobretensões e descargas atmosféricas (Rüther, 2004). Os sistemas FV podem ser integrados em edifícios já construídos, chamados de *building mounted*. Hoje em dia a maior parte dos sistemas fotovoltaicos é instalada nos edifícios, porém em questões econômicas esses sistemas são mais dispendiosos (Wolter, 2009). Além disso, em muitos casos, o sistema fotovoltaico inserido a edificação não consegue obter o máximo desempenho devido à inclinação do telhado e também da posição da edificação com relação ao ângulo azimutal.

Um sistema fotovoltaico integrado a edificação possui algumas limitações, sejam elas de natureza meteorológica ou de natureza técnica. A orientação de uma superfície resulta em sombreamentos naturais devido à trajetória do Sol, sem considerar sombreamentos provocados por outros tipos de obstáculos. Em determinados períodos do dia estes sombreamentos resultam numa diminuição da produção fotovoltaica (Pereira, 2009). Portanto, a localização geográfica tem relevante importância, pois quanto maior a disponibilidade de radiação solar maior será seu potencial e viabilidade (Eiffert e Kiss, 2000). A forma geométrica e a inclinação da terra fazem com que o sol incida em cada local de forma distinta, devido a isso a melhor captação do nível de insolação incidente em uma localidade será melhor quanto mais próximo à linha do equador for, pois faz com que não haja uma grande variação da duração de horas de brilho solar, essa incidência de luz também dependerá da latitude local e do instante de tempo (dia do ano e horário do dia) (Green, 2004). Assim, os coletores devem ser orientados de forma que o ângulo formado entre a normal ao plano do coletor e o feixe de radiação direta seja nulo (Messenger e Ventre, 2005).

### 3. METODOLOGIA

Nesse item será descrito o software utilizado, os equipamentos escolhidos e o procedimento de simulação realizado. O software utilizado foi o *System Advisor Model* (SAM), o qual dispõe das funções de custo e desempenho de projetos de energias renováveis utilizando modelos computacionais desenvolvidos pelo NREL, *Sandia National Laboratories*, da Universidade de Wisconsin, e outras organizações. Os modelos requerem dados de entrada para descrever as características de equipamentos físicos de desempenho dos custos do sistema e do projeto. A interface para o usuário do SAM possibilita que pessoas sem experiência no desenvolvimento de modelos computacionais possam construir um modelo de um projeto de energia renovável, e fazer projeções de custos e de desempenho com base em resultados do modelo.

Para descrever as condições climáticas do local de projeto, o programa SAM requer um arquivo de dados meteorológicos. Ademais, SAM inclui várias bibliotecas de dados de desempenho e coeficientes que descrevem as características dos componentes do sistema, tais como módulos fotovoltaicos e inversores, receptores parabólicos e coletores, turbinas eólicas e sistemas de combustão. Para esses componentes, basta escolher em uma lista, e SAM aplica os valores da biblioteca para as variáveis de entrada.

Os dispositivos foram selecionados para que houvesse uma melhor conjuntura entre eles. Deve-se saber que as simulações foram realizadas com as características dos módulos nas condições de referência (irradiação de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura da célula em  $25^\circ\text{C}$ ). O módulo escolhido foi o Zhejiang Wanxiang Solar WXS225P de fabricante chinês, possui eficiência de 15,06 % e máxima potência de  $225 \text{ W}_{\text{CC}}$ . A Fig. 2 apresenta a curva  $I-V$  do módulo fotovoltaico selecionado.

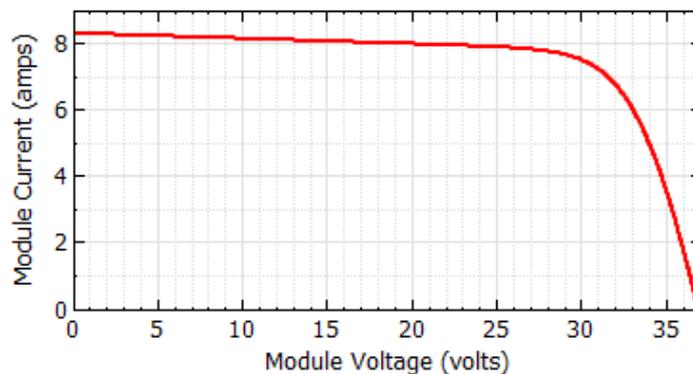


Figura 2 – Módulo fotovoltaico Zhejiang Wanxiang Solar WXS225P (Fonte: *System Advisor Model*).

O inversor utilizado foi o Alerex Electronics Co., Ltd.: ES 5000-US-240 ( $240 \text{ V}_{\text{CA}}$ ) da empresa *Sandia Inverters*. Este dispositivo dispõe de uma eficiência máxima de 95,6% e máxima potência de  $5496 \text{ W}_{\text{CC}}$ . A Fig. 3 representa a curva de eficiência em função da potência relativa de saída.

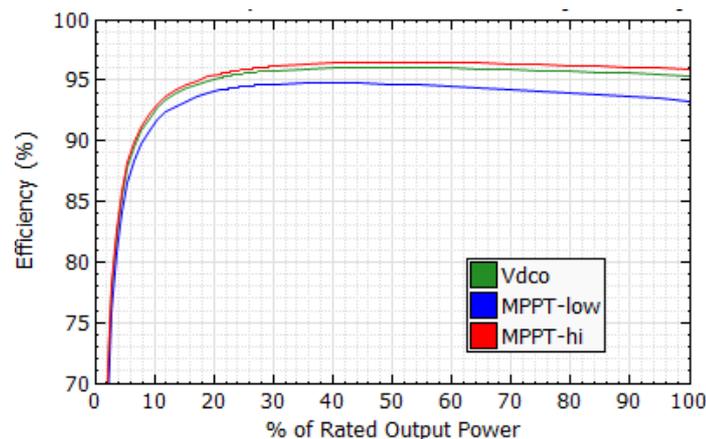


Figura 3 – Inversor Alerex Electronics Co., Ltd.: ES 5000-US-240 (Fonte: *System Advisor Model*).

Para a melhor conjuntura dos módulos com o inversor foi eleita a configuração com dois *strings* em paralelo e cada uma composta por 12 módulos fotovoltaicos, totalizando 24 módulos. Essa configuração resultou em um sistema de  $5400 \text{ W}_{\text{CC}}$ . Visando aperfeiçoar o desempenho e analisar as perdas de um sistema fotovoltaico em edificações, foram realizadas simulações onde o ângulo azimutal e a inclinação da placa eram as únicas variáveis. A cidade escolhida foi a de Florianópolis, localizada em Santa Catarina (SC) na latitude de  $-27,7^\circ$  e longitude de  $-48,5^\circ$ . Para essa localidade,

foram avaliados ângulos azimutais entre  $-90^\circ$  e  $+90^\circ$ , com intervalos de  $15^\circ$ , mantendo a inclinação do módulo constante em  $30^\circ$ . Foram avaliadas também inclinações entre  $10^\circ$  e  $50^\circ$ , com intervalos de  $5^\circ$ , mantendo o azimute constante em  $0^\circ$ .

#### 4. RESULTADOS

A Fig. 4 apresenta a variação mensal da geração de energia elétrica para inclinações do módulo fotovoltaico de  $10^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $50^\circ$ , ambas com o azimute constante em  $0^\circ$ . Pode-se observar que nos meses de verão o aumento na inclinação resultou em uma redução na geração de energia, enquanto que nos meses de inverno ocorreu o contrário. Isso aconteceu porque no inverno o ângulo solar é menor que no verão e, portanto, uma maior inclinação do módulo faz com que os raios solares atinjam o mesmo de forma mais perpendicular. No verão, como o ângulo solar é maior, para que os raios solares incidam mais perpendicularmente sobre o módulo, é necessário que o mesmo esteja com uma menor inclinação. No mês de dezembro, a geração de energia com o módulo inclinado em  $50^\circ$  é 28 % inferior à geração com inclinação de  $10^\circ$ . Por outro lado, no mês de junho, a geração com o módulo inclinado em  $50^\circ$  é 34,5 % superior à geração com inclinação de  $10^\circ$ .

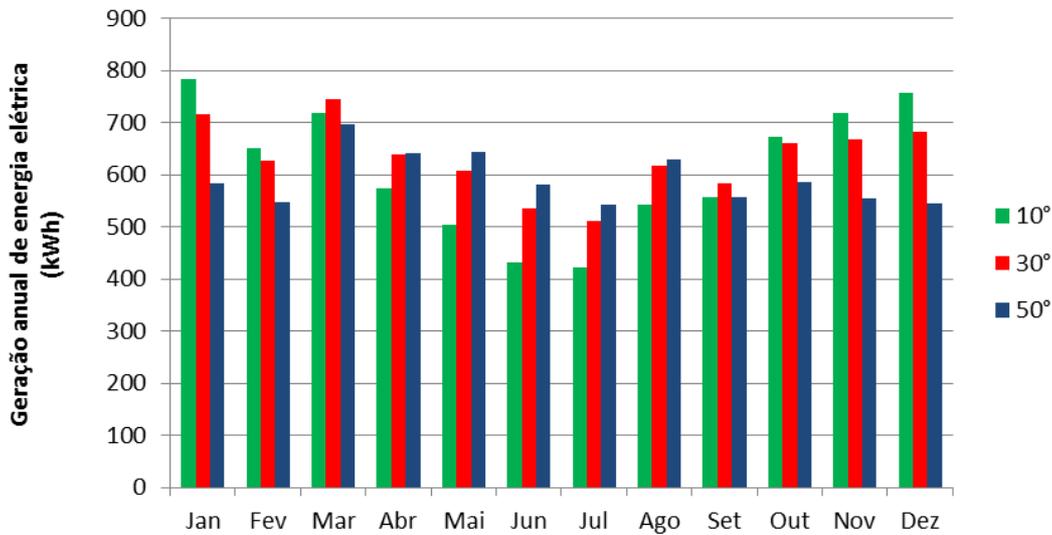


Figura 4 – Variação mensal da geração de energia elétrica para diferentes inclinações

A Fig. 5 apresenta a influência da inclinação na geração anual de energia elétrica. Pode-se observar que a inclinação que maximizou a geração de energia elétrica ao longo do ano foi de  $25^\circ$ . Conforme a inclinação se afastou desse valor, tanto para mais quanto para menos, a geração diminuiu. Com inclinação de  $50^\circ$ , a geração anual de energia elétrica foi 6,4 % inferior à geração com o módulo a  $25^\circ$ .

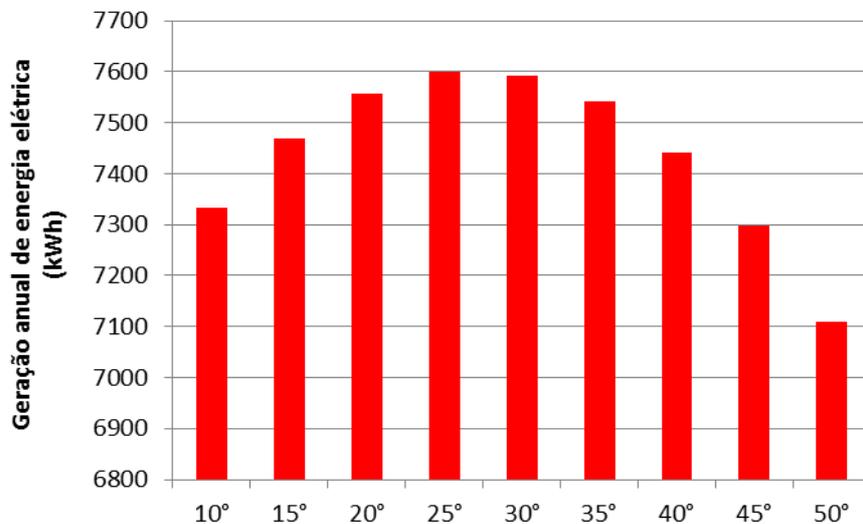


Figura 5 – Influência da inclinação do módulo fotovoltaico na geração anual de energia elétrica

A Fig. 6 apresenta a geração mensal de energia elétrica para ângulos azimutais de 0°, 45° e 90°, ambas com a inclinação do módulo em 30°. Pode-se observar que nos meses de verão a variação do ângulo azimutal praticamente não influencia a geração de energia. No entanto, nos meses de inverno, quanto mais o azimute se afasta de 0°, maior é a redução na geração de energia. No mês de junho, por exemplo, a geração com azimute 90° é 36,3 % inferior à geração com azimute 0°.

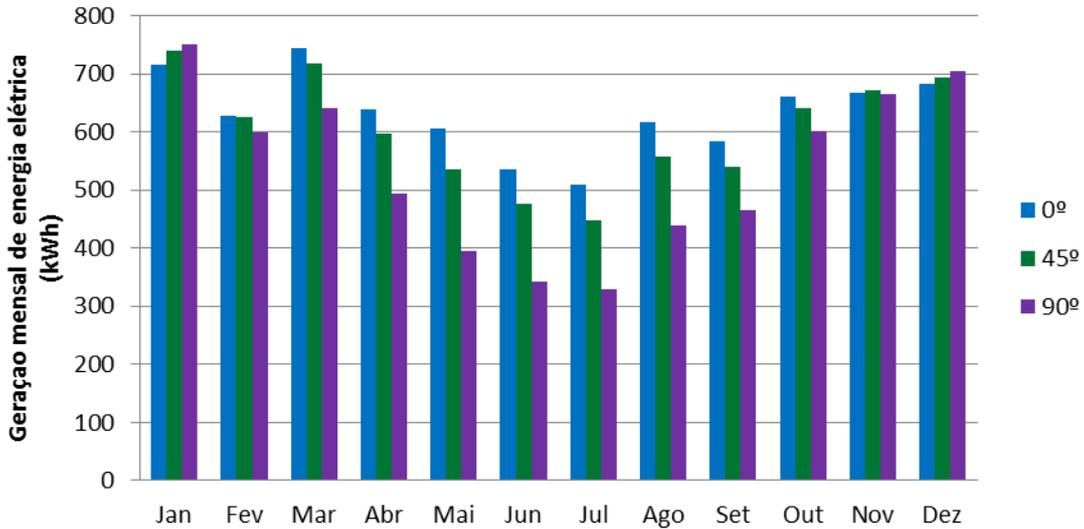


Figura 6 – Variação mensal da geração de energia elétrica para diferentes ângulos azimutais

A Fig. 7 ilustra a geração anual de energia elétrica para azimutes variando de -90° a +90°. Pode-se perceber que o ângulo azimutal que maximiza a geração de energia elétrica ao longo do ano é 0°. Pode-se notar também que a redução na geração, quando o azimute se afasta de 0°, tanto para leste quanto para oeste, é simétrica. Com azimute de 90°, a geração anual de energia é 18,1 % inferior à geração com ângulo azimutal de 0°.

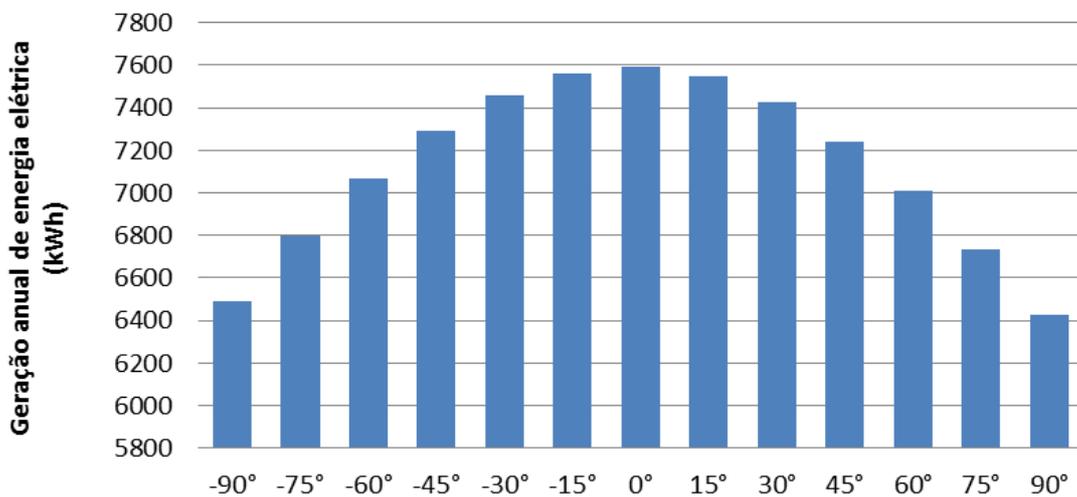


Figura 7 – Influência do ângulo azimutal na geração anual de energia elétrica

## 5. CONCLUSÃO

A análise dos resultados permitiu concluir que o ângulo azimutal e a inclinação do módulo fotovoltaico exercem influência considerável na geração de energia elétrica.

Observou-se que inclinações inferiores à latitude do local maximizam a geração de energia elétrica no verão e reduzem a geração no inverno, enquanto que inclinações superiores à latitude maximizam a geração no inverno e minimizam a mesma no verão. Dessa forma, analisando a geração ao longo de todo o ano, percebe-se que as perdas na geração em uma estação do ano são quase compensadas pelo ganho na outra estação, resultando em diferenças inferiores a 7 %.

Observou-se também que a variação do ângulo azimutal apresentou diferenças quase insignificantes na geração durante os meses de verão, mas apresentou diferenças bastante significativas nos meses de inverno. Assim sendo, uma análise levando em conta a geração durante todo o ano, permite destacar uma redução de quase 20 % quando o azimute é de 90°, em relação ao azimute ideal, que é 0°.

Por fim, conclui-se que quando há interesse em instalar sistemas fotovoltaicos integrados em uma edificação, e a arquitetura desta ou os obstáculos no seu envoltório não permitem que os módulos sejam instalados na posição ideal para a região, haverá perdas na geração. Mas, de modo geral, essas perdas não inviabilizam absolutamente a instalação do sistema, principalmente por que na maioria das instalações, além da geração de energia, objetiva-se também diferenciar a estética da edificação com a instalação desses módulos.

## REFERÊNCIAS

- Eiffert, P.; Kiss, G. Building-Integrated Photovoltaic Designs for Commercial and Institutional Structures. National Renewable Energy Laboratory, Fevereiro de 2000.
- GREENPRO. Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação. Manual desenvolvido no projeto GREENPRO entre Fevereiro de 2002 e Janeiro de 2004.
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Key World Energy Statistics 2013. Disponível em: [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2013\\_FINAL\\_WEB.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2013_FINAL_WEB.pdf). Acesso em: 19 nov. 2013.
- ISE Fraunhofer – Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. Photovoltaic Report. Freiburg, 2013.
- Messenger, R.; Ventre, J. Photovoltaic Systems Engineering. 2. ed. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2005. 435 p.
- Pereira, M. F. C. Estimativa da Produção de Sistemas Fotovoltaicos Integrados em Edifícios, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009. 119p.
- Rüther, 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.
- SAM – System Advisor Model (SAM 2013.9.20). National Renewable Energy Laboratory, 2013. Disponível em: <https://sam.nrel.gov/content/downloads>.
- Salamoni, I.; Ruther, R. O Potencial dos Sistemas Fotovoltaicos Integrados à Edificação e Interligados à Rede Elétrica em Centros Urbanos do Brasil: Dois Estudos de Caso. São Paulo, Julho de 2004.
- Wolter, N. Options for Integrating PV into your Building. 2003. Disponível em: [www.ecw.org](http://www.ecw.org). Último acesso em 19/11/2013.
- Zomer, C. D. Geração Solar Fotovoltaica Integrada a uma Edificação Inserida em meio Urbano e Conectada à Rede Elétrica. Florianópolis, Maio de 2010.

## EVALUATION OF THE ANGLE AZIMUTHAL AND OF THE INCLINATION OF MODULE PHOTOVOLTAIC IN ELECTRICITY GENERATION

**Abstract.** *There are several available technologies for generating electricity assisted by solar. The building integrated photovoltaic systems begins to have meaningful participation in the global scenario, especially because of the various advantages of distributed generation, where there is a reduction in the losses of transmission and distribution of energy that are provided by this technology. This paper focuses on the influence of azimuthal angle and inclination for building integrated photovoltaic systems in the town of Florianópolis - SC. From simulations in software were obtained optimal azimuthal orientation and optimal inclination of the module for generating electricity. Annual losses can reach 18.1% for the azimuthal angle and 6.3% for the inclination angle.*

**Key words:** Solar Energy Photovoltaic, Azimuthal Angle, Tilt, Edification