



XIENCAC
ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

VIIELACAC
ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

Búzios - RJ - 2011

PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO: ESTUDO DE CASO EM ESCOLA PUBLICA EM CURITIBA

Raphaella W. Fonseca (1); Ricardo Rüther (2); Fernando O. R Pereira (3)

(1) Arquiteta, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, raphawf@labcon.ufsc.br

(2) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, LabSOLAR/UFSC ruther@mbox1.ufsc.br

(3) PhD, Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, LabCon/UFSC feco@arq.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental, Cx Postal 476, Florianópolis-SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721 4974

RESUMO

Com a crescente atenção para as fontes renováveis de energia, a geração solar fotovoltaica (FV) está se tornando cada vez mais aplicável. O BP Statistical Review of World Energy 2010 mostra que a potência instalada FV cumulativa mundial de 2008 para 2009 aumentou em 47%. O uso da energia FV integrada às edificações permite que a energia seja gerada próximo ao seu ponto de consumo, minimizando perdas na transmissão, custos e danos ao meio ambiente. Outro potencial é a utilização de FV em edificações que operam em horário comercial, pois assim a curva de demanda aproxima-se com a curva de geração solar, como ocorre na escola abordada neste estudo de caso. O presente trabalho teve o objetivo de investigar diferentes tecnologias fotovoltaicas e formas de integrá-las com a arquitetura. Para isto foi realizado um levantamento de dados do local e das potencialidades da edificação, seguido do anteprojeto FV que buscou comparar algumas tecnologias e quatro cenários possíveis. Os resultados mostraram a importância de sistemas FV integrados à edificação serem idealizados nas fases iniciais de projeto, evitando o auto-sombreamento da edificação, a adição de novos elementos e o aumento dos custos. Concluiu-se, também, que a forma, o tamanho e a eficiência dos painéis são fatores determinantes para acomodação do sistema FV, e a sua escolha implicará diretamente no partido arquitetônico da edificação. Através da variação de tecnologia e de anteprojeto, todos os cenários avaliados, puderam enquadrar a edificação como “Zero Energy Building”.

Palavras-chave: energia solar fotovoltaica, SFRCR, sistemas FV integrados à edificação.

ABSTRACT

Due to the increasing interest in the renewable energy sources, solar photovoltaic generation (PV) is being largely applied. The BP Statistical Review of World Energy 2010 indicates that the world cumulative PV power installed showed an increase of 47% from 2008 to 2009. The use of photovoltaic solar energy integrated to buildings, allows such power to be generated close to its consumption point, minimizing transmission loss, cost and environmental damage. Another alternative use of PV is in buildings that operate within the working hours, allowing the demand curve to approximate to the solar generation curve, as it happened in the school case tackled in this study. The aim of the present work was to examine and study different types of photovoltaic technology and find ways of integrating them to the building's architecture. To achieve such purpose, a survey was carried out in order to collect data from the site as well as from the building potentiality, followed by a PV pre-dimensioning which aimed at comparing some technologies and four possible sceneries for the building. The results indicated the crucial role the BIPV systems play in the early stages of design, and that they therefore must be implemented in such stages, avoiding the building self shading, the addition of new elements and raise of costs. It was also concluded that the panels shape, size and efficiency are key factors .to set up the FV system and their choice will have significant impact in the architectural building central ideas. All sceneries were checked with different technology and pre-design projects what allowed us to consider this building as a “Zero Energy Building”

Keywords: solar energy, grid-connected photovoltaic systems, BIPV.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados como sistemas autônomos e sistemas ligados à rede (SFCR). Estes últimos podem ser instalados na própria edificação, no caso da energia gerada pelo sistema não ser suficiente a demanda pode ser suprida pela rede e no caso da geração exceder a demanda a energia pode ser injetada na rede (RÜTHER, 2004).

Entre soluções de integração de sistema solar fotovoltaico na edificação estão às soluções aditivas e às soluções integrativas. Numa solução aditiva, os módulos fotovoltaicos são fixados no topo do telhado ou na fachada, através de uma estrutura metálica. Já em soluções integrativas, os componentes do telhado ou da fachada do edifício, são substituídos por elementos fotovoltaicos (COMISSÃO EUROPÉIA, 2004).

De acordo com Rüter (2004) painéis solares fotovoltaicos são projetados para ambientes externos, resistindo bem aos agentes climáticos e operando de forma satisfatória por períodos de 30 anos ou mais. Sendo assim, são apropriados para a integração à edificação podendo além de gerar energia funcionar como elemento arquitetônico. Rüter e Montenegro (2001) colocam que os sistemas solares fotovoltaicos podem ser incorporados esteticamente, sendo que em um futuro próximo, se tornarão competitivos em termos de custos com as tradicionais formas de energia. Os sistemas solares fotovoltaicos (FV) em filme fino, quando em módulos semitransparentes podem substituir os vidros com película. Já os módulos opacos podem substituir o mármore e outros materiais de alto custo. Castanheira e Corbella (2010) em estudo realizado sobre a influência do sombreamento produzido pelos FV nas coberturas no Rio de Janeiro mostraram que a redução da carga térmica é significativa. Assim além de produzir energia, o edifício pode economizar no sistema de condicionamento de ar. Por outro lado, no inverno, ou em locais frios (como em Curitiba, zona bioclimática 1), apesar do sistema FV produzir mais energia o fator sombra pode ser negativo, incrementando gastos de energia com aquecimento.

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo o estudo de sistemas solares fotovoltaicos integrados à edificação, através do desenvolvimento de anteprojetos para uma edificação escolar. Os sistemas visam suprir o máximo possível do consumo da edificação, comparando diferentes tipos de tecnologia e enfatizando as características arquitetônicas que potencializam ou não a integração FV à edificação.

3. MÉTODO

O pré-dimensionamento dos sistemas solares fotovoltaicos foi realizado buscando atingir o objetivo deste trabalho de suprir o consumo da escola possibilitando reflexões sobre a integração dos FV com a arquitetura. Inicialmente foi realizado um levantamento de dados do local e das potencialidades da edificação, seguido do anteprojeto FV que buscou comparar algumas tecnologias e alguns cenários possíveis para a edificação.

3.1. Levantamento de dados

A escolha do objeto de estudo se deu através de contato realizado com a Prefeitura Municipal de Curitiba (PMC) que gentilmente forneceu o projeto da Escola Municipal Otto Bracarense Costa (CIC Barigüi), figura 1. Adicionalmente foi feito um levantamento fotográfico do local. Situada à Rua Desembargador Cid Campelo, 4061 - Cidade Industrial em Curitiba, ver implantação na figura 2, a escola encontra-se em funcionamento a dois anos.



Figura 1 – Escola Municipal Otto Bracarense Costa.
Fonte: o autor, em 09/2010



Figura 2 – Implantação Escola Municipal Otto Bracarense Costa
Fonte: PMC

3.1.1. Descrição do local

A escola possui área total de 2.795,20 m² dividida em dois pavimentos, e abriga alunos do ensino médio e fundamental. O Padrão de uso da escola pode ser classificado da seguinte forma: para os dias úteis das 07hrs às 18hrs e para sábados uso eventual.

O edifício é dividido em 7 volumes com alturas diferentes, consequência de platibandas com dimensões variadas. Os volumes são dispostos de forma descontraída, o que confere movimento à fachada.

A área total de cobertura corresponde à área 1.247,48m², divididos em 10 águas, sendo 8 cobertas com telha de aço zincado perfil ondulado e duas com laje impermeabilizada. As fachadas apresentam elementos de proteção solar como brises e prateleiras de luz.

3.1.2. Áreas disponíveis para a instalação dos painéis

Grande parte da superfície dos edifícios é adequada à instalação de campos fotovoltaicos, quer nas fachadas quer nos telhados, sejam estes inclinados ou planos (COMISSÃO EUROPEIA, 2004). No entanto normalmente existem elementos da própria edificação que podem causar o sombreamento de superfícies.

Sabe-se que o sombreamento de painéis ou de regiões deste pode produzir perdas na capacidade de geração de energia (MARINOSKI et al, 2004). A fim de evitar a ocupação destas áreas com painéis que poderiam prejudicar o funcionamento do sistema foi realizado um estudo de insolação no programa Sketch Up Pro 7.

As simulações foram realizadas com ênfase na cobertura da edificação, posto que as superfícies verticais possuem menor potencial de aproveitamento da radiação. Além disso, o edifício é composto por vários volumes descontraídos, o que causa auto-sombreamento em grande parte das fachadas. As simulações de insolação foram realizadas para os três principais pontos de declinação solar (equinócios, solstício de inverno e verão), durante o período das 06:00h às 18:00h.

3.1.3. Consumo de energia elétrica mensal

Os dados de consumo médio mensal de energia elétrica foram fornecidos pela Prefeitura Municipal de Curitiba através de tabela Excel. Os dados constam do período de janeiro de 2009 a julho de 2010. Os valores de consumo se mostraram bastante irregulares, sendo muito baixo para os 8 primeiros meses, com um pico no mês de setembro de 2009 (provavelmente compensando os meses anteriores) para então atingir certa regularidade. Nos meses de fevereiro e março de 2010 o consumo decaiu novamente, o que poderia ser consequência das férias escolares. Devido às irregularidades do consumo optou-se por adotar para este trabalho um consumo médio diário de 107,82kWh/dia resultado da média de todos os valores fornecidos desde o início das atividades da escola. A escola não possui ar condicionado e foi inaugurada recentemente, não havendo um histórico adequado para justificar estas irregularidades.

3.2. Proposta de projeto FV

Visando atingir o objetivo proposto foram criados 4 cenários para o estudo de FV integrados à edificação.

3.2.1. Potencial de radiação solar

A radiação global incidente em uma superfície é um dos principais dados para se iniciar um projeto fotovoltaico. A disponibilidade de radiação depende da inclinação e da orientação da superfície e é necessária para o cálculo da potência gerada pelos painéis. Através do programa Radiasol 2.1, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade do Rio Grande do Sul foram obtidos os valores das médias mensais do total diário de radiação solar ao longo do ano. Os ângulos de inclinação analisados para efeito de testes foram: 0° (horizontal) e 25° (latitude local). Para os cenários foram adotadas angulações compatíveis com os anteprojetos. Os desvios azimutais avaliados foram: 0° para efeito de teste das tecnologias; e para os cenários foram adotados os desvios azimutais correspondentes a cada plano de trabalho adotado na cobertura.

3.2.2. Dimensionamento do sistema

O dimensionamento do sistema FV se deu em função da potência nominal instalada necessária para atender o consumo diário da edificação e da área total necessária para a implantação deste sistema.

As estimativas destas variáveis devem prover condições de avaliar o potencial da edificação de manter-se independente da rede elétrica pública através do uso da energia solar.

A potência nominal instalada necessária para suprir o consumo diário da edificação é dada pela Equação 1:

$$P_{CC} = \frac{\left(\frac{E}{\frac{G_{POA}}{G_{AM1,5}}} \right)}{R} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

P_{CC} = Potência média necessária ou Potência nominal instalada (kW Pcc)

E = Consumo médio diário durante o ano (kWh/dia)

G_{POA} = Radiação solar-média mensal do total diário (kWh/m²/dia) no plano do gerador solar fotovoltaico

$G_{AM1,5}$ = Irradiância padrão igual à 1kW/m²

R = Rendimento do sistema (%), adotado da literatura 0.8

Já a área necessária para a instalação dos painéis fotovoltaicos é dada pela equação 2. Vale salientar que esta área não inclui eventuais espaçamentos para circulação visando à manutenção do sistema ou distanciamentos necessários para evitar o sombreamento dos painéis quando estes são dispostos de forma inclinada.

$$A_{TOTAL} = \left(\frac{P_{CC}}{E_{FF}} \right) \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

A_{total} = Área total do sistema (m²)

P_{CC} = Potência média necessária ou Potência nominal instalada (kW Pcc)

E_{ff} = eficiência do painel fotovoltaico (kW/m²)

Outros fatores ainda vão caracterizar o projeto fotovoltaico, como a disposição dos arranjos. A quantidade de módulos ligados em série irá determinar a tensão de operação do sistema em CC¹. A corrente do gerador solar é definida pela conexão em paralelo de painéis individuais ou strings². Os strings são conectados em paralelo ao inversor respeitando a potência máxima de CC. A potência instalada é dada pela soma da potência nominal dos módulos individuais (RÜTHER, 2004).

3.2.3. Base de dados – FVs e Inversores

De acordo com Rüter (2004), instalações FV ligadas à edificação são compostas de elementos como: painéis FV, sistema de fixação, inversores, diodos by-pass e diodos de bloqueio, fusíveis e disjuntores, cabos elétricos, terminais, proteções contra sobre tensões e descargas atmosféricas e caixas de conexões. Como este trabalho tem efeito apenas de anteprojeto, serão levantados somente os painéis FV e inversores.

Foram selecionados 8 painéis FV de diferentes marcas e tecnologias para avaliação, de modo a visualizar quais seriam os mais adequados aos objetivos de cada cenário montado para o estudo. A partir da triagem nestes painéis foram selecionados inversores compatíveis. A base de dados para a escolha dos inversores foi a Sunny Family Catalog. São os inversores que convertem a energia gerada em CC pelos módulos FV para CA³ necessária para a rede elétrica.

3.2.4. Cenários

Visando suprir o máximo possível do consumo da edificação comparando diferentes tipos de tecnologia, relacionando as características arquitetônicas que potencializam ou não a integração FV à edificação foram estruturados os seguintes cenários, como mostra a tabela 1.

Tabela 1– Objetivos dos cenários.

Cenários	Objetivo
Cenário 01	Utilização da tecnologia de menor custo aparente.
Cenário 02	Utilização da tecnologia flexível de silício amorfo.
Cenário 03	Utilização de tecnologia que não necessitasse de intervenção arquitetônica.
Cenário 04	Utilização da tecnologia com maior eficiência encontrada.

¹ CC - Corrente Contínua.

² Strings - Conjunto de n painéis conectados em série, cujas tensões de saída se somam até atingir a tensão de entrada do inversor.

³ CA - Corrente Alternada

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Este item descreve primeiramente os estudos feitos com relação à arquitetura, buscando entender quais pontos favorecem ou atuam como complicador na instalação de FV integrados à edificação. Posteriormente é realizado um comparativo entre diferentes tecnologias fotovoltaicas buscando obter um panorama das potencialidades das tecnologias mais facilmente encontradas. Finalmente apresentam-se os resultados dos quatro cenários buscando mostrar como as relações da tecnologia escolhida com a arquitetura e a quantidade de energia que se pretende suprir estão intimamente ligadas e devem ser consideradas conjuntamente.

4.1. Estimativa de sombreamento

Como a escola possui apenas dois pavimentos, a área disponível de cobertura, proporcionalmente a área do edifício é relevante, como ilustra a figura 3. Entretanto, esta se encontra bastante fragmentada, além de que praticamente todas as águas da cobertura são circundadas por platibandas com alturas que variam de 1,7m a 3,65m. A figura 3 traz a numeração dos Planos de Trabalho (PT) que serão utilizadas ao longo do texto.

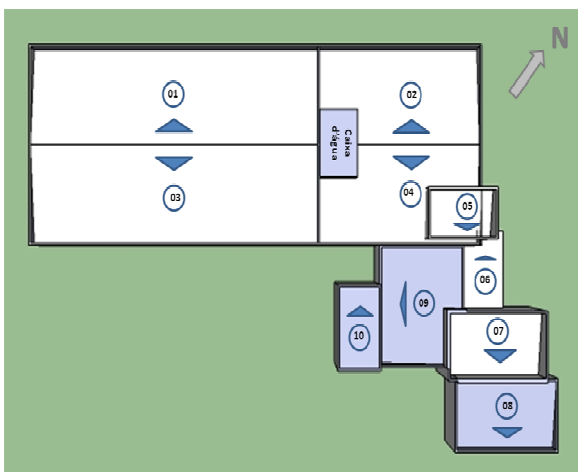


Figura 3 – Planos de trabalho possíveis na cobertura do edifício.

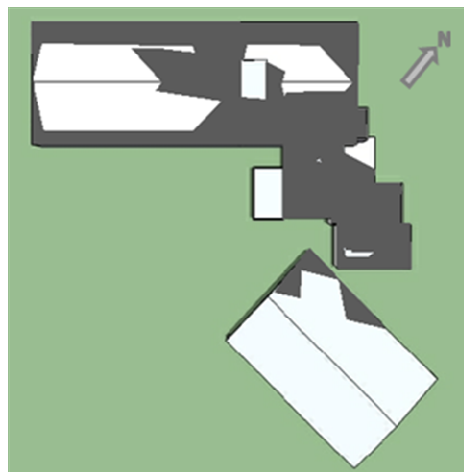


Figura 4 – Área atingida pela trajetória da sombra a ser desconsiderada para a implantação dos painéis, incluindo possível cobertura da quadra de esportes.

As diferenças de altura entre os blocos, somadas às platibandas e à caixa d'água produzem um auto-sombreamento significativo na cobertura, reduzindo expressivamente a área disponível para a disposição dos módulos FV (*área remanescente, figura 4).

Como foi constatada grande perda na área útil da cobertura acrescentou-se uma cobertura hipotética na quadra de esportes localizada à sudeste da edificação a fim de ampliar as possibilidades de estudo. Através do estudo de sombras, observou-se que devido às características arquitetônicas da edificação, se fosse considerado o sombreamento durante o período das 06:00h às 18:00h praticamente não existiriam áreas para a colocação dos painéis FV, reduzindo ou inviabilizando o aproveitamento da energia solar. Optou-se então por considerar a área sombreada das 08:00h às 16:00h. Como aproximação, os horários desconsiderados tiveram sua radiação correspondente subtraída do cálculo do G_{POA} . A figura 4 mostra a soma total ao longo do ano do sombreamento para as três datas escolhidas para este intervalo horário.

4.2. Aproveitamento da radiação solar

A cobertura da escola foi dividida em vários planos de trabalho (PT), correspondente a cada água da edificação. Os PTs têm orientações e inclinações diferentes. Sabe-se que o melhor rendimento do módulo FV se dá quanto este está voltado para o Norte e sua inclinação corresponde à inclinação ótima para a incidência solar máxima em regime anual dada pela latitude local. Foram feitos testes no programa Radiaol 2.1 com as coordenadas de Curitiba (lat. 25°33'S, long. 49°23'W) para um desvio azimutal de 0°, obtendo-se um G_{POA} de 4,916 kWh/m²/dia, figura 5. A figura traz ainda as inclinações ótimas para os casos de verão e de inverno, sendo 5° e 45° respectivamente.

Apesar de 25° ser a inclinação ótima para a eficiência dos painéis, não foram verificadas perdas significativas na utilização da inclinação dos PTs aplicadas aos cenários. Além disso, foram realizadas simulações de sombra para os painéis inclinados a 25° concluindo-se que para garantir que os painéis não sombreassem uns aos outros a área para a implantação dos mesmos teria que ser significativamente maior.

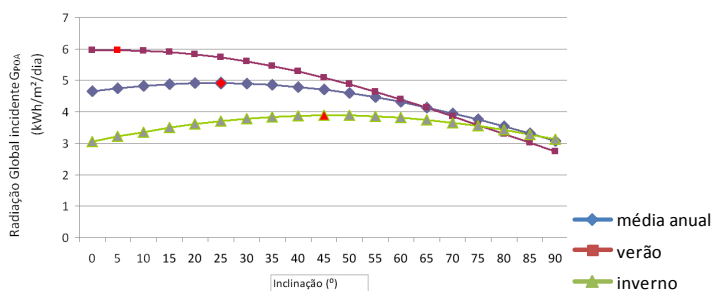


Figura 5 – Radiação global Incidente para desvio azimutal 0°, conforme a inclinação.

4.3. Seleção de módulos FV e inversores

A tabela 2 traz os módulos escolhidos para avaliação prévia que serviu como base para a escolha das tecnologias a serem utilizadas nos cenários. O critério para esta primeira seleção dos módulos foi à eficiência, tamanho e tipo diferenciado de tecnologia (ex.: semitransparente e flexível).

Tabela 2– Características dos materiais utilizados na simulação computacional.

Fabricante	Sunmodelo	Sunmodelo	RWE SOLUTION- ASI	UNISOLAR	Kyocera	SANYO		SUNPOWER
Modelo	SW85 - mono/R5E	SW50 -mono/R5C	ASE-30-DG-UT- 36Vdc semitransp	PVL 144	KC-85T	HIT N225SE10	NEWHIT HD 250	E19/318
Tipo de célula	Silício Monocristalino	Silício Monocristalino	Silício Amorfo	Silício Amorfo	Silício Policristalino	Silício Monocristalino		Silício Monocristalino
Potência Nominal (W)	85	50	27	144	87	225	250	318
Comprimento (m)		0.861		5.486	1.007	1.58	1.61	1.046
Largura (m)		0.536		0.394	0.652	0.798	0.861	1.559
Espessura (m)		0.034		0.016	0.058	0.035	0.035	0.018
Eficiência (%)	13.44	10.83	4.50	6.66	13.25	17.85	18.03	19.50
Voltagem MPP (V)	17.8	16.2	36	31	17.4	41.6	34.9	54.7
IMPP (A)	4.78	3.1	0.75	4.36	5.02	5.42	7.18	5.82
Peso (kg)		5.5			8.3	15		18.6

Os inversores foram selecionados visando à compatibilidade com os painéis. Foram escolhidos o Sunny Tripower 10.000TL, o Sunny Tripower 15.000TL e o Sunny Mini Central 11.000TL. A tabela 3 mostra os principais dados dos inversores

Tabela 3– Características dos materiais utilizados na simulação computacional.

Input DC	Inversor	Sunny Tripower 10.000TL	Sunny Tripower 15.000TL	Sunny Mini Central 11.000TL
	Max DC Power (W)		10400	15600
PV voltage range MPP(V)		150-800	150-800	330-500
Max input current (A)		22	33	34
Max number off paralel string		4	5	5

4.4. Dimensionamento dos sistemas para as diferentes tecnologias

Primeiramente foi feito um pré-dimensionamento do sistema utilizando as tecnologias da na tabela 2. Este pré-dimensionamento serviu para comparar as tecnologias.

Na primeira etapa foi feito o cálculo da potência nominal necessária e da área. Para tanto foram assumidas algumas condições iniciais. O consumo médio diário da edificação foi a média do consumo diário de todos os meses fornecidos pela Prefeitura Municipal de Curitiba, equivalente a 107,82kWh/dia. O ganho diário por radiação solar incidente no sistema FV foi considerado supondo a inclinação dos painéis igual a 0° e com desvio azimutal em relação ao norte também de 0°. O ganho médio total de radiação para Curitiba extraído do programa Radiasol 2.1 foi de 4,654kWh/m²/dia. Através da equação 01 foi determinada a potência nominal instalada (Pcc) necessária de 28,96kWpcc para atender a demanda da escola. Isto, considerando um rendimento do sistema de 0,8 conforme a literatura.

Para o cálculo da área necessária para a implantação do sistema FV foi estimada uma eficiência de conversão de 16%, considerada relativamente alta. Nesta fase do estudo ainda não está definido qual o painel FV será adotado. Como cada tecnologia/fabricante possui graus de eficiência diferentes, a suposição foi o

método utilizado. Aplicando a equação 2 chegou-se a uma área necessária para a geração FV de 180,99m².

Neste caso, o PT3 sozinho já teria área remanescente suficiente para a colocação dos painéis e suprir a demanda energética da escola. Entretanto adaptando a inclinação e orientação às características do PT3, a área necessária aumentou. Além de que o formato irregular da sombra e o formato rígido dos painéis fizeram com que esta área disponível não fosse 100% aproveitada. Logo, foi necessário partir para o desenvolvimento de cenários buscando alternativas de distribuição dos painéis. Considerou-se que cada arranjo correspondente a um inversor deve ter as mesmas características de orientação e inclinação.

A tabela 4 traz em seu topo os cálculos iniciais descritos acima. Em uma segunda parte traz os 8 equipamentos escolhidos para teste posicionados com desvio azimutal 0° em relação ao norte e inclinados a 25°, correspondente a latitude local.

Tabela 4: Comparativo de tecnologias através de pré-dimensionamento estimado.

Primeira estimativa - Dados iniciais para inclinação 0° e azimute 0°.									
E_{dia} (KWh/dia)	107.82		R		0.80		A_{ESTIMADA} (m ²)		180.99
G_{POA} (AZ0-0°) (KWh/m ² /dia)	4.65		P_{cc} (KW _{pcc})		28.96		Eff_{estimada} (%)		16.00
Painel	Sunmodule SW85/R5E	Sunmodule SW50mono/R5C	Rew Solution-ASI -ASE-30-DG-UT	Unisolar PLV144	Kyocera KC 85T	SANYO HIT SE10	Sanyo NewHit 250	SUNPOWER E19/318	
Tecnologia	Silício Monocristalino	Silício Monocristalino	Silício Amorfo	Silício Amorfo	Silício Policristalino	Silício Monocristalino		Silício Monocristalino	
A _{painel} (m ²)	0.6324	0.4615	0.6000	2.1615	0.6566	1.2608	1.3862	1.6307	
Inclinação (°)	25	25	25	25	25	25	25	25	
V _{MPP} (V)	17.8	16.2	36	31	17.4	41.6	34.90	54.70	
Eff (%)	13.44	10.83	4.50	6.66	13.25	17.85	18.03	19.50	
G _{POA} (AZ0-25°)(KWh/m ² /dia)	4.92	4.92	4.92	4.92	4.92	4.92	4.92	4.92	
P _{cc} (KW _{pcc})	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	
A _{INICIAL} (m ²)	203.97	253.04	609.24	411.52	206.90	153.63	152.02	140.59	
N ^o _{MODULOS-INICIAIS}	323	548	1015	190	315	122	110	86	
I _{MPP}	4.78	3.10	0.75	4.36	5.02	5.42	7.18	5.82	
Inversor Sunny Tripower 10.000TL			Max DC power			10400 W			
Input DC			PV voltage range MPP			150-800 V			
			Max input current			22 A			
			Max number of parallel string			4			
N ^o _{INVERSORES}	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	
	3	3	3	3	3	3	3	3	
P _{FASE} (W _p)	9138.53	9138.53	9138.53	9138.53	9138.53	9138.53	9138.53	9138.53	
	9200	9200	9200	9200	9200	9200	9200	9200	
N ^o _{MOD/INV}	107.51	182.77	338.46	63.46	105.04	40.62	36.55	28.74	
Max number of parallel string				4					
I _{MPP LIMITE/INVERSOR(22A)}	19.12	12.40	3.00	17.44	20.08	21.68	28.72	23.28	
	26.88	45.69	84.62	15.87	26.26	10.15	9.14	7.18	
N ^o _{MODULOS/STRING}	27	46	85	16	27	11	10	8	
PV _{LIMITE(150-800V)}	480.6	745.2	3060	496	469.8	457.6	349	437.6	
N ^o _{MODULOS/INVERSOR}	108	184	340	64	108	44	40	32	
N ^o _{MODULOS}	324	552	1020	192	324	132	120	96	
P _{INV} (W _p)	9180	9200	9180	9216	9396	9900	10000	10176	
A _{FINAL} (m ²)	205	255	612	415	213	166	166	157	
A _{módulos/inversor} (m ²)	68	85	204	138	71	55	55	52	
P _{(KW)TOTAL}	27.54	27.60	27.54	27.65	28.19	29.70	30.00	30.53	
E _{GERADA} (KWh/dia)	108	109	108	109	111	117	118	120	
Custo do sistema (USD)	137700	138000	137700	138240	140940	148500	150000	152640	
Payback (anos) - simplificado	14	14	14	14	14	14	14	14	
Payback (anos) - TIR 6%	30	30	30	30	30	34	35	37	

O painel SW40mono/R5C chama atenção por apresentar a menor área de módulo, entretanto devido à sua eficiência ser inferior ocuparia uma área para implantação do sistema maior que outras tecnologias.

Os dois painéis da Sanyo e o da SUNPOWER foram os que apresentaram as maiores eficiências e

conseqüentemente as menores áreas necessárias para a colocação dos painéis.

Como esta comparação usou o módulo Sunmodule SW85/SER como base, foi adotado o inversor Sunny Tripower 10.000TL. Observou-se que os módulos ASI-ASE-30-DG-UT, o SANYO NEWHIT 250 e o SUNPOWER E19/318 não eram compatíveis com este inversor. Para os painéis que foram utilizados nos cenários e não eram compatíveis com o inversor do piloto foram escolhidos outros inversores adequados.

Na terceira parte da tabela ainda pode-se notar a área final a ser ocupada pelos módulos e o número de módulos por inversor. Este dado foi considerado importante, pois auxilia na distribuição dos arranjos em diferentes PTs, já que na maioria dos casos não será possível alocar todos os módulos em apenas um PT devido à limitação de área remanescente.

Fazendo uma aproximação de custos dos sistemas Sunmodule SW85/RSE e SW40mono/R5C seriam os menos custosos enquanto que o SUNPOWER E19/318 seria o mais oneroso. Cabe salientar que esta aproximação foi feita considerando \$5.000,00(USD)/KWp. Logo o sistema que está gerando mais energia é o mais caro. Não foram levados em consideração os custos reais dos equipamentos. O payback simplificado de todos os sistemas ficaria em torno de 14 anos, considerando o dólar a 1,66 USD e o custo do kWh/mês referente a julho de 2010 de R\$ 0,4196. Já um payback realizado considerando Taxa Interna de Retorno (TIR) de 6% indica que o sistema se pagaria em 30 anos. Sabe-se que estes custos podem ainda ser amortizados através de incentivos fiscais e até mesmo em num futuro próximo, considerar a venda da energia produzida excedente à concessionária. Cabe salientar que um sistema solar fotovoltaico apresenta pouquíssima necessidade de manutenção e tem uma vida útil média de 30 anos; entretanto existem vários sistemas em uso a mais tempo.

Este estudo inicial permitiu comparar melhor as tecnologias e embasar a estruturação dos cenários.

4.5. Alternativas de geração

Como alternativas de geração de energia foram formulados quatro cenários, visando atingir os objetivos descritos na tabela 1. Para estes cenários o G_{POA} , P_{CC} , área e demais dados foram todos recalculados a fim de adaptar a orientação e inclinação dos PTs e sistemas utilizados. Quando houve a necessidade da distribuição dos painéis em diferentes PTs, o P_{CC} foi recalculado descontando a energia já gerada pelos painéis instalados no primeiro PT e assim por diante, tabela 5a. Nas representações gráficas da disposição dos módulos na edificação foram utilizadas três cores básicas para identificar os subsistemas e gradientes destas cores para identificar os strings, tabela 5b.

Tabela 5a– Cenários visando à integração FV à edificação.

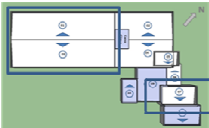
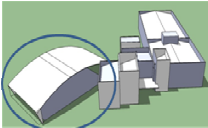
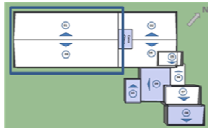
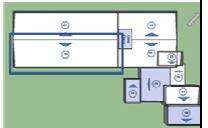
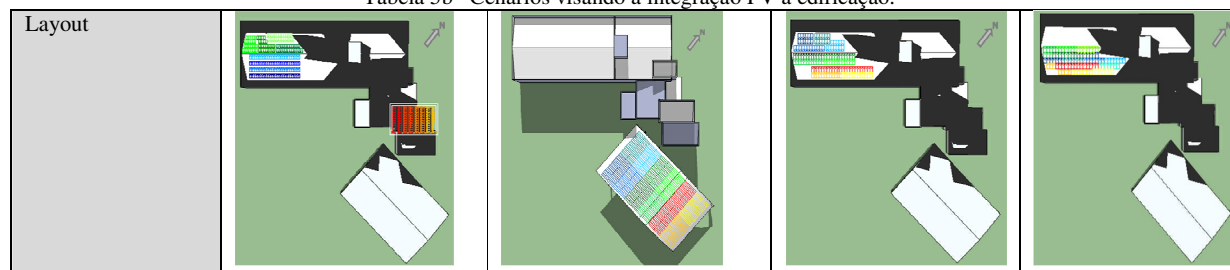
		Cenário 1			Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4
Painel		Sunmodule SW85/R5E			Unisolar PLV144		Sanyo Hit SE 10		Sunpower E19//318
Inversor		Sunny Tripower 10.000TL			Sunny Tripower 15.000TL		Sunny Minicentral 11.000TL		Sunny Minicentral 11.000TL
Nº subsistemas		3			3		3		3
KWp		10			13,34		11		11
Nº módulos		120			88		48		35
Wp/ fase		10.200			12.672		10.800		11.130
PT	Planos	PT1	PT2	PT7	PT11	PT12	PT1	PT3	PT13
	Inversor	1	1	1	1	2	1	2	3
	Nº String/ inversor (paralelo)	4	4	4	4	1	4	4	5
	Nº Módulos/ string (série)	30	30	30	22	22	12	12	7
	Egerada (KWh/dia)	36,48	34,12	38,53	34,12	76,82	36,62	72,23	112
Localização									

Tabela 5b- Cenários visando à integração FV à edificação.



4.6. Redução do uso de energia da rede

A partir dos dados obtidos de potência instalada para os quatro cenários e G_{POA} para cada PT, aplicou-se novamente a equação 1 a fim de obter a média diária de energia gerada por cada sistema ao longo de cada mês. A tabela 6 mostra, para cada cenário, a estimativa dos valores mensais de consumo que podem ser supridos. Os cenários foram comparados com o “Consumo médio Escola-Aproximado”.

Tabela 6: Parcela do consumo atendida pela geração solar para os quatro cenários.

MÊS	Consumo médio escola	Consumo médio escola-aproximado	CENÁRIOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA								
			Cenário 01		Cenário 02		Cenário 03		Cenário 04		
			KWh	%	KWh	%	KWh	%	KWh	%	
2009	Jan	3	108	136	125.92	134	124.27	138.03	128.02	141.89	131.60
	Fev	4	108	128	118.44	128	118.56	130.18	120.74	132.89	123.25
	Mar	3	108	120	111.41	122	113.19	122.26	113.40	123.41	114.46
	Abr	3	108	103	95.32	106	98.63	104.39	96.82	103.80	96.27
	Mai	3	108	85	78.69	89	82.83	85.91	79.68	84.20	78.09
	Jun	3	108	74	68.94	79	73.14	75.10	69.65	73.16	67.86
	Jul	3	108	80	74.59	85	78.79	81.11	75.23	78.91	73.18
	Ago	3	108	99	92.07	103	95.92	100.37	93.09	98.54	91.39
	Set	550	108	101	93.29	103	95.64	102.70	95.26	103.54	96.03
	Out	216	108	118	109.16	119	109.98	120.06	111.35	122.21	113.34
	Nov	258	108	128	119.01	127	118.12	130.69	121.21	134.07	124.34
	Dez	157	108	138	127.84	136	125.82	140.03	129.87	144.14	133.68
2010	Jan	208	108	136	125.92	134	124.27	138.03	128.02	141.89	131.60
	Fev	4	108	128	118.44	128	118.56	130.18	120.74	132.89	123.25
	Mar	26	108	120	111.41	122	113.19	122.26	113.40	123.41	114.46
	Abr	151	108	103	95.32	106	98.63	104.39	96.82	103.80	96.27
	Mai	127	108	85	78.69	89	82.83	85.91	79.68	84.20	78.09
	Jun	174	108	74	68.94	79	73.14	75.10	69.65	73.16	67.86
	Jul	152	108	80	74.59	85	78.79	81.11	75.23	78.91	73.18
MÉDIA	107.82	107.82	109.14	101.22	110.96	102.91	110.90	102.86	111.73	103.63	
TOTAL 2009	1207	1294	1310		1331		1331		1341		

Em uma avaliação geral todos os cenários atendem ao consumo médio total da edificação, sendo que o cenário 04 chega a suprir 103,63%. Durante os meses de verão todos os cenários atendem ao consumo da escola, já nos meses de inverno nenhum deles atende à demanda baseada no consumo médio aproximado de 107,82 kWh. O cenário 02 apresenta o melhor desempenho nos meses de inverno, enquanto que no verão o cenário 04 é o que apresenta melhor desempenho. Em todos os casos, a edificação pode ser considerada dentro do conceito de “Zero Energy Buildings”.

4.7. Distribuição dos inversores

De acordo com Comissão Européia (2004), os inversores devem ser locados de modo estar protegidos da chuva e da radiação solar direta. O local da instalação deve manter as condições ambientais exigidas pelo fabricante do inversor, especialmente em termos de umidade e de temperatura. O ruído produzido pelo inversor também deve ser considerado. Seguindo estas recomendações não se aconselha a colocação dos inversores no telhado e nem próximo às janelas das salas de aula.

5. CONCLUSÕES

Com o consumo energético crescente e maior exigência das matrizes energéticas, além do incentivo às fontes de energia renováveis, o uso da energia solar fotovoltaica se mostra como uma alternativa viável. Se ainda é uma tecnologia cara, através da curva de aprendizado e do desenvolvimento da tecnologia os custos podem cair significativamente.

Um dos potenciais desta alternativa de geração de energia é que pode ser gerada junto ao ponto de consumo desonerando o sistema e minimizando perdas. Entretanto, através deste estudo de caso podem-se perceber as dificuldades da implantação de um sistema fotovoltaico quando ele não é concebido juntamente com o projeto arquitetônico.

Como conclusões referentes a este trabalho pode-se dizer que as características arquitetônicas do edifício, como volumes em diferentes alturas, platibandas e fachadas desencontradas produziram elevado auto-sombreamento do edifício, o que dificultou o aproveitamento da energia solar fotovoltaica sem a adoção de alguma intervenção arquitetônica na edificação. Neste caso em questão, os brises nas aberturas inviabilizaram testes de aplicação de tecnologia fotovoltaica nos vidros. Estas relações entre a arquitetura e a instalação FV observada no estudo de caso aplicam-se a qualquer projeto arquitetônico.

Concluiu-se que a solução mais simples a para o caso do sombreamento causado pelas platibandas, é a colocação de uma estrutura sobre elas para a fixação dos painéis, como utilizado no cenário 01 em PT7. Esta solução apresenta a vantagem térmica de sombreamento da cobertura, entretanto no inverno este sombreamento pode ser negativo em locais frios, além de onerar a instalação do sistema.

Como aprendizado que este estudo de caso pode trazer, é importante frisar que o ideal é que a geração fotovoltaica seja pensada já nas fases iniciais do projeto, tirando partido de seus elementos e buscando geometrias que potencializem o seu uso. Com isto custos podem ser reduzidos por não serem necessárias novas estruturas para a acomodação dos painéis. As intervenções em edifícios já construídos normalmente são aditivas, enquanto que quando ocorrem em fase de projeto podem ser integrativas possibilitando maior liberdade de criação.

A comparação das tecnologias mostrou que a eficiência dos painéis é de grande importância na definição do projeto, posto que possibilita maior geração de energia em áreas menores. Como na maioria dos casos a área remanescente do sombreamento não é regular, o tamanho e o formato do painel também são de grande importância para a acomodação do layout.

A utilização dos painéis inclinados na latitude local não se mostrou significativamente importante, pois a redução de painéis para a geração de energia era mínima e a área necessária para evitar o sombreamento entre os strings era consideravelmente grande.

Um potencial observado foi que o horário de funcionamento da escola (período matutino e vespertino) coincide com o horário em que a luz solar é disponível, facilitando o aproveitamento da energia solar fotovoltaica gerada pela própria edificação, permitindo maior independência da rede.

A aproximação do payback realizado, considerando Taxa Interna de Retorno (TIR) de 6% mostrou que todos os sistemas se pagariam em uma média de 30 anos, o que enfatiza necessidade de incentivos para a instalação fotovoltaica já que estas instalações costumam operar cerca deste período, algumas vezes um pouco mais. As políticas de incentivos fiscais e possível preparação das concessionárias para a compra de energia produzida excedente na rede podem tornar este sistema mais interessante financeiramente.

Na média anual, a edificação pode ser considerada dentro do conceito de “Zero Energy Buildings”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CASTANHEIRA, Renato G., CORBELLA Oscar D. **Painéis Fotovoltaicos: sombra e energia nos telhados**. In: III Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belém, 2010, **Anais...** Belém, CEBENS 2010. CD-ROM.
- COMISSÃO EUROPÉIA. **Energia Fotovoltaica- manual sobre tecnologias, projeto e instalação**. ALTENER, 2004. 368p.
- JANUZZI, Gilberto M., VARELA, Fabiana K.O.M., GOMES, Rodolfo D.M. **Relatório Final - Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação**. Pro-COBRE Connects Life. Campinas, 2009, 53p.
- MARINOSKI, D.L.; SALAMONI I.T.; RÜTHER, R. **Pré-dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico: Estudo de caso do edifício sede do CREA-SC**. São Paulo. I Conferência Latino-America de construção sustentável- X Encontro nacional de tecnologia do Ambiente Construído, 2004
- RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos**. Editora UFSC/ LABSOLAR, 2004.107p.
- RÜTHER Ricardo, MONTENEGRO Alexandre de A. **Building-integrated, grid-connected photovoltaic installations in warm climates: choice of technologies**. In: The 18th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Florianópolis, 2001, **Proceedings...** Florianópolis: PLEA 2001. p. 243-248.
- SMA. **Sunny Family 2009/2010**. Catálogo 200p.