

GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA INTEGRADA A EDIFICAÇÕES URBANAS: COMPROMISSOS ENTRE FORMA E FUNÇÃO

Clarissa Debiazi Zomer – clazomer@gmail.com

Lucas Nascimento – nascimento.ufsc@gmail.com

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil

Jair Urbanetz Jr. - jair.urbanetz@gmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Elétrica

Bruno Shimabukuro Okuda - bruno.okuda@eletrosul.gov.br

Fernando Flores - fernando.flores@eletrosul.gov.br

Eletrosul Centrais Elétricas de Santa Catarina

Ricardo Rütter – ruther@mbox1.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil

Resumo. *Buscando incentivar a utilização da energia solar fotovoltaica no Brasil, a Eletrosul Centrais Elétricas S.A., localizada em Florianópolis – SC, em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina, deu início ao projeto Megawatt Solar com a instalação de uma Planta Piloto. Diferente de um sistema fotovoltaico convencional, a Planta Piloto possui módulos fotovoltaicos integrados a uma cobertura curva e não está orientada ao norte. O objetivo deste artigo foi comparar o desempenho energético da Planta Piloto em seus três anos de operação com um Sistema de Referência, idealmente posicionado. Para quantificar as perdas decorrentes do posicionamento dos módulos fotovoltaicos da Planta Piloto, foram analisados dados de irradiação solar, de coeficiente de desempenho (PR) e de produtividade (yield). Os resultados mostraram que, para o período analisado, a irradiação horizontal diária média anual foi de cerca de 3,6 kWh/m².dia, o coeficiente de desempenho médio da Planta Piloto foi de 83,2% e a produtividade média da Planta Piloto foi 85% da produtividade do Sistema de Referência. Pode-se concluir que um bom compromisso entre forma e função foi atingido, já que o sistema teve um apelo estético positivo para a integração fotovoltaica na arquitetura e as perdas de geração energética (15%) foram consideradas baixas. Além de testar a comercialização da energia fotogerada, o projeto Megawatt Solar será uma vitrine para divulgar a tecnologia fotovoltaica integrada a edificações, preparando o mercado brasileiro para a paridade tarifária e atraindo fabricantes de componentes fotovoltaicos para o país.*

Palavras-chave: *Geração solar fotovoltaica, Integração de módulos fotovoltaicos a edificações, compromissos entre forma e função.*

1. INTRODUÇÃO

Apesar do enorme potencial de aproveitamento da energia solar no Brasil e a constante redução de custos que a tecnologia fotovoltaica vem experimentando, a aplicação da geração de eletricidade solar somente começou a ser mais amplamente discutida no país na presente década. Dentre as formas de aplicação da tecnologia fotovoltaica, pode-se dizer que a utilização do envelope construído das edificações para a integração de módulos fotovoltaicos é a solução mais adequada, pois permite que a geração energética aconteça junto ao ponto de consumo, minimizando as perdas por transmissão e distribuição, comuns no sistema centralizado (Rütter, 2004; Zomer, 2010). Além disso, a geração ocorre baseada em uma fonte limpa, silenciosa, renovável e inesgotável, abundante em todas as regiões do país. Outra vantagem é que a geração fotovoltaica não causa impactos ambientais ao entorno, assim como ocorre com as hidrelétricas e centrais eólicas; e a integração de módulos fotovoltaicos em edificações, tanto sobreposta à estrutura existente, como sendo o próprio material de vedação, ainda pode acrescentar valor estético à edificação. Segundo Prasad e Snow (2002), um dos atributos mais positivos da tecnologia fotovoltaica é sua aparência; remete a frieza sofisticada do “high-tech” com a responsabilidade social de mitigar a depredação ambiental.

Um gerador fotovoltaico comprometido com sua forma e sua função é capaz de gerar energia elétrica baseada em uma fonte limpa, agregar beleza à edificação a que está integrado e ser, portanto, um divulgador da tecnologia fotovoltaica (Urbanetz et al., 2010; Zomer et al., 2011a). No entanto, muitas vezes, os sistemas solares fotovoltaicos são apenas sobrepostos a projetos que não foram concebidos com eles. Às vezes, o resultado pode ser interessante e agradável, mas, na maioria das vezes, o sistema fotovoltaico interfere negativamente na arquitetura, comprometendo tanto sua composição formal quanto a própria divulgação da tecnologia. Esta situação ocorre quando a única preocupação da instalação fotovoltaica é em relação à sua função, ou seja, a maximização da geração fotovoltaica. Pelo contrário, quando a tecnologia fotovoltaica é integrada de uma maneira elegante e esteticamente agradável a uma edificação, esta se torna um exemplo que pode ser utilizado para convencer clientes, arquitetos e o público quanto ao

papel que um sistema fotovoltaico pode desempenhar, tanto em termos de geração energética quanto como elemento construtivo de um edifício (Prasad and Snow, 2002).

Com a crescente aceitação dos arquitetos e projetistas em inserir em suas obras elementos fotovoltaicos, a tendência é que novas formas de integração comecem a surgir, incluindo curvaturas. Além disso, devido ao entorno urbano, os sistemas integrados a edificações tendem a receber sombreamentos parciais, o que compromete a geração energética. O ideal é que as perdas sejam quantificadas na fase de projeto, para que possam ser minimizadas atendendo aos compromissos estéticos. Portanto, fazem-se necessários estudos mais aprofundados acerca do desempenho da geração fotovoltaica de sistemas integrados a edificações (Norton et al., 2010), e as consequentes perdas energéticas devido ao posicionamento dos módulos em relação com a orientação e a inclinação ideais. O domínio das consequências – ora concomitantes, ora conflitantes – devido às decisões de projeto em relação à forma e à função de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações, é assunto de interesse econômico, técnico e, sobretudo, fundamental para o desenvolvimento de conhecimento científico neste setor no Brasil (Urbanetz et al., 2010; Zomer et al., 2011b).

Uma forma de incentivar e disseminar o uso da tecnologia fotovoltaica no país é através da integração de módulos fotovoltaicos em edificações com grande visibilidade. Mas, para que a divulgação seja positiva, a integração fotovoltaica tem que estar em harmonia com a arquitetura, fazendo parte da mesma. Além disso, projetos que demonstram a utilização de sistemas fotovoltaicos como elementos de composição arquitetônica são muito importantes para que os custos da eletricidade fotovoltaica continuem caindo (Ropp et al., 1997).

A redução de custos já é uma realidade e este é mais um fator que vem a contribuir para que a tecnologia fotovoltaica seja mais amplamente utilizada. A contínua queda dos preços nos últimos dez anos não teria sido possível sem a produção em larga escala para atender a demandas de países europeus, como a Alemanha, onde há programas de incentivo bem sucedidos (Dusonchet and Telaretti, 2010; Frondel et al., 2010; Neij, 2008). Além disso, é prevista, para a presente década, a paridade tarifária – momento em que a conversão da luz solar em eletricidade será economicamente competitiva em relação ao custo quando comparada a fontes energéticas convencionais – em muitas partes do mundo (Byrne et al., 1996; Masini and Frankl, 2003; Yang, 2010). O cenário de energia solar no Brasil, assim como em outros países de baixas latitudes, indica um futuro promissor para os sistemas conectados à rede e integrados às edificações (Martins et al., 2008; Rütther and Zilles, 2011). Portanto, a tecnologia solar fotovoltaica tem uma grande chance de contribuir na matriz energética brasileira em um futuro próximo.

Buscando incentivar a utilização da energia solar fotovoltaica no Brasil, a Eletrosul Centrais Elétricas S.A., localizada em Florianópolis – SC, em parceria com o Grupo de Pesquisa Estratégica em Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC, deu início à construção do projeto Megawatt Solar. Este projeto tem por objetivo instalar e analisar a implantação de um sistema fotovoltaico de 1 MWp conectado à rede elétrica e integrado ao edifício sede da Eletrosul, tanto do ponto de vista da geração energética quanto do ponto de vista econômico. Sua instalação começou em 2008, com a construção de uma cobertura para motos e bicicletas e passagem de pedestres com integração de módulos fotovoltaicos. Este sistema fotovoltaico foi denominado Planta Piloto.

A Planta Piloto é considerada um *BIPV (Building-integrated Photovoltaic System)*, pois os módulos, do tipo flexível utilizando a tecnologia de filmes finos, estão instalados diretamente na cobertura, colados a ela. Como a cobertura é curva, os módulos também estão curvados. Portanto, a Planta Piloto não atende a princípios de otimização de geração fotovoltaica, mas sim, prioriza a composição formal entre arquitetura e tecnologia fotovoltaica.

A fim de quantificar as perdas decorrentes do posicionamento dos módulos, o sistema fotovoltaico da Planta Piloto foi comparado com um Sistema de Referência instalado na UFSC e que utiliza módulos da mesma tecnologia, instalado de modo a otimizar a geração fotovoltaica anual para a mesma localidade. Além de possuírem os mesmos módulos fotovoltaicos (silício amorfo - PVL), ambos os sistemas possuem inversores do mesmo fabricante (SMA) e já passaram do período de degradação dos módulos (um ano), estando os mesmos estabilizados (Rütther et al., 2003b). Portanto, o objetivo do presente artigo é comparar o desempenho energético da Planta Piloto em seus três anos de operação com um Sistema de Referência no mesmo período, ambos localizados na cidade de Florianópolis –SC.

2. OBJETOS DE ESTUDO

2.1. Projeto Eletrosul Megawatt Solar: Planta Piloto

O Projeto Megawatt Solar é composto por um sistema fotovoltaico principal, a ser instalado sobre a cobertura do edifício sede da Eletrosul, e onze sistemas fotovoltaicos secundários, a serem instalados sobre coberturas para veículos na área de estacionamentos da empresa (Fig.1).

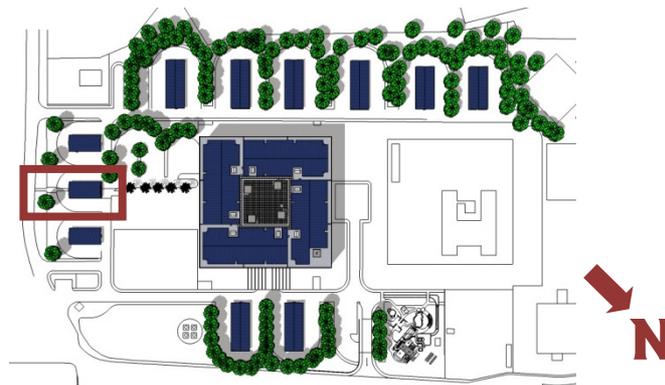


Figura 1 - Projeto Megawatt Solar com o sistema fotovoltaico principal e os sistemas fotovoltaicos secundários a serem instalados na Eletrosul – Florianópolis. Destaque para a Planta Piloto, já em operação.

Dentre os sistemas secundários, a Planta Piloto já está em operação desde fevereiro de 2009 e é objeto de estudo do presente artigo.

O projeto inicial da Planta Piloto foi concebido pela equipe Fotovoltaica UFSC e previa uma cobertura metálica curva apoiada sobre pilares metálicos curvos (Fig.2). O conceito de projeto foi demonstrar a flexibilidade de utilização da tecnologia fotovoltaica em três aspectos principais: orientação, inclinação e forma da cobertura.



Figura 2 - Proposta original para a Planta Piloto do Megawatt Solar projetada pela equipe Fotovoltaica UFSC.

Em relação à orientação, sabe-se que o melhor aproveitamento da energia solar ocorre quando os módulos estão orientados ao norte. No entanto, devido ao posicionamento das vagas de estacionamento, deslocar a cobertura visando apenas obter o melhor aproveitamento iria comprometer a composição formal final. Neste sentido, optou-se por encarar as possíveis perdas em nome de um projeto arquitetônico que melhor se enquadrasse na paisagem. Portanto, a cobertura ficou parcialmente voltada para nordeste e parcialmente voltada para sudoeste.

Em relação à inclinação, para que o aproveitamento solar seja maximizado, o plano deve, além de estar orientado ao norte, estar com inclinação igual ou próxima à latitude local. Neste caso, como a orientação já não era norte, buscou-se um ângulo de inclinação baixo, mas que ainda assim permitisse uma curvatura. Neste caso, o ângulo médio foi 9°.

E, por fim, em relação à forma. O mais usual é que se utilizem módulos fotovoltaicos em superfícies planas. No entanto, com o intuito de demonstrar a adaptabilidade da tecnologia fotovoltaica, optou-se por utilizá-la em uma cobertura curva.

O projeto executivo do sistema sofreu pequenas alterações pela equipe de projeto da Eletrosul, de maneira que a planta piloto mantivesse as mesmas linhas do edifício sede. Esta integração foi obtida, principalmente, através da substituição dos pilares metálicos curvos por pilares de concreto aparente. A Fig.3 apresenta o projeto final.



Figura 3 - Proposta final para a Planta Piloto do Megawatt Solar com alterações da equipe da Eletrosul.

A Planta Piloto possui cobertura metálica curva de 234 m², na qual estão colados módulos fotovoltaicos de filmes finos flexíveis de a-Si da marca UNI-SOLAR®, modelo PVL-136-T (136Wp). São 88 módulos totalizando 11,97 kWp. São utilizados três inversores SMA modelo SB4000US e um sistema que faz a aquisição de dados de temperatura do módulo, irradiação solar e parâmetros elétricos com resolução temporal de cinco minutos. A Fig.4 apresenta uma vista geral do sistema e a Fig.5 apresenta um desenho esquemático demonstrando que a cobertura está dividida em três subsistemas.



Figura 4 - Planta Piloto do Megawatt Solar em operação desde fevereiro de 2009.

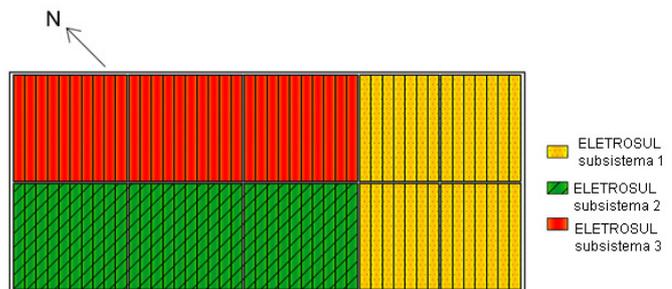


Figura 5 - Distribuição dos módulos em subsistemas.

Os subsistemas foram divididos da seguinte forma:

- Subsistema 1: 28 módulos totalizando 3,808 kWp ligados ao inversor 1. Neste subsistema, metade dos módulos estão orientados para o nordeste e a outra metade para o sudoeste;
- Subsistema 2: 30 módulos totalizando 4,080 kWp ligados ao inversor 2. Neste subsistema, os módulos estão orientados para o sudoeste;
- Subsistema 3: 30 módulos totalizando 4,080 kWp ligados ao inversor 3. Neste subsistema, os módulos estão orientados para o nordeste.

2.2. Sistema de Referência: 10 kWp no Centro de Eventos da Universidade Federal de Santa Catarina

O Sistema de Referência utilizado para as análises deste artigo possui todas as características que o tornam “ideal” para a cidade de Florianópolis, ou seja, é plano, orientado ao norte verdadeiro e possui inclinação igual à latitude local (27°). Pelo fato de os módulos estarem aplicados a sua cobertura, é considerado um *BAPV (Building-applied Photovoltaic System)*. Trata-se do sistema de 10,24 kWp instalado na cobertura do Centro de Cultura e Eventos da Universidade Federal de Santa Catarina (Viana et al., 2007). Este sistema, em operação desde 2004, é composto por 80 módulos flexíveis de silício amorfo de 128 W (PVL 128) e sete inversores, sendo seis Würth, modelos Solar Star 1200 e 1500 e um SMA modelo SB2500, ou seja, é dividido em sete subsistemas. O sistema possui um medidor de energia para cada inversor, o que possibilita o acompanhamento periódico da geração.

A Fig.6 apresenta o Centro de Cultura e Eventos com a instalação na parte frontal de sua cobertura e a Fig.7 apresenta a planta baixa do sistema com a indicação do norte.



Figura 6 - Sistema fotovoltaico plano inclinado a 27°N, com 10,24 kWp, integrado ao Centro de Cultura e Eventos da UFSC.

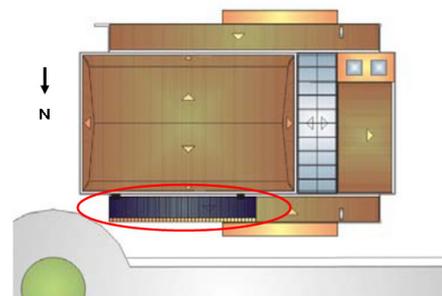


Figura 7 - Orientação do sistema de 10 kWp do Centro de Cultura e Eventos da UFSC.

Como a intenção desta análise era utilizar um sistema com o melhor rendimento para a cidade de Florianópolis, considerou-se apenas um subsistema, composto por 24 módulos (3,072 kWp), conectados a um inversor Sunny Boy SB2500, pois foi o que apresentou menos momentos de falhas, quando comparado com os demais, além de utilizar um inversor do mesmo tipo do utilizado na Planta Piloto. Este inversor está conectado a um sistema de aquisição de dados que adquire dados de temperatura do módulo, irradiação solar e parâmetros elétricos com resolução temporal de cinco minutos.

3. MÉTODO

Para quantificar as perdas decorrentes do posicionamento dos módulos fotovoltaicos da Planta Piloto, o seu desempenho durante os três anos que esteve em operação foi comparado com o desempenho do Sistema de Referência. Os dois sistemas fotovoltaicos possuem sistemas de monitoramento e aquisição de dados e, para a presente análise, foram utilizados dados do período de fevereiro de 2009 a dezembro de 2011. Foram analisados dados de irradiação solar, do coeficiente de desempenho (PR) e de produtividade (*yield*).

3.1. Análise da irradiação solar

A análise da irradiação solar incidente no plano horizontal da cidade de Florianópolis foi o primeiro fator a ser estudado. Foram obtidos valores de irradiação a cada quatro minutos, durante o período de fevereiro de 2009 a dezembro de 2011. Os dados de irradiação foram coletados por um piranômetro instalado na cobertura do edifício de Engenharia Mecânica da UFSC, próximo ao Sistema de Referência e distante 600 metros da Planta Piloto. Os valores foram convertidos em valores de irradiação média diária para cada mês.

3.2. Análise do coeficiente de desempenho (PR)

O coeficiente de desempenho de um sistema fotovoltaico, também chamado de performance ratio (PR) é uma medida do grau de utilização de um sistema fotovoltaico e demonstra o efeito das perdas de energia gerada em decorrência de fatores como sombreamento, temperatura dos módulos, falhas no sistema, entre outros (Reich et al., 2012). O coeficiente de desempenho é definido como a razão da produtividade real de um sistema e a produtividade de referência. O coeficiente de desempenho pode ser utilizado como um forte indicador para comparar sistemas fotovoltaicos com diferentes arranjos para uma mesma localidade, sistemas iguais instalados em locais diferentes ou comparar o mesmo sistema ao longo dos anos.

Neste artigo, foram comparados os três subsistemas da Planta Piloto com o sistema completo, bem como com o Sistema de Referência em operação na UFSC, a fim de verificar a influência do posicionamento dos módulos na geração fotovoltaica e qual dos subsistemas exerceu maior influência no resultado final.

3.3. Análise da produtividade (*yield*)

A produtividade de um sistema, também chamada de *yield*, reflete o desempenho de cada sistema fotovoltaico normalizado em relação à potência instalada, ou seja, representa o quanto de energia elétrica um gerador produz (kWh) por unidade de potência nominal instalada (kWp), em um determinado período. Desta forma, sistemas fotovoltaicos de diferentes tamanhos, arranjos e tecnologias podem ser comparados (Marion et al., 2005).

Neste artigo, foram comparadas as produtividades mensais dos três subsistemas e da Planta Piloto completa com o Sistema de Referência.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Irradiação solar

A irradiação solar incidente no plano horizontal em Florianópolis, para os três anos de operação do sistema da Planta Piloto, está representada na Fig.8.

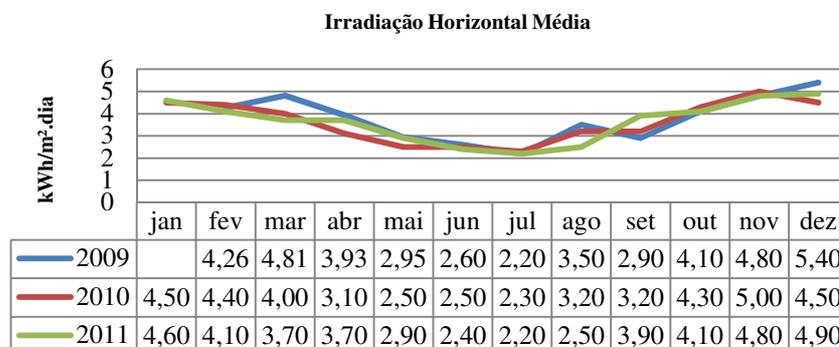


Figura 8 - Irradiação diária média no plano horizontal para a cidade de Florianópolis - Período de 2009 a 2011.

Para o período analisado, a irradiação horizontal diária média anual foi de cerca de 3,6 kWh/m².dia. O ano de 2009 foi o que apresentou a maior média anual, com 3,77 kWh/m².dia. A irradiação média anual de 2010 e de 2011 foram, respectivamente, 3,55 kWh/m².dia e 3,56 kWh/m².dia.

A variabilidade sazonal para as áreas costeiras da região Sul é bastante pronunciada (Pereira *et al.*, 2006). Em Florianópolis, para os três anos avaliados, observou-se uma variabilidade superior a 45% entre os índices de irradiação solar dos meses de inverno e verão. Na comparação entre os três anos, a irradiação horizontal apresentou baixa sazonalidade interanual.

4.2. Coeficiente de desempenho (PR)

A análise do coeficiente de desempenho, ou PR, foi realizada para comparar os três subsistemas da Planta Piloto com o sistema completo e pode ser visualizada na Fig.9.

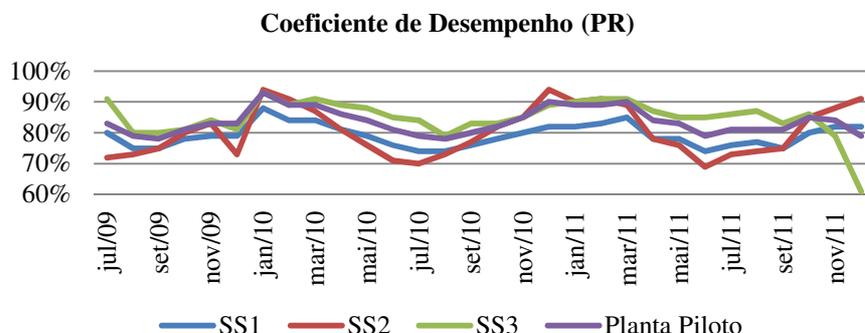


Figura 9 - Coeficiente de desempenho PR dos subsistemas SS1, SS2, SS3 e Planta Piloto.

Conforme a Fig.9, o sistema completo da Planta Piloto vem apresentando um coeficiente de desempenho de 83,2% em média, sendo os maiores coeficientes observados no verão (88%), onde o sistema experimenta menores perdas de captação, devido ao sol possuir uma trajetória aparente mais alta no céu, privilegiando os subsistemas não idealmente orientados. No inverno, o coeficiente de desempenho da Planta Piloto possui valores médios superiores a 80%.

Foram analisados os coeficientes de desempenho médios individuais de cada um dos três subsistemas da Planta Piloto, nos três anos de operação. Os valores obtidos foram de 78,9%, 78,7% e 84,5 para os subsistemas SS1, SS2 e SS3, respectivamente. Observou-se que o SS1, que possui metade dos módulos orientados para o nordeste e outra metade para o sudoeste, possui praticamente o mesmo coeficiente de desempenho do SS2, que tem seus módulos orientados para o sudoeste. Neste caso, verifica-se que a dupla orientação do sistema compromete significativamente a busca pelo ponto máximo de potência do inversor.

Nesta situação, um inversor com dois buscadores de máxima potência levaria a uma otimização do coeficiente de desempenho do sistema. Como um dos parâmetros a ser avaliado neste projeto são as perdas por não homogeneidade elétrica entre as séries, optou-se por não utilizar um inversor deste modelo.

Através da Fig.9, pode-se ver que no mês de dezembro/2011, o coeficiente de desempenho do SS3 apresentou uma redução significativa de seu valor. A causa da falha foi um conector que, após os três anos de operação, apresentou má conexão elétrica em uma das séries.

De modo geral, verificou-se que a Planta Piloto vem demonstrando um bom coeficiente de desempenho, típico da tecnologia de silício amorfo (a-Si) quando operado em climas quentes (Rüther, 1998; Rüther and Dacoregio, 2000; Rüther and Livingstone, 1994; Rüther et al., 2003a).

4.3. Produtividade (yield)

A produtividade dos subsistemas da Planta Piloto foi comparada com a produtividade do Sistema de Referência e o resultado da comparação pode ser observado na Fig.10.

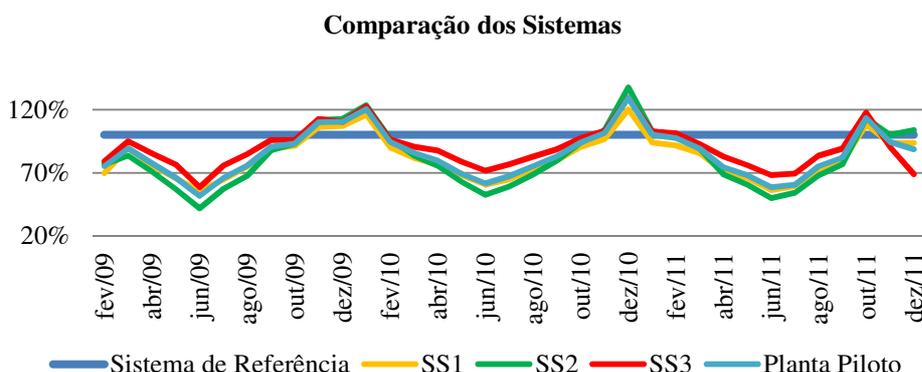


Figura 10 - Comparação da produtividade dos subsistemas da Planta Piloto com o Sistema de Referência.

De acordo com a Fig.10, pode-se perceber que o comportamento do SS3 foi o que mais se aproximou do Sistema de Referência.

Mesmo com as condições de posicionamento e inclinação dos módulos estarem bem diferentes da condição ideal, nos três subsistemas da Planta Piloto houve meses do ano em que a produtividade foi superior à produtividade do Sistema de Referência. Os melhores desempenhos da Planta Piloto ocorreram nos meses próximos ao solstício de verão (novembro, dezembro, janeiro e fevereiro), chegando a superar o Sistema de Referência em até 30% no mês de dezembro de 2010. É importante destacar que, devido ao uso de condicionadores de ar, estes são os meses com maiores demandas de energia na Eletrosul (Zomer, 2010)

Considerando todo o período analisado, a Planta Piloto teve uma produtividade média 15% inferior ao Sistema de Referência idealmente orientado.

5. CONCLUSÕES

A integração de módulos fotovoltaicos em edificações é uma tendência mundial e, com a redução de custos devido ao crescimento da produção em escala, espera-se que esta forma de geração distribuída e junto ao ponto de consumo seja amplamente utilizada. A adoção de módulos fotovoltaicos como elemento construtivo por arquitetos e projetistas depende do compromisso entre estética e desempenho. Portanto, é importante avaliar em que sentido estes aspectos podem entrar em conflito um com o outro.

O presente artigo demonstrou resultados mensais e anuais de dois sistemas fotovoltaicos integrados a edificações, sendo um instalado em condições ideais e outro instalado em uma superfície curva, com inclinação e orientação não ideais. Além de possuírem os mesmos módulos fotovoltaicos (silício amorfo - PVL), ambos os sistemas possuem inversores do mesmo fabricante (SMA) e já passaram do período de degradação dos módulos (um ano), estando os mesmos estabilizados (Rüther et al., 2003b). O sistema ideal, aqui chamado de Sistema de Referência, apresentou um total de geração anual superior ao da Planta Piloto, o qual atingiu 85% do desempenho do primeiro. Pode-se concluir que um bom compromisso entre forma e função foi atingido, já que o sistema tem um apelo estético positivo para a integração fotovoltaica na arquitetura e as perdas de geração energética foram consideradas baixas.

Na comparação mensal, a Planta Piloto obteve uma maior variação de produtividade do que o Sistema de Referência. Nos meses de inverno, sua produtividade foi de apenas 40% da produtividade do Sistema de Referência. Porém, nos meses de verão, sua produtividade representou até 130% da produtividade do Sistema de Referência.

Na integração da tecnologia fotovoltaica à arquitetura, de maneira especial, é interessante associar a geração energética ao perfil de demanda da edificação. Neste sentido, em edificações de baixas latitudes, nas quais o verão é bem definido, a maior demanda energética costuma ocorrer nos meses mais quentes, em virtude do uso de condicionadores de ar. Nesta situação, sistemas fotovoltaicos que maximizam a geração nos meses de maior necessidade de energia tornam-se mais interessantes economicamente do que sistemas que possuem um desempenho mais uniforme ao longo do ano.

Atualmente, existe uma tendência crescente nas políticas de energia distribuída em todo o mundo para que os edifícios sejam capazes de produzir ao menos parte da energia que consomem e uma ótima forma de fazer isso é através da tecnologia fotovoltaica.

Com arquitetos e projetistas se familiarizando cada vez mais com a integração da tecnologia fotovoltaica ao envelope das edificações, torna-se cada vez mais necessários os avanços científicos nos estudos em relação à avaliação das perdas de energia associadas à utilização de módulos em situações não consideradas ideais, tanto em relação à inclinação e orientação, quanto em relação a superfícies curvas.

REFERÊNCIAS

- Byrne, J., S. Letendre, C. Govindarajalu, Y.-D. Wang, and R. Nigro, 1996, Evaluating the economics of photovoltaics in a demand-side management role: *Energy Policy*, v. 24, p. 177-185.
- Dusonchet, L., and E. Telaretti, 2010, Economic analysis of different supporting policies for the production of electrical energy by solar photovoltaics in eastern European Union countries: *Energy Policy*, v. 38, p. 4011-4020.
- Fronzel, M., N. Ritter, C. M. Schmidt, and C. Vance, 2010, Economic impacts from the promotion of renewable energy technologies: The German experience: *Energy Policy*, v. 38, p. 4048-4056.
- Marion, B., J. Adelstein, K. Boyle, H. Hayden, B. Hammond, T. Fletcher, B. Canada, D. Narang, D. Shugar, H. Wenger, A. Kimber, L. Mitchell, G. Rich, and T. Townsend, 2005, Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems, 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition, Lake Buena Vista, Florida.
- Martins, F. R., R. Rüther, E. B. Pereira, and S. L. Abreu, 2008, Solar energy scenarios in Brazil. Part two: Photovoltaics applications: *Energy Policy*, v. 36, p. 2865-2877.
- Masini, A., and P. Frankl, 2003, Forecasting the diffusion of photovoltaic systems in southern Europe: A learning curve approach: *Technological Forecasting and Social Change*, v. 70, p. 39-65.
- Neij, L., 2008, Cost development of future technologies for power generation--A study based on experience curves and complementary bottom-up assessments: *Energy Policy*, v. 36, p. 2200-2211.

- Norton, B., P. C. Eames, T. K. Mallick, M. J. Huang, S. J. McCormack, J. D. Mondol, and Y. G. Yohanis, 2010, Enhancing the performance of building integrated photovoltaics: Solar Energy, v. In Press, Corrected Proof.
- Prasad, D., and M. Snow, 2002, Designing with solar power - A source book for building integration photovoltaics (BiPV): Australia, Images Publishing.
- Reich, N. H., B. Mueller, A. Armbruster, W. G. J. H. M. van Sark, K. Kiefer, and C. Reise, 2012, Performance ratio revisited: is PR > 90% realistic?: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, p. n/a-n/a.
- Ropp, M. E., M. Begovic, A. Rohatgi, and R. Long, 1997, Design Considerations for Large Roof-integrated Photovoltaic Arrays: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 5, p. 55-67.
- Rüther, R., 1998, Experiences and operational results of the first grid-connected, building-integrated, thin film photovoltaic installation in Brazil: 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, p. 2655-2658.
- Rüther, R., 2004, Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil: Florianópolis, Editora UFSC/LABSOLAR, 114 p.
- Rüther, R., and M. M. Dacoregio, 2000, Performance assessment of a 2 kWp grid-connected, building-integrated, amorphous silicon photovoltaic installation in Brazil: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 8, p. 257-266.
- Rüther, R., and J. Livingstone, 1994, Seasonal variations in amorphous silicon solar module outputs and thin film characteristics: Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 36, p. 29-43.
- Rüther, R., G. Tamizh-Mani, J. d. Cueto, J. Adelstein, A. A. Montenegro, and B. v. Roedern, 2003a, Performance test of amorphous silicon modules in different climates: higher minimum operating temperatures lead to higher performances 3rd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion.
- Rüther, R., G. Tamizh-Mani, J. d. Cueto, J. Adelstein, A. A. Montenegro, and B. v. Roedern, 2003b, Performance of amorphous silicon modules in different climates: higher minimum operating temperatures lead to higher performance levels, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan.
- Rüther, R., and R. Zilles, 2011, Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil: Energy Policy, v. 39, p. 1027-1030.
- Urbanetz, J., C. D. Zomer, and R. Rüther, 2010, Compromises between form and function in grid-connected, building-integrated photovoltaics (BIPV) at low-latitudes sites, Energy & Buildings, Florianópolis.
- Viana, T., C. Zomer, L. Nascimento, and R. Rüther, 2007, Centro de Eventos da UFSC: integração de sistemas fotovoltaicos à arquitetura, IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, Ouro Preto.
- Yang, C.-J., 2010, Reconsidering solar grid parity: Energy Policy, v. 38, p. 3270-3273.
- Zomer, C. D., 2010, Megawatt Solar: Geração solar fotovoltaica integrada a uma edificação inserida em meio urbano e conectada à rede elétrica. Estudo de caso: Edifício sede da Eletrosul, Florianópolis - Santa Catarina: Mestrado thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 155 p.
- Zomer, C. D., J. Urbanetz, P. Pfitscher, A. Montenegro, and R. Rüther, 2011a, Compromissos entre forma e função de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações e conectados à rede em baixas latitudes: XI ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, p. 812-821.
- Zomer, C. D., J. Urbanetz, and R. Ruther, 2011b, On the compromises between form and function in grid-connected building-integrated photovoltaics (BIPV) at low-latitudes.: ISES Solar World Congress, p. 776-786.

PHOTOVOLTAIC SOLAR GENERATION INTEGRATED IN URBAN BUILDINGS: COMPROMISES BETWEEN FORM AND FUNCTION

Abstract. *In order to promote the use of photovoltaic solar energy in Brazil, the Universidade Federal de Santa Catarina, together with Eletrosul Centrais Elétricas S.A, located at Florianópolis – SC, began the construction of the Megawatt Solar project, installing the Pilot Plant PV system. The Pilot Plant system is different from a conventional PV system because solar modules are installed in a curved surface and are not north-oriented. The objective of this paper is to compare the energetic performance of the Pilot Plant system with a reference system, ideally oriented for the same location, called Reference System. In order to quantify the losses from the modules not ideally positioned, data on irradiation, performance ratio and yield were compared between the Pilot Plant and the Reference System. The results showed that, for the analyzed period, the irradiation was 3.6 kWh/m².day, the performance ratio of the Pilot Plant was 83,2% and the Pilot Plant's yield was 85% of the Reference System's. It was possible to conclude that good compromises between form and function were reached, because the Pilot Plant has a great aesthetic appeal, and energy losses were about just 15%.*

Key words: *Photovoltaic solar generation, Building-integrated photovoltaic systems, Compromises between form and function.*