A INTEGRAÇÃO DOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS EM SEIS AEROPORTOS BRASILEIROS UTILIZANDO DIFERENTES TECNOLOGIAS DE CÉLULAS SOLARES

Priscila Braun – priscilab@labeee.ufsc.br
Ísis Portolan dos Santos – isisporto@labeee.ufsc.br
Clarissa Debiazi Zomer – clarissa@labeee.ufsc.br
Universidade Federal de Santa Catarina, LabEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
Ricardo Rüther – ruther@mbox1.ufsc.br
Universidade Federal de Santa Catarina, LabEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Labsolar – Laboratório de Energia Solar

Resumo. *A energia solar fotovoltaica como fonte de energia renovável possui diversas aplicabilidades. Uma delas é a integração dos sistemas fotovoltaicos em edificações comerciais, onde muitas vezes a curva de demanda é coincidente com a curva de geração solar devido à utilização de equipamentos de ar-condicionado. A geração fotovoltaica integrada ao entorno construído vem tomando importância crescente em todo o mundo e pode ser uma alternativa interessante para a geração distribuída no Brasil. Construções aeroportuárias são tipicamente grandes e ensolaradas, livres de sombreamento, com fachadas e telhados podendo acomodar módulos fotovoltaicos. Utilizando diferentes tecnologias fotovoltaicas integradas ao entorno construído de seis aeroportos brasileiros, em cinco cidades (Florianópolis, Brasília, São Paulo, Guarulhos e Rio de Janeiro) localizadas em diferentes regiões do país, o presente artigo tem por objetivo analisar a contribuição energética da integração de sistemas fotovoltaicos à arquitetura dos complexos aeroportuários selecionados. Nas simulações da integração dos sistemas foram utilizados dados de consumo energético mensais para um período de um ano, de cada aeroporto. O cálculo da geração solar fotovoltaica foi realizado com base na radiação solar para cada cidade e de acordo com a eficiência de cada tecnologia. Considerando a aplicação das diferentes tecnologias fotovoltaicas comercialmente disponíveis e sua aplicação nas coberturas dos terminais de passageiros, observa-se que, nos casos mais favoráveis, o total de energia gerada durante o ano poderia contribuir em média com 50% da energia utilizada pela edificação durante o mesmo período de tempo. A utilização da tecnologia fotovoltaica em grandes áreas implica na instalação de grandes potenciais, o que poderá impulsionar o crescimento do mercado fotovoltaico brasileiro proporcionando redução de custos, atraindo investidores e fabricantes desta tecnologia.*

Palavras-chave: *Energia Solar Fotovoltaica, Aeroportos, Sistemas FV Integrados em Edificações*

1. INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica como fonte de energia renovável possui diversas aplicabilidades, como a integração dos sistemas fotovoltaicos em edificações. O potencial energético da integração não está somente na utilização no setor residencial, mas também em edificações industriais, comerciais e públicas, pois estas, muitas vezes, apresentam grandes áreas planas, que são bastante adequadas à integração de geradores fotovoltaicos.

Estudos mostram que a energia solar pode ter significativa participação no suprimento de energia elétrica quando conectados à rede elétrica pública. Marinoski *et al*., (2004) realizaram um estudo preliminar de dimensionamento de sistema fotovoltaico no edifício do CREA-SC (Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Estado de Santa Catarina) localizado na cidade de Florianópolis, onde observou-se que em média até 51% do consumo de energia elétrica poderia ser suprido através da energia solar. Miyazaki *et al.*, (2005) mostraram que a economia de energia convencional, utilizando módulos fotovoltaicos semi-transparentes aplicados à edificação, foi de 54%. Um estudo comparando a integração de sistemas fotovoltaicos em edificações residenciais em Florianópolis, Brasília e Natal, mostrou que a geração fotovoltaica pode reduzir a demanda da rede (Ordenes *et al*., 2006).

As construções aeroportuárias são tipicamente grandes e ensolaradas, livres de sombreamento; as fachadas e os telhados podem acomodar os módulos fotovoltaicos. Pátios de aeroportos são suficientemente grandes para acomodar arranjos isolados, que podem ser usados em alguns casos como barreiras contra ruído produzido pelas aeronaves desviando-os dos terminais de passageiros. (Rüther e Braun, 2005). Edifícios aeroportuários são exemplos de aplicação ideal de sistemas fotovoltaicos interligados à rede, onde picos de geração solar e consumo são muitas vezes coincidentes (Braun *et al.*, 2007).

A relação entre a geração solar e o consumo energético contribui com a viabilização de sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica, uma vez que o investimento pode ser considerado como um custo evitado de ampliação de

linhas de transmissão, subestações e outros equipamentos necessários para o aumento do fornecimento de energia elétrica aos pontos consumidores onde há necessidade de expansão. Utilizando diferentes tecnologias fotovoltaicas, o presente artigo tem por objetivo analisar a contribuição da integração de sistemas fotovoltaicos em fachadas e cobertura, sobre o uso da energia elétrica da rede pública de seis edificações aeroportuárias brasileiras.

2. METODOLOGIA

2.1 A seleção dos aeroportos

Seis aeroportos brasileiros foram selecionados neste trabalho com base em dados de consumo energético e movimentação de passageiros para o ano de 2007, fornecidos pela Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária – INFRAERO, e por relevância no cenário político, econômico e geográfico brasileiro.

Localizados na região Sudeste do país, os aeroportos do Rio de Janeiro (Galeão) e São Paulo (Guarulhos) se destacam pelo consumo energético, ocupando o primeiro e o segundo lugar na colocação respectivamente. Já os aeroportos de Congonhas (São Paulo) e Santos-Dumont (Rio de Janeiro), por sua localização central, possuem importância no cenário político e econômico do país e na movimentação de passageiros, pois viabiliza a rota que liga as duas capitais mais importantes do país, a denominada Ponte Aérea Rio-São Paulo.

O Aeroporto Internacional de Brasília, por ser o aeroporto localizado na capital do país, possui importância política no cenário nacional e internacional. O aeroporto ainda se destaca por se localizar na região Centro-Oeste, uma das regiões brasileiras com elevados níveis de radiação solar (Pereira *et al.*, 2007). É o terceiro aeroporto em movimentação de passageiros e o oitavo em consumo energético.

O Aeroporto Internacional de Florianópolis foi selecionado por localizar-se na cidade onde se localiza a Universidade Federal de Santa Catarina, instituição dos autores deste trabalho, e por ser uma capital com um dos menores níveis de radiação solar do país, o que pode servir de comparação para o estudo. A Tab. 1 mostra os valores de consumo energético e movimentação de passageiros dos aeroportos selecionados.

Tabela 1. Valores de consumo energético e movimentação de passageiros para o ano de 2007 dos aeroportos selecionados e respectivas posições.

Aeroporto	Consumo (kWh)	Posição	Passageiros	Posição
Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro-Galeão	112.737.595	1º	10.352.616	4º
Aeroporto Internacional de Guarulhos - SP	82.527.772	2º	18.795.596	1º
Aeroporto Internacional de São Paulo - Congonhas	21.828.077	4º	15.265.433	2º
Aeroporto Internacional de Brasília - DF	15.451.434	8º	11.119.872	3º
Aeroporto Santos Dumont - RJ	11.238.285	13º	3.214.415	11º
Aeroporto Internacional de Florianópolis - SC	3.239.236	19º	1.948.010	14º

2.2 Áreas das edificações aeroportuárias

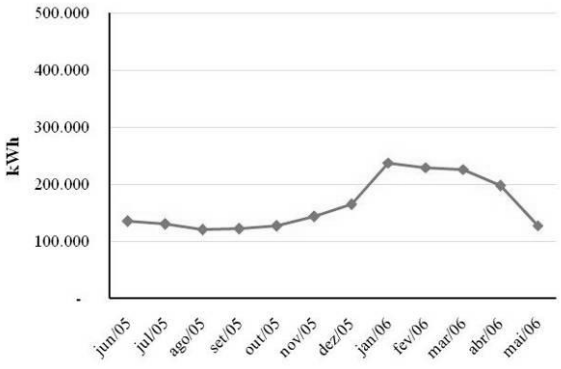
Na elaboração da simulação de integração de sistemas solares fotovoltaicos em aeroportos, as áreas disponíveis para a integração como as fachadas e cobertura das edificações, dando prioridade às áreas do terminal de passageiros, foram calculadas com base em desenhos arquitetônicos fornecidos pela INFRAERO. Não foram levadas em consideração particularidades relativas à instalação de cada tipo de tecnologia. A área total de aplicação dos módulos corresponde à área total das paredes e ou de telhados externos, excluindo aberturas e áreas de interferência como as de projeção de elevações (possíveis áreas de sombreamento) subtraindo do total, 15%, referente à perda de área por instalação e problemas com medição. As inclinações dos módulos foram adotadas observando-se a inclinação real da arquitetura das edificações.

2.3 Consumo mensal de energia elétrica das edificações aeroportuárias

Os dados de consumo de energia elétrica foram computados pela concessionária de energia elétrica local de cada aeroporto e cedidos pela INFRAERO. Os dados fornecem informações de consumo contabilizado em períodos de 12 meses.

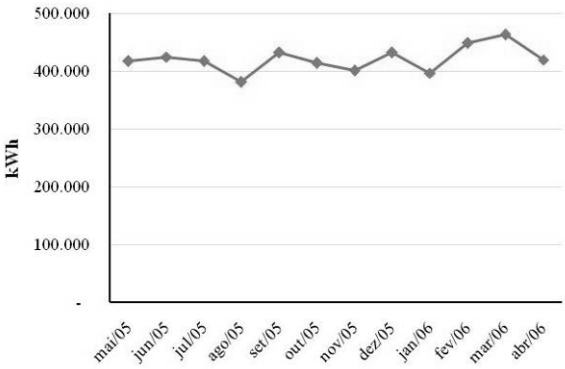
Inicialmente os dados foram solicitados para o mesmo período em todos os aeroportos, do mês de Junho de 2005 ao mês Maio de 2006, por ser o mesmo período dos dados de consumo energético de um estudo anteriormente realizado para o aeroporto de Florianópolis (Braun *et al.*, 2007). Porém, cada aeroporto está condicionado à concessionária de energia local e para alguns aeroportos o período sofreu alteração em função da não disponibilidade de dados ou pela falha de medição em determinados períodos. A Fig. 1 mostra os dados de consumo mensal para os seis aeroportos selecionados para os respectivos períodos de medição.

Aeroporto Internacional de Florianópolis - SC



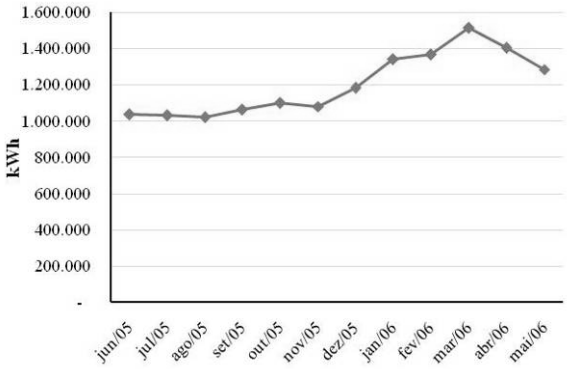
jun/05	jul/05	ago/05	set/05	out/05	nov/05	dez/05	jan/06	fev/06	mar/06	abr/06	mai/06
135.340	130.004	120.100	122.373	127.003	143.617	165.230	237.817	229.317	226.151	198.013	128.225

Aeroporto Santos Dumont - RJ



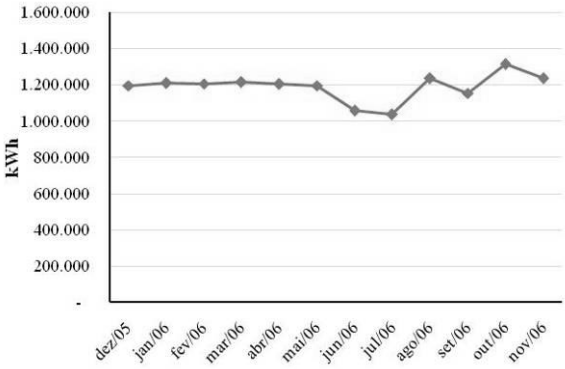
mai/05	jun/05	jul/05	ago/05	set/05	out/05	nov/05	dez/05	jan/06	fev/06	mar/06	abr/06
417.512	424.324	416.643	381.221	432.357	414.147	400.205	432.032	396.909	447.853	462.519	419.421

Aeroporto Internacional de São Paulo - Congonhas



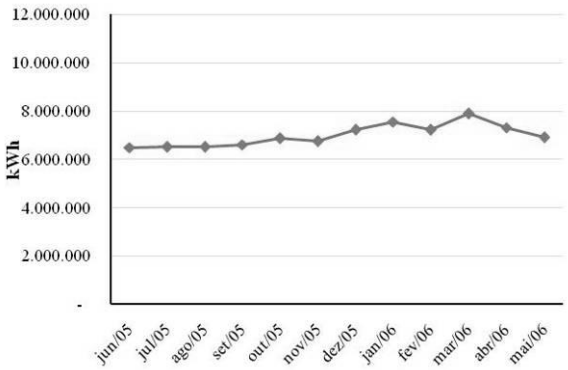
jun/05	jul/05	ago/05	set/05	out/05	nov/05	dez/05	jan/06	fev/06	mar/06	abr/06	mai/06
1.034.884	1.032.210	1.021.743	1.062.698	1.097.579	1.081.363	1.184.136	1.338.746	1.364.843	1.512.656	1.404.280	1.285.062

Aeroporto Internacional de Brasília - DF



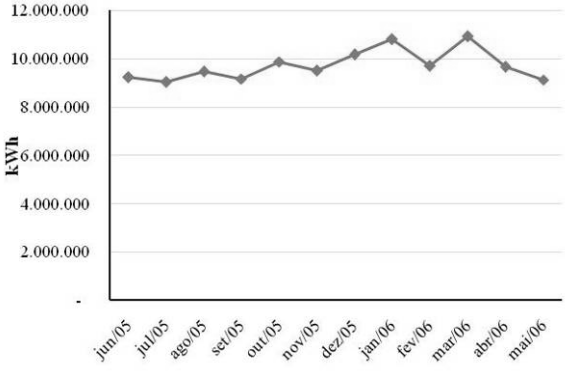
dez/05	jan/06	fev/06	mar/06	abr/06	mai/06	jun/06	jul/06	ago/06	set/06	out/06	nov/06
1.196.343	1.208.319	1.205.857	1.215.675	1.205.169	1.195.535	1.056.932	1.036.485	1.236.776	1.153.357	1.312.156	1.236.621

Aeroporto Internacional de Guarulhos - SP



jun/05	jul/05	ago/05	set/05	out/05	nov/05	dez/05	jan/06	fev/06	mar/06	abr/06	mai/06
6.492.355	6.510.996	6.499.505	6.609.600	6.861.434	6.756.653	7.224.595	7.548.811	7.217.316	7.886.570	7.321.925	6.910.834

Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro-Galeão



jun/05	jul/05	ago/05	set/05	out/05	nov/05	dez/05	jan/06	fev/06	mar/06	abr/06	mai/06
9.214.488	9.032.579	9.471.305	9.166.938	9.871.200	9.499.503	10.161.479	10.806.555	9.687.221	10.912.397	9.646.222	9.131.905

Figura 1. Consumo mensal dos seis aeroportos selecionados e respectivos períodos de medição.

2.4 Tecnologias fotovoltaicas utilizadas

Para definição do valor da eficiência da célula fotovoltaica (EFF), foram selecionadas 4 diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos (Tab. 2). A eficiência do módulo representa o percentual máximo da energia total que atinge a superfície do módulo, na forma de radiação, que pode ser efetivamente convertida pelas células fotovoltaicas. O valor da eficiência é fornecido pelos fabricantes para uma condição padrão de teste (STC - *Standard Test Conditions*), onde a potência nominal dos módulos atinge o respectivo valor, quando submetido a uma radiação de 1000 W/m^2 e a uma temperatura de 25°C.

Os modelos escolhidos abrangem um intervalo cobrindo desde tecnologias consideradas de baixa eficiência, como é o caso do silício amorfo - a-Si (6,30 %), até tecnologias consideradas de alta eficiência como a HIT - *Heterojunction with Intrinsic Thin layer* (17,40%), os quais podem ser integrados às edificações. A decisão por utilizar apenas as tecnologias mostradas na Tab.2 foi tomada em virtude da participação dessas tecnologias no mercado fotovoltaico, onde a tecnologia de silício policristalino (p-Si) e de silício monocristalino (m-Si) possuem 43,4% e 46,5% respectivamente (Photon, 2007). A tecnologia HIT foi utilizada por apresentar alta eficiência e a tecnologia a-Si, apesar da baixa eficiência, por proporcionar a aplicação em superfícies curvas, favorecendo a integração arquitetônica.

Tabela 2. Características dos módulos fotovoltaicos selecionados.

Tecnologia	Fabricante	Modelo	Potência (W)	Área (m²)	EFF_{STC}(%)
a-Si	Uni-Solar	PVL-136	136	2,16	6,30
HIT	Sanyo Solar	HIP-205BA3	205	1,18	17,40
m-Si	Shell Solar	Ultra 175-PC	175	1,32	13,30
p-Si	BP Solar	SX 3200 B	200	1,41	13,50
	Solon	Blue 220/07	220	1,61	13,41
	Sharp	ND-220U2	220	1,63	13,50
	Kyocera	KD210GX-LP	210	1,49	14,00

No entanto, na maioria das tecnologias, a eficiência da célula é dependente da sua temperatura de operação. Apenas com exceção do a-Si, todas as outras tecnologias apresentadas possuem coeficientes de temperatura (TCO_{EFF}) negativos, ou seja, que reduzem o valor efetivo da eficiência do módulo. Considerando a temperatura de operação (NOCT – *Nominal Operating Cell Temperature*) fornecida pelos fabricantes, juntamente com o valor da $TCO_{EFF,}$ através da Eq. (1) pode-se obter o valor da eficiência corrigida (EFF_{NOCT}), onde ΔT é a diferença de temperatura entre a condição padrão de teste (STC) e a temperatura de operação (NOCT) do modulo em graus Celcius (Salamoni, 2004).

$$EFF_{NOCT} = EFF_{STC} \times \left\{ \frac{\left[100 - \left(\left|TCO_{EFF}\right| \times \Delta T\right)\right]}{100} \right\} \tag{1}$$

A Tab. 3 apresenta os valores de eficiência corrigidos (EFF_{NOCT}) com os respectivos valores TCO_{EFF} e NOCT bem como os valores da área Beta (β) calculados segundo a Eq. (2) com o objetivo de se determinar a área corrigida sob os novos valores de eficiência dos módulos selecionados. Onde R_{STC} corresponde à radiação em condição padrão de teste (1000 W/m²) e P à potência dos módulos selecionados em (W).

$$\beta = P/\left[\left(EFF_{NOCT}/100\right) \times R_{STC}\right] \tag{2}$$

Tabela 3. Valores de eficiência e potência corrigidos para os módulos selecionados.

Tecnologia	TCO_{EFF}(%/°C)	NOCT (°C)	EFF_{NOCT}(%)	β (m²)
a-Si	0,00[1]	46,00	6,30	2,16
HIT	-0,29[3]	45,00	16,39	1,25
m-Si	-0,43[3]	45,50	12,13	1,44
p-Si	-0,45[3]	47,00	12,16	1,64
	-0,44[3]	45,00	12,23	1,80
	-0,40[2]	45,00	12,42	1,77
	-0,40[2]	49,00	12,66	1,45

[1] coeficiente de temperatura segundo (Rüther *et al.*, 2004)
[2] coeficiente de temperatura segundo (Nann e Emery, 1992)
[3] coeficiente de temperatura segundo os fabricantes (Sanyo, Shellsolar, Bpsolar, Solon, 2008)

2.5 Cálculo da geração solar fotovoltaica

A partir dos dados reais de área disponível para a integração dos sistemas fotovoltaicos e dados de área dos módulos pré-selecionados (Tab. 2), é possível calcular a quantidade de módulos que serão necessários e determinar o total de potência a ser instalada.

Com os dados de radiação solar para o mesmo período dos dados de consumo dos aeroportos e a potência dos sistemas previamente determinada, a geração solar fotovoltaica é calculada conforme a Eq. 3.

$$G = \left(A_D / \beta\right) \times P \times R \times F \tag{3}$$

Onde, G = geração solar fotovoltaica (kWh); A_D = área disponível (m²); β = área Beta (m²); P = potência nominal dos módulos (kW); R = radiação local (kWh/m²); F = coeficiente atribuído a perdas na transformação de corrente contínua para corrente alternada e perdas na condução de potência (0,8).

2.6 Radiação solar

A radiação solar utilizada no cálculo da geração solar fotovoltaica foi obtida para os aeroportos de São Paulo, Rio de Janeiro e Brasília por meio do programa RADIASOL[1], que possibilita o cálculo da radiação incidente no plano dos módulos fotovoltaicos.

Para o aeroporto de Florianópolis os dados de radiação mensal foram extraídos do primeiro sistema fotovoltaico conectado à rede e integrado a um edifício do Brasil, instalado em 1997 pelo LABSOLAR - Laboratório de Energia Solar (Rüther, 1998; Rüther e Dacoregio, 2000).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do cálculo de potência instalada em função da área disponível para a integração dos módulos fotovoltaicos para os seis aeroportos estudados são apresentados na Tab. 4. A partir da potência instalada foi possível realizar o cálculo da contribuição da geração solar fotovoltaica no consumo energético dos complexos aeroportuários. Os resultados e discussões para os seis aeroportos selecionados são apresentados nas seções subsequentes.

Tabela 4. Potência instalada nos seis aeroportos para os módulos selecionados em kW.

Tecnologia	Fabricante	Aeroporto de Florianópolis	Aeroporto Santos-Dumont	Aeroporto de Congonhas	Aeroporto de Brasília	Aeroporto de Guarulhos	Aeroporto do Galeão	Total
a-Si	Uni-Solar	460	787	694	1.171	2.877	3.748	9.738
HIT	Sanyo Solar	1.198	2.047	1.807	3.047	7.486	9.751	25.335
m-Si	Shell Solar	886	1.514	1.337	2.255	5.539	7.215	18.746
p-Si	BP Solar	889	1.519	1.341	2.261	5.555	7.236	18.801
	Solon	894	1.527	1.348	2.274	5.586	7.276	18.904
	Sharp	907	1.551	1.369	2.309	5.673	7.389	19.198
	Kyocera	1.057	1.806	1.594	2.689	6.606	8.605	22.357

3.1 Aeroporto Internacional de Florianópolis

Localizado na região sul do país, na capital de Santa Catarina, o Aeroporto Internacional de Florianópolis é um dos principais destinos brasileiros de turistas nacionais e internacionais. Com capacidade para 980 mil usuários, o aeroporto recebeu em 2007, 1,9 milhão de passageiros. O sítio aeroportuário se extende por nove milhões de metros quadrados e o terminal de passageiros possui área de 8.703 m².

Com base em fotos do terminal de passageiros e plantas arquitetônicas, constatou-se quais áereas poderiam ser utilizadas para a integração dos módulos fotovoltaicos. Duas áereas com aspectos diferentes foram identificadas, uma plana, abranjendo a cobertura da edificação, e a outra curva, que se projeta no caminho de acesso dos passageiros ao terminal pela via automotiva. A Fig. 2 mostra o terminal de passageiros e a área curva simulando a integração de módulos fotovoltaicos.

Analisando as características das áreas identificadas, os módulos mais adequados que poderiam ser utilizados, seriam os módulos da tecnologia a-Si para a superfície curva e os demais módulos poderiam ser integrados na superfície plana, dando preferência aos módulos com maiores valores de eficiência.

A área total de cobertura disponível é de 8.596 m², sendo que 2.826,25 m² correspondem à área curva. Para esta área o cálculo da geração solar fotovoltaica foi realizado utilizando a radiação solar no plano inclinado. Os resultados

[1] Programa desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul que possibilita o cálculo da intensidade da radiação solar em superfícies inclinadas e orientadas.

mostraram que apenas a integração na cobertura curva, a energia gerada poderia contribuir em média 10,47% no consumo mensal do complexo aeroportuário, chegando a atingir 14,14% no mês de novembro.

Figura 2. Fotos do Aeroporto Internacional de Florianópolis com a simulação da integração dos módulos fotovoltaicos na cobertura curva do aeroporto. Fonte: Autores

Os resultados da geração utilizando a área plana identificaram a tecnologia HIT como sendo a tecnologia que mais contribuiria no consumo com 49,39% em média. Os demais módulos obtiveram valores similares, em média, 37% de contribuição, diferenciando-se apenas o módulo da fabricante Kyocera, com 43,58%. Somando-se os resultados das áreas curva e plana, o total da contribuição da geração solar fotovoltaica (FV) atingiria o valor de aproximadamente 60% em média. A Tab. 5 mostra os resultados dos cálculos para as tecnologias a-Si e HIT na cobertura plana.

Tabela 5. Valores de geração solar fotovoltaica e respectivos percentuais de contribuição no consumo do complexo aeroportuário de Florianópolis para as tecnologias a-Si e HIT.

		jun/05	**jul/05**	**ago/05**	**set/05**	**out/05**	**nov/05**	**dez/05**	**jan/06**	**fev/06**	**mar/06**	**abr/06**	**mai/06**
a-Si	Geração FV (kWh)	10.170	23.350	14.113	13.875	16.477	20.305	21.882	16.703	18.781	20.644	18.488	16.477
	% de contribuição	7,51	8,14	11,75	11,34	12,97	14,14	13,24	7,02	8,19	9,13	9,34	12,85
HIT	Geração FV (kWh)	26.461	27.538	36.717	36.100	42.869	52.827	56.931	43.455	48.864	53.709	48.102	42.869
	% de contribuição	19,55	21,18	30,57	29,50	33,75	36,78	34,46	18,27	21,31	23,75	24,29	33,43

3.2 Aeroporto Santos-Dumont - RJ

Um dos aeroportos mais importantes do país, por sua localização central, passou por obras de reforma e ampliação no ano de 2007, ampliando o terminal de passageiros. Com área de 19.000 m², o complexo aeroportuário possibilita a integração dos módulos fotovoltaicos em 14.690 m² de área. A Fig. 3 mostra a imagem aérea do terminal de passageiros com as respectivas áreas disponíveis e não disponíveis e uma foto da cobertura do terminal de passageiros.

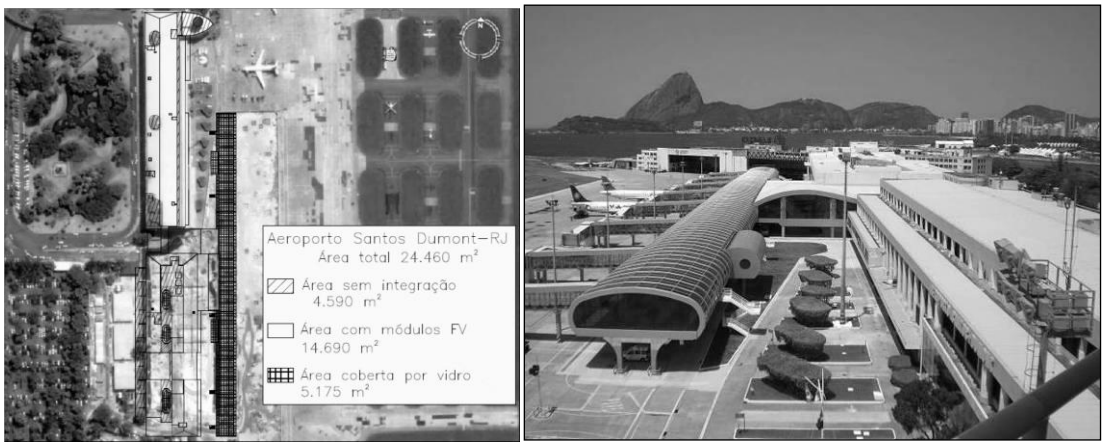


Figura 3. Imagem aérea do Aeroporto Santos-Dumont - RJ com o total de área disponível para a integração dos módulos fotovoltaicos e foto da cobertura do terminal de passageiros. Fonte: Google Earth e Autores

O cálculo da geração solar fotovoltaica foi realizado para os seis módulos selecionados. Os resultados mostraram que, para todas as tecnologias, a contribuição da geração solar chegaria a 100% ou mais para todos os meses de estudo, para os diferentes níveis de radiação solar do período estudado. Utilizando apenas módulos de a-Si, de menor eficiência, a contribuição chegaria a 145%, possibilitando ainda que o excedente de geração seja vendido à concessionária local aliando benefícios à integração dos sistemas solares fotovoltaicos. A Tab. 6 mostra os valores em média mensais da geração solar e respectivos valores de contribuição no consumo para todas as tecnologias.

Tabela 6. Valores de geração solar fotovoltaica em médias mensais e respectivos percentuais de contribuição no consumo do complexo aeroportuário Santos-Dumont-RJ para todas as tecnologias.

	a-Si	**HIT**	**m-Si**	**p-Si**			
Geração FV (kWh)	639.400	1.051.279	911.190	799.651	730.925	742.285	893.945
% de contribuição	145,05	250,36	217,00	190,44	174,07	176,77	215,67

3.3 Aeroporto Internacional de São Paulo - Congonhas

O aeroporto de Congonhas juntamente com o aeroporto Santos-Dumont, desempenha papel de importância no cenário político e econômico do país. Localizado na capital de São Paulo, o aeroporto está em constante reforma para melhor atender os passageiros, que no ano de 2007 foram 15 milhões, o segundo aeroporto em movimentação do país.

O terminal de passageiros possui área total de 64.579 m², porém as áreas disponíveis para a integração dos módulos na cobertura do aeroporto totalizam apenas 12.966,72 m². A Fig 4. mostra as áreas possíveis para a integração dos módulos fotovoltaicos e uma maquete do complexo aeroportuário.

Figura 4. Imagem aérea do Aeroporto Internacional de São Paulo - Congonhas com o total de área disponível para a integração dos módulos fotovoltaicos e maquete do complexo aeroportuário. Fonte: Google Earth e Autores.

O cálculo da geração solar fotovoltaica foi realizado para os seis módulos selecionados, e constatou-se que os módulos dos fabricantes Uni-Solar (a-Si), Solon e Sharp (p-Si) foram os que atingiram menor valor em percentual de contribuição no consumo energético do complexo aeroportuário, aproximadamente 41% (a-Si) e 50% (p-Si) respectivamente. Os demais módulos apresentaram relativamente valores próximos, diferenciando-se apenas a tecnologia HIT, e a escolha de qual módulo que poderia ser utilizado, seguiria outros critérios, como custo final do sistema. A Tab. 7 mostra os valores em média mensais da geração solar e respectivos valores de contribuição no consumo para todas as selecionadas.

Tabela 7. Valores de geração solar fotovoltaica em médias mensais e respectivos percentuais de contribuição no consumo do complexo aeroportuário Congonhas-SP para todas as tecnologias selecionadas.

	a-Si	**HIT**	**m-Si**	**p-Si**			
Geração FV (kWh)	502.079	848.196	735.168	645.176	589.727	598.892	722.616
% de contribuição	41,38	71,43	61,91	54,33	49,66	50,44	61,53

3.4 Aeroporto Internacional de Brasília-DF

Localizado na capital do país, o Aeroporto Internacional de Brasília-DF é considerado como ponto de conexão para destinos em todo o Brasil. Mais de 11 milhões de passageiros passaram por esse aeroporto no ano de 2007, é local

de grande concentração de políticos do país e do exterior. Recentemente o aeroporto inaugurou sua segunda pista de pousos e decolagens para atender a crescente demanda.

O terminal de passageiros possui área total construída de 90.100 m², e área de cobertura disponível para a integração dos módulos fotovoltaicos de 21.872,33 m². Uma grande área de cobertura teve que ser descartada por não favorecer a incidência da radiação solar e por haver muita interferência arquitetônica, como elevações e desníveis. Essa área descartada é equivalente à área em totalidade do Aeroporto Internacional de Florianópolis, o que faz ter uma grande perda de geração fotovoltaica, visto que a intensidade da radiação na região em que se encontra a cidade de Brasília é superior à de Florianópolis. A Fig 5. mostra as áreas possíveis ou não para a integração dos módulos fotovoltaicos.

Todas as tecnologias foram utilizadas no cálculo da geração fotovoltaica, e os resultados mostraram que todas tiveram uma boa contribuição no consumo do complexo aeroportuário, ultrapassando em 100% em todos os meses do período analisado. Apenas a tecnologia de a-Si atingiu 87,34% em média, porém chegando a valores superiores a 90% em alguns meses.

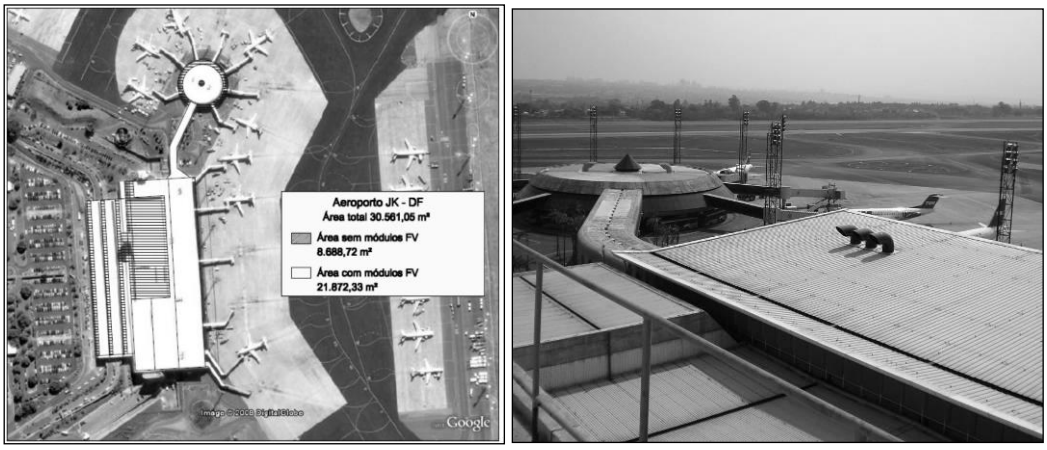


Figura 5. Imagem aérea do Aeroporto Internacional de Brasília-DF com o total de área disponível para a integração dos módulos fotovoltaicos e vista de parte da cobertura do complexo aeroportuário. Fonte: Google Earth e Autores.

As tecnologias de p-Si não diferem significativamente no valor em percentual de contribuição, com exceção do módulo do fabricante Kyocera, que se aproxima do valor obtido para a tecnologia de m-Si. Novamente, a tecnologia HIT foi a que obteve melhor resultado, atingindo valor máximo de 170% no mês de agosto. A Tab. 8 mostra os valores em média mensais da geração solar e respectivos valores de contribuição no consumo para todas as selecionadas.

Tabela 8. Valores de geração solar fotovoltaica em médias mensais e respectivos percentuais de contribuição no consumo do complexo aeroportuário de Brasília-DF para todas as tecnologias selecionadas.

	a-Si	**HIT**	**m-Si**	**p-Si**			
Geração FV (kWh)	1.073.031	1.786.893	1.548.778	1.359.192	1.242.376	1.261.685	1.517.493
% de contribuição	87,34	150,75	130,66	114,66	104,81	106,44	129,86

3.5 Aeroporto Internacional de Guarulhos - SP

Sendo o primeiro aeroporto em movimentação de passsageiros em 2007, com mais de 18 milhões de passageiros, o Aeroporto Internacional de Guarulhos opera com dois terminais de passageiros. De Guarulhos partem e chegam vôos procedentes e com destinos a 26 países, se consolidando como um importante pólo indutor do desenvolvimento sócio-econômico. O sítio aeroportuário se extende por 13 milhões de metros quadrados e seus terminais de passageiros totalizam 179.790 m². É o segundo aeroporto brasileiro em consumo energético, ultrapassando 82 GWh no ano de 2007.

Na determinação das áreas disponíveis para a integração dos módulos fotovoltaicos, constatou-se uma grande interferência de elevações na cobertura dos terminais de passageiros e uma grande área foi excluída do total de área disponível. A Fig. 6 mostra a imagem aérea do terminal de passageiros com as respectivas áreas disponíveis e não disponíveis e uma foto da cobertura do terminal de passageiros.

Os resultados do cálculo da geração solar fotovoltaica foram obtidos com base em todas as tecnologias selecionadas. O aeroporto apresenta consumo energético mensal praticamente constante durante o ano (Fig. 1), e mesmo em meses onde a intensidade da radiação é superior, o percentual da contribuição da geração solar no consumo energético permaneceu próximo à média. A tecnologia HIT foi a que teve maior contribuição, com 50,26% em média. As demais tecnologias atingiram em média 40% de contribuição, com exceção da tecnologia a-Si, que obteve apenas 29% em média. A Fig. 7 mostra o gráfico do resultado do cálculo da geração fotovoltaica para a tecnoliga HIT para o

período analisado com respectivos valores do percentual de contribuição no consumo energético do complexo aeroportuário.

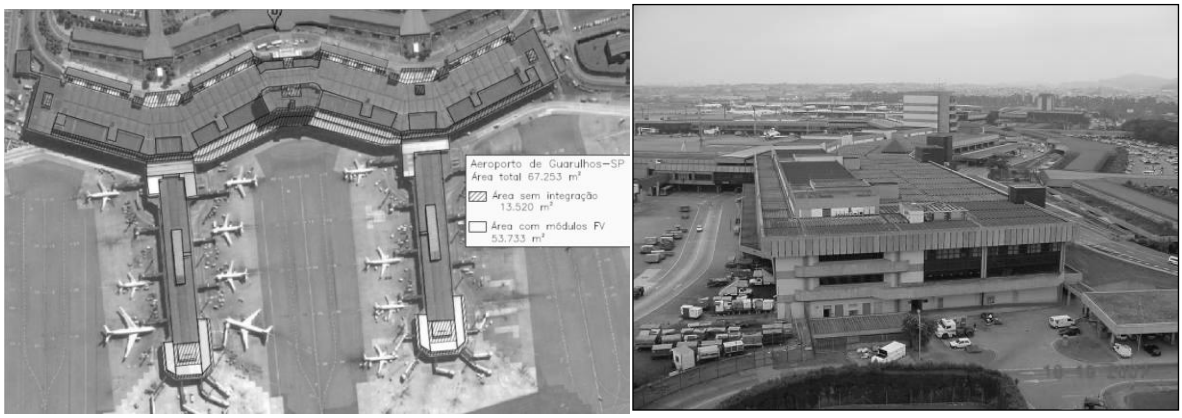


Figura 6. Imagem aérea do Aeroporto Internacional de Guarulhos-SP com o total de área disponível para a integração dos módulos fotovoltaicos e foto da cobertura do terminal de passageiros. Fonte: Google Earth e Autores

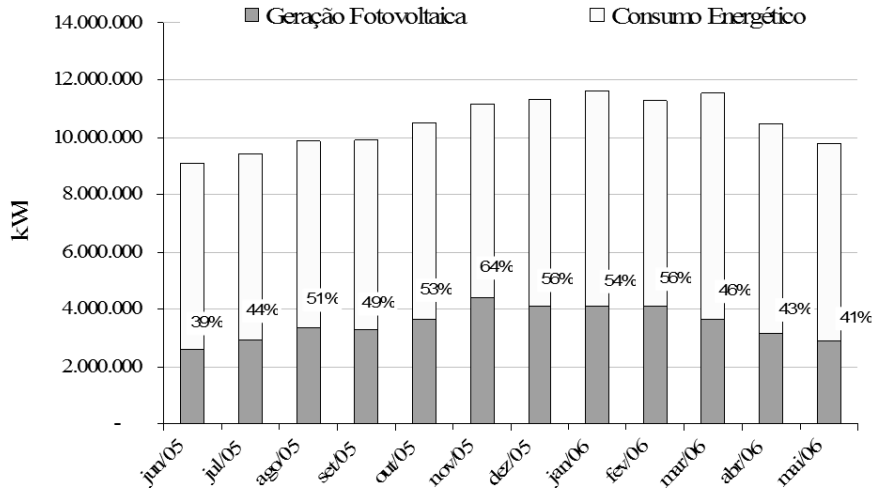


Figura 7. Geração solar fotovoltaica para a tecnologia HIT e respectivos valores do percentual de contribuição no consumo energético do complexo aeroportuário do Aeroporto Internacional de Guarulhos-SP.

3.6 Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro-Galeão

O aeroporto do Galeão é primeiro aeroporto brasileiro em consumo de energia elétrica, alcançando a cifra de 112 GWh.Assim como o aeroporto de Guarulhos, o aeroporto do Galeão opera com dois terminais de passageiros, porém, as áreas construídas totalizam 280.681 m². As áreas disponíveis para integração dos módulos fotovoltaicos somam 69.969,28 m², distribuídas na cobertura dos dois terminais de passageiros. A Fig 8. mostra as áreas possíveis ou não para a integração dos módulos fotovoltaicos.

Os resultados obtidos do cálculo da geração fotovoltaica mostraram que a contribuição no consumo energético do complexo aeroportuário chegou a níveis muito próximos aos obtidos para o aeorporto de Guarulhos. A tecnologia HIT foi novamente a que obteve melhores valores em percentual de contribuição durante o período analisado, com 50,71% em média. A Tab. 9 mostra os valores em média mensais da geração solar e respectivos valores de contribuição no consumo para todas as selecionadas.

Tabela 9. Valores de geração solar fotovoltaica em médias mensais e respectivos percentuais de contribuição no consumo do complexo aeroportuário Galeão-RJ para todas as tecnologias selecionadas.

	a-Si	**HIT**	**m-Si**	**p-Si**			
Geração FV (kWh)	2.902.068	4.938.874	4.280.738	3.756.732	3.433.860	3.487.230	4.210.627
% de contribuição	29,38	50,71	43,95	38,57	35,26	35,81	43,69

Figura 8. Imagem aérea do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro-Galeão com o total de área disponível para a integração dos módulos fotovoltaicos perspectiva geral do aeroporto. Fonte: Google Earth.

4. CONCLUSÕES

No geral todos os aeroportos apresentaram área de cobertura suficiente para suprir no mínimo 35% de sua demanda, utilizando qualquer tecnologia de módulos, com exceção da tecnologia de a-Si. Quando utilizada a tecnologia mais eficiente, HIT, o desempenho foi ainda melhor, atingindo percentuais anuais de contribuição de no mínimo 50% em todos os aeroportos.

Aeroportos com menores demandas de consumo, como o aeroporto Santos Dumont no Rio de Janeiro, tiveram grandes percentuais de contribuição da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos, já que a tipologia aeroportuária apresenta geralmente grande área disponível para instalação dos módulos, possibilitando um maior potencial de geração aliado a uma menor demanda. Uma exceção foi o aeroporto de Congonhas, que mesmo com uma demanda relativamente baixa em relação aos demais, apresentou um menor percentual de contribuição da geração FV, isso devido a uma área disponível reduzida comprometendo o tamanho do potencial fotovoltaico instalado. Nos aeroportos com maior consumo o nível de contribuição da geração FV foi determinada pela área disponível para integração da tecnologia FV. No aeroporto do Galeão, apesar da área permitir grande potencial instalado, o nível de consumo era maior ainda, assim a contribuição em percentual na energia demandada pela edificação não foi tão significativa, ocorrendo o mesmo no aeroporto de Guarulhos. Já nos casos em que uma maior demanda foi aliada à uma grande área disponível, foi possível a instalação de um maior potencial e uma geração FV com maior contribuição na demanda, como no caso do aeroporto de Brasília.

Os valores de contribuição obtidos pela geração do potencial instalado são sempre referentes ao total de geração FV ocorrido durante as horas de sol em relação à energia utilizada na edificação durantes as 24 horas do dia. Isto representa que a real penetração dos potenciais de geração irá ocorrer de acordo com a curva de demanda de cada aeroporto. Assim, aeroportos com picos de demanda diurnos serão mais propícios a utilizar maior parte da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos, já que geração e consumo são coincidentes. Nos casos em que a geração FV supera a demanda imediata, o excesso de energia pode ser injetado na rede elétrica pública, auxiliando na alimentação das edificações próximas aos aeroportos e, ainda, essa energia excedente poderia ser vendida à concessionária, aliando benefícios da integração de sistemas fotovoltaicos em edificações à rede elétrica pública.

Com uma análise mais detalhada da curva de demanda de cada aeroporto sobreposta à curva de geração, a situação de injeção de energia na rede elétrica poderá ser encontrada em quase todos os aeroportos, já que a curva de geração FV tem formato de um sino, com grandes picos de geração próximos ao meio dia solar. Nestes horários então deverá haver níveis de energia gerada superiores à demanda, mesmo nos casos onde a contribuição é próxima a 35%. Isso demonstra que a instalação de geradores FV em edificações aeroportuárias apresenta potenciais de contribuição na própria demanda da edificação, e também é um meio de auxiliar a rede urbana na alimentação das edificações próximas aos aeroportos.

A integração de sistemas fotovoltaicos em aeroportos demanda elevados valores de potência instalada, como os mostrados na seção 3. Tal demanda poderá impulsionar o crescimento do mercado fotovoltaico proporcionando a redução de custos e ainda atrair investidores e fabricantes da tecnologia solar fotovotaica ao Brasil, um dos países com mairoes níveis de radiação solar do mundo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Alexander von Humboldt (Alemanha) pelo financiamento do sistema solar fotovoltaico que deu origem às medições da geração solar fotovoltaica em Florianopolis, ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro durante o período de desenvolvimento deste trabalho e à INFRAERO e à CELESC pelo apoio à pesquisa realizada.

REFERÊNCIAS

BpSolar. **Solar Module Datasheet**. Disponível em: <http://www.affordable-solar.com/admin/ product_doc/ Doc_BP %203200%20B%20Data%20Sheet_20071022171853.pdf>. Acesso em: Fevereiro 2008.

Braun, P.; Jardim, C. D. S.; Rüther, R. Análise de Contribuição Energética de Sistemas Fotovoltaicos Integrados em Edificações: Aeroporto Internacional de Florianópolis. In: IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2007, Ouro Preto, MG, **Anais...** Porto Alegre, RS: Anais do ENCAC 2007, 2007. p. 260-269.

Marinoski, D. L.; Salamoni, I. T.; Rüther, R. Pré-dimensionamento de sistema solar fotovoltaico: estudo de caso de edifício sede do CREA-SC. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável & X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2004, São Paulo, Brasil, **Anais...** Porto Alegre, RS: Anais do ENTAC 2004, 2004.

Miyazaki, T.; Akisawa, A.; Kashiwagi, T. Energy savings of office buildings by the use of semi-transparent solar cells for windows. **Renewable Energy.** v.30, p.281-304, 2005.

Nann, S. Emery, K. Spectral Effects on PV - Device Rating. **Solar Energy Materials & Solar Cells.** v.27, p.189-216, 1992.

Ordenes, M.; Marinoski, D. L.; Braun, P.; Rüther, R. The impact of building-integrated photovoltaics on the energy demand of multi-family dwellings in Brazil. **Energy & Buildings.** 2006.

Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Abreu, S. L. D.; Rüther, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar:** (Brazilian Atlas of Solar Energy), São José dos Campos: INPE, 2007. ISBN 85-17-00030-7.

Photon-International. **PV Market Survey:** The Photovoltaic Magazine Aachen, Germany, 2007.

Rüther, R. Experiences and Operational Results of the First Grid - Connected, Building - Integrated, Thin Film Photovoltaic Installation in Brazil. In: 2nd World Conference and Exhibition of Photovoltaic Solar Energy Convertion, 1998, Vienna, Áustria, **Anais...** Viena, Áustria: Anais da 2nd World Conference and Exhibition of Photovoltaic Solar Energy Convertion, 1998. p. 2655-2658.

Rüther, R. Braun, P. Solar Airports. **Refocus**, Inglaterra, p.30-34, July/August, 2005.

Rüther, R. Dacoregio, M. Performance Assessment of a 2kWp Grid-Connected Building Integrated, Amorphous Silicon Photovoltaic Installation in Brazil. **Progress in Photovoltaic: research and application**, v.7, p.257-266, 2000.

Rüther, R.; Dacoregio, M.; Zomer, C. **Performance Results of the First Grid Connected Thin Film PV Installation in Brazil: High Performance Ratios Over Six Years of Continuous Operation**. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Paris, França, 2004.

Salamoni, I. T. **Metodologia para cálculo de geração fotovoltaica em áreas urbanas aplicada a Florianópolis e Belo Horizonte.** (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

Sanyo. **Solar Module Datasheet**. Disponível em: <http://us.sanyo.com/solar/downloads /Solar%20Cutsheet %20All% 20HIP-xxxBA3%20Models%20-%20Effective%201%20April%202007.pdf>. Acesso em: Fevereiro 2008.

ShellSolar. **Solar Module Datasheet**. Disponível em <http://www.shell.com/ static/ shellsolar/ downloads/ products/ pil_offgrid_ultra_175_us.pdf>. Acesso em: Fevereiro 2008.

Solon. **Solar Module Datasheet**. Disponível em: <http://www.solon-pv.com/download/pdf/blue_220_07_de.pdf>. Acesso em: Fevereiro 2008.

Abstract. *Photovoltaic solar energy as renewable energy source has many different uses. One of them is the photovoltaic systems integrated at commercial buildings, because in the most of the times, the demand curve is coincident to the solar generation curve due to the air conditioners use. The building integrated PV system (BIPV) is becoming more important day by day in the whole world and it could be an interesting way to the Brazilian distributed energy generation. Airport buildings are typically big and sunny, with no significant shadows, with perfect roofs and façades to accommodate photovoltaic solar modules. The present article aims to analyze the energy contribution of BIPV using different photovoltaic technologies integrated at the architecture. For this, it was selected six Brazilian airports, in five cities (Florianópolis, Brasília, São Paulo, Guarulhos e Rio de Janeiro) located at different regions of the country. For the BIPV simulations, it was used monthly energy consumption date of one year for each airport. Photovoltaic solar generation was calculated based on solar radiation data for each city and it was based on each technology's efficiency. Considering the different photovoltaic technologies available at the market and each building's integration, it was observed that, in the best case, the total generated energy could contribute with 50%, in average, of the total energy consumption of one year. Using photovoltaic technology in big areas causes big installed potentials, and it can stimulate the growth of the Brazilian photovoltaic market. Moreover, this growth market can provide cost reductions and attracts investors and manufactures of this technology.*