UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO – FAU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

LUCAS SABINO DIAS

**INCORPORAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM
ENVOLTÓRIAS DE EDIFICAÇÕES: TECNOLOGIA E
ARQUITETURA.**

Programa de Pós-graduação – Mestrado em Arquitetura
e Urbanismo da Universidade de São Paulo

Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura

Orientadora: Prof^a Dra. Claudia Terezinha de Andrade Oliveira

São Paulo

Fevereiro de 2014

LUCAS SABINO DIAS

INCORPORAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM ENVOLTÓRIAS
DE EDIFICAÇÕES: TECNOLOGIA E ARQUITETURA.

Dissertação apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Área de concentração:

Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo

Orientadora:

Profª. Dra. Claudia Terezinha de Andrade Oliveira

São Paulo

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE
TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA
FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

E-MAIL DO AUTOR: lucassdias@yahoo.com

D541i Dias, Lucas Sabino
Incorporação de sistemas fotovoltaicos em envoltórias de
Edificações: tecnologia e arquitetura / Lucas Sabino Dias. -- São
Paulo, 2014.
144 p. : il.

Dissertação (Mestrado - Área de Concentração: Tecnologia
da Arquitetura) – FAUUSP.

Orientadora: Claudia Terezinha de Andrade Oliveira

1.Projeto de arquitetura 2.Energia 3.Edifícios residências
4.Sustentabilidade 5.Envoltória 6.Fotovoltaicos I.Título

CDU 620.9

Nome: DIAS, Lucas Sabino

Título: Incorporação de sistemas fotovoltaicos em envoltórias de edificações: tecnologia e arquitetura.

Dissertação apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr.:	_____	Instituição:	_____
------------	-------	--------------	-------

Julgamento:	_____	Assinatura:	_____
-------------	-------	-------------	-------

Prof. Dr.:	_____	Instituição:	_____
------------	-------	--------------	-------

Julgamento:	_____	Assinatura:	_____
-------------	-------	-------------	-------

Prof. Dr.:	_____	Instituição:	_____
------------	-------	--------------	-------

Julgamento:	_____	Assinatura:	_____
-------------	-------	-------------	-------

Dedico este trabalho a TODA minha família, meu porto seguro.

Agradecimentos

Neste momento, em que mais um ciclo se fecha, o sentimento de gratidão é enorme. Agradeço primeiramente a minha orientadora Claudia Oliveira, pela confiança, amizade e dedicação durante este processo de trabalho. A toda equipe do Team Brasil (e envolvidos no percurso) pela maravilhosa experiência, citar nomes nestes casos é sempre perigoso, correndo o risco de esquecer de alguém, tendo em vista a quantidade de pessoas especiais, por isso, citarei somente duas como representantes, a Professora Themis Fagundes e o Professor José Ripper Kós, responsáveis pela minha entrada no time. A Eletrobrás pela bolsa durante parte do processo.

Agradecimentos, que nunca serão suficientes, ao meu pai e minha mãe, pelo incentivo e dedicação, pela confiança e apoio, pelo aprendizado e amor. Muito obrigado, parte deste trabalho é de vocês. A minha tia/madrinha Ana, por todo o acompanhamento do processo, inclusive com a ida a Madri e pela paciência e dedicação durante a correção do trabalho. Para minha namorada por me aguentar e incentivar, por compartilhar os momentos e pelo amor.

Obrigado!

Resumo

DIAS, L. S. **Incorporação de sistemas fotovoltaicos em envoltórias de edificações: tecnologia e arquitetura.** 2014. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

Nossas cidades e edifícios são extremamente dependentes da energia elétrica, produzida, normalmente, em locais afastados dos grandes centros, gastando ainda mais recursos na transmissão, manutenção da rede, transformação de corrente contínua em alternada e assim por diante. Uma das alternativas a este modelo é a utilização de sistemas de produção de energia junto às cidades.

Dentre as alternativas para a produção de energia no perímetro urbano, destacam-se os sistemas fotovoltaicos, que são leves, silenciosos, não liberam poluentes na sua utilização, entre outras vantagens. Para que sejam incorporados nos edifícios utilizando todo seu potencial energético e compositivo, como parte da edificação, é necessário que os arquitetos assumam esta responsabilidade como um desafio criativo, de maneira a contribuir para mudança da atual dinâmica dos edifícios e cidades.

Sendo assim, este trabalho tem o objetivo de caracterizar atributos que orientem os projetistas na incorporação de sistemas de geração fotovoltaica em envoltórias de edificações. Por meio da experiência prática de projeto, fabricação, montagem, operação e desmontagem do protótipo de Residência Zero Ekó House, que participou da competição de casas solares Solar Decathlon Europe 2012 e de bases bibliográficas, que permitiram apresentar um panorama geral das tecnologias de captação e incorporação fotovoltaicas disponíveis; elaborou-se um modelo de projeto para orientar os projetistas na relação das tecnologias fotovoltaicas com a arquitetura e os edifícios, auxiliando nas tomadas de decisões iniciais do projeto da envoltória do edifício.

Palavras-chave: Projeto de arquitetura, Energia, Edifícios residências, Sustentabilidade, Envoltória, Fotovoltaicos.

Abstract

DIAS, L. S. **Incorporation of photovoltaic systems in buildings envelopes: technology and architecture.** 2014. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

Our cities and buildings are extremely dependent on electricity produced, usually, far away from the big cities, expending more resources in transmission, network maintenance, conversion of dc to ac and so on. One alternative to this model is the use of power systems integrated to the cities.

Among the alternatives for energy production in urban area, highlight the photovoltaic systems, which are lightweight, silent, does not release pollutants in their use, among other advantages. To be incorporated into buildings using all their energy and aesthetic potential, as part of the building, it is necessary that the architects assume this responsibility as a creative challenge, to contribute to changing the current dynamics of buildings and cities.

Thus, this study aims to characterize attributes to guide designers in incorporating photovoltaic systems on the building envelope. Through practical experience in design, manufacture, assembly, operating and disassembly of the Zero Energy prototype Ekó House, who attended the solar house competition Solar Decathlon Europe 2012 and bibliographic databases, which allowed to provide an overview of photovoltaic technologies available; was elaborated a model to guide designers in relation with photovoltaic technologies in architecture and buildings, assisting in making initial decisions related to the envelope of buildings.

Keywords: Architecture design, Energy, Residential buildings, Sustainability, Building envelop, Photovoltaic.

Lista de Figuras

Figura I.1– Esquema de cidades com “metabolismo linear”, grandes consumidoras de recursos, como energia, alimentos e mercadorias, gerando em igual proporção emissões de gases do efeito estufa, lixo e resíduos (fonte: ROGERS, 2008).....	1
Figura I.2– Consumo setorial de energia elétrica referente a 2012. Ao considerar o consumo em edifícios residenciais, comerciais e públicos, a porcentagem aumenta para 45,2% (Modificado pelo autor a partir de; BRASIL, 2013).....	2
Figura I.3- Esquema de cidades com “metabolismo circular”, em que a entrada de alimentos, energia e mercadorias é minimizada, procurando também reutilizar e reciclar resíduos e lixo; desta forma, diminui a emissão de poluentes e outros descartáveis (fonte: ROGERS, 2008). .	3
Figura I.4– As 10 provas do evento Solar Decathlon Europe, divididas em seus 5 grupos específicos, sendo que as duas provas do último grupo (estratégicas) são transversais às outras 8 provas (Adaptado pelo autor de SOLAR, 2012).....	7
Figura II.1- Um conjunto de células fotovoltaicas dá origem aos módulos que, conectados, formam os painéis de geração fotovoltaica que podem ser integrados às edificações (Modificado pelo autor de FARKAS <i>et al</i> , 2012).....	11
Figura II.2: Diagrama de comprimento de onda e frequência, com abrangência das ondas curtas, ultravioletas, até as longas, infravermelhas. (Modificado pelo autor de SELLERINK, 2012).	12
Figura II.3: Desenho esquemático que mostra de forma simplificada a radiação solar atravessando a atmosfera. Quando a radiação incide perpendicularmente sobre a superfície terrestre, não sendo refletida ou difundida por partículas de água ou sujeira, por exemplo, chama-se de radiação direta ($AM=1$). Quando a radiação incide inclinada ($\text{ângulo} = \alpha$) ou é dissipada por algum obstáculo, partículas de água ou sujeira, por exemplo, dá-se o nome de radiação difusa ($AM>1$), aproximando-se mais das ondas curtas.	12
Figura II.4: Irradiação global anual mundial (Fonte: Modificado pelo autor de ALMEIDA, 2012 <i>apud</i> METEONORM (2012)).	13
Figura II.5: Em (a), tem-se a evolução da capacidade instalada mundial em geração fotovoltaica e, em (b), a relação entre a geração isolada e conectada à rede. (Fonte: Modificado pelo autor a partir de BRASIL, 2012c)	13

Figura II.6: Gráfico de missões equivalentes de CO ₂ para a cadeia de energia. (Fonte: Modificado pelo autor de ROGNER; KHAN, 1998).....	14
Figura II.7 – (a) Célula solar multicristalina convencional da empresa Solland Solar (Fonte: SUPSI/ISAAC, 2013e); (b) célula de alta eficiência da empresa SunPower (Fonte: SUPSI/ISAAC, 2013e); (c) célula híbrida da empresa Sanyo (Fonte: RENEWBL, 2009).....	16
Figura II.8- Célula solar policristalina convencional (Fonte: BRASIL, 2012c).....	17
Figura II.9 – Células fotovoltaicas coloridas m- Si (a) da fabricante Sunways e p- Si (b) da fabricante Solartetc. (Fonte: SUPSI/ISAAC, 2013f).	17
Figura II.10 - Contatos entre células fotovoltaicas, conectando a parte frontal de uma com a posterior da vizinha, aumentando, assim, a potência do conjunto. Vista frontal (a) e Lateral (b).....	18
Figura II.11- (a) Células solares com tipos diferentes de contatos das fabricantes: Solland Solar, (b) Photovoltech e (c) Canadian Solar. (Fonte: SUPSI/ISAAC, 2013e).....	18
Figura II.12- Diferentes formatos de células fotovoltaicas e seus respectivos agrupamentos: (a) Células quadradas; (b) Com os vértices cortados em ângulo; (C) com os vértices arredondados e (d) Arredondadas (Adaptado pelo autor a partir de SUPSI/ISAAC, 2013e).	19
Figura II.13- Célula fotovoltaica de silício cristalino com transparência, fabricada pela empresa Sunways (Fonte: SUNWAYS, 2012).....	19
Figura II.14: (a) Módulo fotovoltaico de silício amorfo flexível em substrato plástico (Fonte: RÜTHER, 2004); (b) Células de silício micromorfo (Fonte: GmbH, 2010); (c) Módulo de silício microcristalino (Fonte: DirectIndustri, 2014); (d) Módulo de telureto de cádmio (CdTe) (Fonte: FirstSolar, 2014); (e) Módulo flexível de disseleneto de cobre (gálio) e índio (CIS) (Fonte: LUND et all, 2008).....	20
Figura II.15 - Células fotovoltaicas com padrões de desenho impressos a laser (Fonte: SOLIKER, 2011).	21
Figura II.16 - Módulos de silício amorfo com taxas de transparência de 30% (Fonte: RIXINSOLAR, 2014).....	21
Figura II.17: (a) Células flexíveis com nano partículas de CIS. (b) Nano partículas de CIS aplicadas em lâmina de alumínio de alta condutividade em células colares (Fonte: WELLER <i>et al</i> , 2010).	22
Figura II.18 - Célula com Nanotecnologia Solar; pretende funcionar como heras nas fachadas (Fonte; FARKAS <i>et al</i> , 2012).....	22
Figura II.19 – Diferentes configurações dos módulos fotovoltaicos quanto a: (a) tamanho, densidade e tipo de células; (b) composição do módulo, secção transversal; (c) transparência	

e coloração das células; (d) possibilidade de curvatura; (e) plasticidade do módulo; (f) moldura e forma de fixação na envoltória do edifício (adaptado de WELLER <i>et al</i> , 2010)...	22
Figura II.20 – Tipos mais utilizados na arquitetura de módulos fotovoltaicos: os de Silício Cristalino, os Monocristalinos convencionais (Fonte: NITROMIDIA, 2012), de Alta Eficiência (PM, 2012), Híbridas HIT (Fonte: Panasonic, 2013) e as Policristalinas convencionais (Fonte: NITROMIDIA, 2012); os Filmes Finos, os de Silício Amorfo (Fonte: RÜTHER, 2004), de Silício Micromorfo (Fonte: GmbH, 2010), de Silício Microcristalino (Fonte: DirectIndustri, 2014), de Telureto de Cádmio (CdTe) (Fonte: FirstSolar, 2014) e de Disseleneto de Cobre (gálio) e Índio (CIS) (Fonte: LUND <i>et al</i> , 2008).....	23
Figura II.21 – Detalhe esquemático da seção, com a composição mais comum, dos módulos de silício cristalinos (a) e dos filmes finos (b), que também podem estar contidos em moldura. (Fonte da imagem: Autor modificado a partir de CHIVELET; SOLLO, 2010 e WELLER <i>et al</i> , 2010).	26
Figura II.22 – (a) Aplicação de módulos fotovoltaicos com substrato transparente (Fonte: ZEDFACTORY, 2011); (b) Diferentes módulos com substratos coloridos (Fonte: SUPSI/ISAAC, 2013g).	27
Figura II.23: Módulos de silício amorfo encapsulados em EVA, com membrada transparente e módulo flexível com células amorfas (Fonte: WELLER <i>et al</i> , 2010).	27
Figura II.24 – Diferença no percentual de perda de rendimento por sombreamento em módulos de silício cristalino e filme fino (Adaptado pelo autor a partir de WELLER <i>et al</i> , 2010).	29
Figura II.25: Gráfico de Intensidade Relativa [%] por Comprimento de ondas, mostrando que a eficiência das células fotovoltaicas é influenciada pela composição do espectro da luz (Adaptado a partir de WELLER <i>et al</i> , 2010).	30
Figura II.26 - Exemplo de aplicação fotovoltaica autônoma, no Monte Rosa-Zermatt, Suíça (Fonte: FARKAS <i>et al</i> , 2012).....	31
Figura II.27: Esquema que representa o grid fotovoltaico de uma residência. Os três arranjos fotovoltaicos, com módulos com $P_{max}=100W$ (exemplo), são conectados a dois inversores (A e B), que se conectam a um medidor de geração (D), que, de um lado, passa pelo medidor de consumo (E), ligado aos pontos de consumo, e, de outro lado, a um medidor de energia excedente (C), que é ligado à rede de distribuição de energia. Ao lado esquerdo da imagem, separada pela linha pontilhada, o campo de corrente contínua, ao lado direito de corrente alternada (Modificado a partir de ALMEIDA, 2012 ; FARKAS <i>et al</i> , 2012).	32

Figura III.1: Intersecção entre as diferentes esferas de um projeto de incorporação de sistemas fotovoltaicos na arquitetura. Organizam-se ao redor do projeto e usuário questões referentes à: energia, construção e arquitetura e urbanística (Modificado pelo autor a partir de WELLER et al, 2010).	36
Figura III.2 –Possibilidades de integração de fotovoltaicos na envoltória: (a) Como elementos técnicos, foco voltado à geração; (b) Estrutura dos fotovoltaicos independentes; (c) Com mais de uma função, seja como claraboia, guarda-corpo, proteção solar, entre outras; (d) integração fotovoltaica como parte da composição formal da envoltória (Adaptado pelo autor de FARKAS et al, 2012).	37
Figura III.3 – Desenho esquemático do novo paradigma na incorporação de fotovoltaicos a edifícios: (a) Incorporação tradicional na envoltória; (b) A forma da envoltória é influenciada pela incidência de radiação solar no edifício, com um desenho que privilegie essa incidência (Adaptado pelo autor de FARKAS et al, 2012).....	38
Figura III.4 - Adaptação de modelo para estimativa do rendimento, segundo os critérios da <i>International Energy Agency</i> (IEA), na TASK 41 (Adaptado pelo autor de FARKAS et al, 2012).	39
Figura III.5 – Mapa da Radiação Solar Global Horizontal - Média Anual do Brasil (Modificado pelo autor a partir de PEREIRA, et al, 2006)	40
Figura III.6 – Mapa do Brasil dividido em três regiões, segundo semelhanças nos padrões de incidência de radiação solar dos ábacos das capitais brasileiras (adaptado pelo autor a partir de SANTOS, 2012).....	42
Figura III.7 – Ábaco volumétrico com a marcação dos onze pontos (nomeados por letras do “a” ao “I”), que serão transferidos para os ábacos planejados, para obtenção do fator orientação em cada face para as três regiões do Brasil.	43
Figura III.8 – Ábaco planejado do potencial de radiação recebido pelas superfícies na cidade de Natal, RN, escolhida como representativa da Região 1, com a marcação dos onze pontos necessários para montar o ábaco volumétrico, segundo a Figura III.7 (adaptado pelo autor a partir de SANTOS, 2012).	44
Figura III.9 – Ábaco volumétrico representativo das cidades capitais da Região 1, listadas na Tabela III.1 e especializadas no mapa do Brasil, no lado superior esquerdo da figura. Apresenta a porcentagem [%] do potencial de radiação recebido pelas onze superfícies representadas no ábaco.	44
Figura III.10 - Ábaco planejado do potencial de radiação recebido pelas superfícies na cidade de Cuiabá, MT, escolhida como representativa da Região 2, com a marcação dos onze	

pontos necessários para montar o ábaco 3D, segundo a Figura III.7 (adaptado pelo autor a partir de SANTOS, 2012).	46
Figura III.11 - Ábaco volumétrico representativo das cidades capitais da Região 2, listadas na Tabela III.1 e especializadas no mapa do Brasil no lado superior esquerdo da figura. Apresenta a porcentagem [%] do potencial de radiação recebido pelas onze superfícies representadas no ábaco.	46
Figura III.12 - Ábaco planificado do potencial de radiação recebido pelas superfícies na cidade de São Paulo, SP, escolhida como representativa da Região 3, com a marcação dos onze pontos necessários para montar o ábaco 3D, segundo a Figura III.7 (adaptado pelo autor a partir de SANTOS, 2012).	48
Figura III.13 - Ábaco volumétrico representativo das cidades capitais da Região 3, listadas na Tabela III.1 e especializadas no mapa do Brasil, no lado superior esquerdo da figura. Apresenta a porcentagem [%] do potencial de radiação recebido pelas onze superfícies representadas no ábaco.	48
Figura III.14 – A figura apresenta três formas diferentes de integrar os módulos fotovoltaicos em envoltórias, quanto ao espaço deixado entre os módulos e a superfície externa do edifício: (a) com espaço maior ou igual a 15cm, as perdas por aquecimento são próximas de zero; (b) com espaço de aproximadamente 5cm, perdas por aquecimento próximas de 5%; (c) sem espaço para ventilação, perdas de aproximadamente 10%(Modificado pelo autor a partir de SUPSI/ISAAC, 2013b)	51
Figura III.15 – Formas básicas para acoplamento dos módulos fotovoltaicos na envoltórias de edifícios: (a) sobreposta à envoltória construída da edificação, com afastamento entre os fotovoltaicos e a edificação; (b) sobreposta à envoltória construída da edificação, sem afastamento; (c) quando a tecnologia fotovoltaica é a própria envoltória do edifício (modificado pelo autor a partir de WELLER, <i>et al</i> , 2010).	53
Figura III.16 – Possibilidades estéticas e compositivas da incorporação: (a) Estética da tecnologia, ou seja, cores, tipos de contatos e densidade das células, assim como as cores dos substratos e molduras dos módulos, entre outros; (b) Modulação na superfície da envoltória, composição dos módulos no conjunto arquitetônico; (c) transparências tanto das células, quanto dos substratos; (d) Flexibilidade do plano; neste sentido é importante escolher uma tecnologia que permita este tipo de abordagem, tanto no que diz respeito ao módulo, quanto a sua ligação com o inversor, por exemplo; (e) Possibilidade de curvatura (modificado pelo autor a partir de SUPSI/ISAAC, 2013c).	54

Figura III.17 – Possibilidade de incorporação fotovoltaica na cobertura de edificações: (a) Coberturas inclinadas; (b) Coberturas inclinadas tipo <i>shed</i> ; (c) Coberturas planas; (d) Coberturas planas com claraboias; (e) Coberturas planas e fotovoltaicos inclinados; (f) Fotovoltaicos que excedem a cobertura do edifício.....	55
Figura III.18 – Possibilidades de incorporação fotovoltaica na fachada de edificações: (a) Plano de geração perpendicular ao solo; (b) Plano de geração inclinado em relação ao solo; (c) Fotovoltaico como proteção solar vertical; (d) Fotovoltaicos como proteção solar horizontal; (e) Fotovoltaicos como peitoril na fachada de edifícios; (f) Fotovoltaicos que excedem a projeção do edifício, como marquises e guarda-corpos, por exemplo.....	56
Figura III.19 – Aplicação de fotovoltaico quanto à movimentação: (a) Plano que se movimenta sobre a fachada ou cobertura; (b) Plano que acompanha a trajetória solar; (c) Movimentação sobre um eixo na extremidade do plano de geração na cobertura; (d) Movimentação sobre um eixo centralizado no plano de geração na cobertura; (e) Movimentação sobre um eixo na extremidade do plano de geração em proteções solares; (f) Movimentação sobre um eixo centralizado no plano de geração em proteções solares.....	57
Figura III.20 – (a) ventilação na parte posterior dos módulos fotovoltaicos; (b) Sombreamento no plano de geração, por elementos externos a residência, da própria residência ou por sujeira; (c) reflexão ótica dos fotovoltaicos; (d) reflexão contribuindo para o aumento da radiação indireta incidente (Adaptado pelo autor a partir de SUPSI/ISAAC, 2013b).....	58
Figura III.21 - a) Vista superior da casa Para Eco-House, da equipe chinesa participante do SDEurope 2012, onde é possível visualizar os módulos fotovoltaicos na cobertura. b) Vista dos fotovoltaicos instalados nos brises da fachada oeste da casa (Fonte: GALERIA 2012)...	59
Figura III.22: Casa Ekó Brasil, equipe brasileira participante do SDEurope 2012. a) Vista dos módulos fotovoltaicos na cobertura, da fachada frontal (sul no hemisfério norte) e da fachada leste. É possível observar também a sombra do beiral na fachada frontal da residência. b) Vista da fachada oeste, onde é possível ver parte da cobertura, as faces posteriores dos módulos e sua implicação no conjunto do desenho (Fonte: GALERIA 2012).	60
Figura III.23: Casa Canopeia, da equipe francesa, participante do SDEurope 2012. (a) Integração dos módulos fotovoltaicos na cobertura, vista superior. (b) Vista do espaço de estar do pavimento superior e da parte posterior dos módulos fotovoltaicos de silício com substrato transparente. Na parte inferior dos módulos, foram desenhados padrões semelhantes	

a folhas, que “marcavam” o ambiente com sombras, influenciando assim em sua estética (Fonte: GALERIA 2012).	61
Figura III.24: Casa Odoo, equipe húngara, participante do SDEurope 2012. (a) Vista superior da residência com os módulos fotovoltaicos na cobertura; é possível observar a continuidade do padrão modular dos módulos nas fachadas (b) Esquema do sistema passivo que, através de um sistemas de aspersão de água nos fotovoltaicos, baixava sua temperatura, melhorando o desempenho, reutilizando a água para o sistemas de controle térmico da casa (Fontes: (a) GALERIA, 2012; (b) ODOOPROJECT, 2012).	62
Figura III.25: Casa Pátio 2.12, equipe espanhola, participante do SDEurope 2012. (a) Vista aérea da residência com os módulos fotovoltaicos da cobertura em destaque. (b) Vista da fachada norte da residência do ponto de vista do observador, onde os módulos fotovoltaicos não são visíveis (Fonte: GALERIA 2012).	63
Figura III.26: Casa Omotenashi House, equipe japonesa, participante do SDEurope 2012. Vista da “telhas fotovoltaicas” na cobertura (Fonte: GALERIA 2012).	64
Figura IV.1 – Imagem geral da Ekó House durante a competição do Solar Decathlo Europe 2012 (GALERIA, 2012).	66
Figura IV.2: Planta Baixa da Ekó House. Mostra a área interna (condicionada) da residência com a cozinha, banheiro, quarto, sala de jantar, estar e estudos e a área externa, com as duas varandas laterais cobertas (leste/oeste), o espaço do Gabinete Técnico, o estar externo e a rampa de acesso na fachada frontal (sul). A figura mostra a orientação da casa implantada no hemisfério norte, local da realização da competição (Madrid, Espanha).	67
Figura IV.3: Diferentes estruturas que dão forma ao protótipo Ekó House. No Corpo da Residência, feito de painéis estruturais de madeira, estão os espaços internos e a Estrutura Envoltória, estruturada basicamente com perfis metálicos, onde se encontram os espaços externos, varandas, cobertura.	68
Figura IV.4: Painéis estruturais em madeira do Corpo da Residência Ekó House, divididos em três módulos. No Módulo 1, a cozinha, banheiro e quarto. Nos Módulos 2 e 3, os outros cômodos da residência.	69
Figura IV.5: As cinco diferentes partes da Estrutura Envoltória da Ekó House podem ser subdividida em cinco partes: a Estrutura de Suporte dos Decks, a Estrutura das Varandas, o Gabinete Técnico, o Sistema de Cobertura ou simplesmente Telhado e os Sistemas Solares, com os fotovoltaicos e U-pipes.	69

Figura IV.6: Estrutura de suporte dos decks. No detalhe, um dos quadros padrão da estrutura de suporte dos decks, com tamanho de 2m x 1m, onde são encaixadas as régua da madeira Teca.....	70
Figura IV.7: Estruturas metálicas dos quadros das varandas, que dão suporte aos sistemas de sombreamento da residência e delimitam as varandas que circundam o Corpo da Residência. No detalhe, os quadros horizontais da cobertura da varanda e os quadros verticais, ambos com as proteções solares em bambu se destacando.	71
Figura IV.8 - As duas estruturas metálicas tridimensionais que dão forma ao Gabinete Técnico e as duas passarelas que conectam a casa, assim como revestimentos laterais e superior. Na parte interna, os dois reservatórios de água quente, a máquina do HVAC, os quadros elétrico e de automação e os dois inversores do sistema fotovoltaico.	72
Figura IV.9: Sistema de cobertura Ekó House.....	73
Figura IV.10: Três estruturas metálicas para sustentação dos módulos fotovoltaicos, e conjuntos de tubos evacuados.....	74
Figura IV.11: Plano de geração e demais sistemas e elementos relacionados.....	74
Figura IV.12 – Balanço energético mensal com usos finais. A simulação considerou os dados solares de Madrid, Espanha.	75
Figura IV.13 – Conjunto de residências Ekó House. Pode funcionar como hotéis em regiões isoladas, sem acesso à rede de energia elétrica, fornecendo eletricidade para serviços básicos dessas comunidades (Adaptado pelo autor de TEAM BRASIL, 2012b).....	76
Figura IV.14: Vista lateral da Ekó House. Plano de cobertura dos sistemas solares com inclinação de 15°, inscrita no Envelope Solar	76
Figura IV.15: Vistas do Envelope Solar disponibilizado pela organização do SDEurope (2012). O lote onde as residências deveriam ficar inscritas tem 20m x 20m e a altura 6m (Adaptado pelo autor de SOLAR, 2012).	77
Figura IV.16: Desenho esquemático da insolação na fachada frontal, no verão e no inverno. O plano dos sistemas de geração protege a fachada durante os meses quentes de verão e permite a passagem da radiação solar durante o inverno.	77
Figura IV.17: Vista lateral da cobertura com Sistemas Solares da Ekó House, variando sua inclinação, e o mapa do Brasil com latitudes.....	78
Figura IV.18: Conexão Grampos de fixação nas telhas metálicas. A régua com os clips de sustentação das telhas, com os clips já espaçados na distância necessária de 41cm para o encaixe das telhas, são fixados na cobertura do Corpo da Residência. Os grampos, por sua vez, prendem-se nas telhas sem que haja necessidade de perfurá-las. Nos grampos são presas	

as réguas de fixação da estrutura de suporte e, posteriormente, a própria estrutura com os sistemas solares.....	79
Figura IV.19 – Desenho esquemático representando os dispositivos de controle do sistema fotovoltaico, que monitoram o clima, a incidência de radiação solar, a temperatura dos módulos, transformam a corrente de contínua para alternada, fornecem dados de geração e fazem a interface entre o sistema e o usuário (Adaptado pelo autor de TEAM, 2012b).	80
Figura IV.20 – Vista lateral da Ekó House. O círculo indica o local onde o acesso é dificultado, tanto para a montagem dos módulos, quanto para conexão dos mesmos, apontando problemas de ergonomia.	81
Figura IV.21 – Processos de montagem da estrutura de suporte dos sistemas solares: (a) operação de corte de uma peça metálica da estrutura; (b) operação de furação de um perfil metálico da estrutura; (c) após a limpeza da peça e aplicação de cola, a peça de ligação (bacalhau) é aparafusada pela equipe; (d) peças prontas e devidamente referenciadas para auxiliar na montagem da estrutura (Fotos: Autor).	83
Figura IV.22: Estágios de desacoplamento dos módulos fotovoltaicos da estrutura de suporte. Da esquerda para direita: primeiro, o módulo acoplado; segundo, puxa-se o fecho gatilho e empurra-se o módulo para cima; terceiro, desacoplamento da parte inferior dos módulos (perfil “U”).	84
Figura IV.23: fases de desmontagem das estruturas de suporte dos sistemas solares. Da esquerda para direita: tiram-se os módulos fotovoltaicos (1º fase); já com a estrutura vazia (2º fase), tiram-se os dois perfis metálicos que mantêm a estrutura montada (3º fase); fecha-se a estrutura para que fique nas medidas padrões para viajar em containers standards (4º fase). ..	85
Figura IV.24 – (a) Módulos fotovoltaicos sendo embalados e protegidos dois a dois para colocação nas caixas de madeira. (b) Módulos fotovoltaicos dentro das caixas de madeira, com proteção interna de espuma contra impactos. (Fotos: Fernanda Antônio).....	85
Figura IV.25: Movimentação das estruturas de suporte do sistema de absorção de energia no canteiro em Madri (GALERIA, 2012).	86
Figura IV.26 – Gráfico do balanço de energia elétrica da edificação durante o SDEurope (2012) comparando a energia produzida, a injetada na rede e a importada da rede elétrica, a produzida pelos fotovoltaicos e diretamente consumida e o total de energia consumida (Adaptada pelo autor de DAVI, 2013).	87
Figura IV.27 – Gráfico da Produtividade e do Indicador de Desempenho do Sistema (PR) da Ekó House no período da competição em SDEurope (2012) (Adaptado pelo autor de DAVI, 2013)	87

Figura V.1– Divisão dos atributos envolvidos nos projetos de incorporação de fotovoltaicos em envoltórias de edifícios em quatro grupos (projeto, restritivos, de análise e do produto ao longo do ciclo de vida) e seus respectivos subgrupos.....	90
Figura V.2– Espiral do desenvolvimento do projeto, passando pelos quatro grupos de atributos. O processo de projeto parte dos requisitos do usuário.....	90
Figura V.3– O grupo de atributos de projeto, que compreende o projeto básico ou preliminar, e o desdobramento de seus cinco subgrupos: Rendimento Energético, Estética, Estrutura de Suporte, Controle e Inovação.....	92
Figura V.4– Subgrupo dos Atributos de Projeto. O Rendimento Energético se desdobra em outros dez atributos: Estratégia de Balanço, Localização, Orientação, Tecnologia Fotovoltaica, Área, Tipo de Integração, Indicador de Eficiência do Sistema, Cálculo do Rendimento Anual e Sombreamento.	93
Figura V.5 – Subgrupo de Atributo de Projeto, a Estética. Suas cinco subdivisões (Abordagem, Vedação, Substrato, Moldura, Aparência das Células) e os respectivos desdobramentos.....	98
Figura V.6 – Subdivisão do atributo referente à Estrutura de Suporte do sistema fotovoltaico e seus desdobramentos.	99
Figura V.7–Atributo de controle e subdivisão em sinais, estabilidade dos sistemas, controle dos sistemas e os respectivos desdobramentos.	100
Figura V.8– Atributos restritivos e suas subdivisões em: segurança, confiabilidade, ergonomia, economia, leis e normas.	102
Figura V.9– Atributos da incorporação fotovoltaica ao longo do ciclo de vida.	105

Lista de Tabelas

Tabela II.1 - Exemplos de eficiências médias de célula e de módulo pelas tecnologias mais comumente utilizadas na envoltória de edifícios (Fonte: WELLER <i>et al</i> , 2010).	24
Tabela II.2 - Áreas aproximadas dos módulo mais comuns para gerar 1kWp, a partir da eq. 2.1.....	25
Tabela II.3 - Perda de eficiência aproximada dos módulo mais comuns, para cada grau centigrado de variação da temperatura, fora do STC (WELLER <i>et al</i> , 2010).	28
Tabela III.1 –Apresenta as 27 capitais brasileiras em função da Latitude e de um referencial de insolação, e é organizada por regiões, segundo Figura III.6. (Fonte: organizada a partir de SANTOS, 2013).	41

SUMÁRIO

Agradecimentos	vi
Resumo	vii
Abstract	viii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xix
SUMÁRIO	xx
I. CAPÍTULO	1
1.1 – CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	1
1.2 – MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	4
1.3 – A COMPETIÇÃO DE CASAS SOLARES: SOLAR DECATHLON	6
1.4 – TEMÁTICA ESPECÍFICA ABORDADA NESTA PESQUISA	8
1.5 – OBJETIVO DO TRABALHO	8
1.5.1 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
1.6 – METODOLOGIA	8
1.7 – ESTRUTURA DO PRESENTE DOCUMENTO	9
II. CAPÍTULO	11
2.1 – INTRODUÇÃO	11
2.1.1 - IRRADIAÇÃO SOLAR	11
2.1.2 – PANORAMA DA TECNOLOGIA	13
2.2 - TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS	15
2.2.1 - Células de silício cristalino	15
2.2.2 - Filmes finos	19
2.2.3 - Células baseadas em nanotecnologia	21
2.3 - MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	22
2.3.1 – Eficiência;	24

2.3.2	– Eficiência Vs. Área de geração	25
2.3.3	– Composição dos Módulos.....	25
2.3.4	- Prejuízo do rendimento pelo aumento da temperatura	27
2.3.5	- Prejuízo do rendimento pelo sombreamento	28
2.3.6	–Variação no desempenho dos módulos de acordo com o tipo de radiação incidente29	
2.4	– SISTEMA FOTOVOLTAICO	30
2.5	– CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO	34
III.	CAPÍTULO.....	35
3.1	– INTRODUÇÃO	35
3.1.1	- Possibilidades de Integração na Envoltória	36
3.2	– RENDIMENTO ENERGÉTICO	38
3.2.1	– Radiação Solar Horizontal Global (1º passo):	39
3.2.2	- Fator Orientação (1º passo):	41
3.2.2.1	- Região 1.....	43
3.2.2.2	- Região 2.....	45
3.2.2.3	- Região 3.....	47
3.2.3	Eficiência dos módulos (2º passo)	49
3.2.4	- Área do plano de geração (2º passo).....	50
3.2.5	Tipo de Integração (3º passo):	50
3.2.6	- Rendimento Energético do Sistema (3º passo).....	51
3.2.7	– Estimativa da Geração de Energia Elétrica (4º passo).....	52
3.2.8	– Cálculo Avançado do Rendimento Energético e uso de ferramentas computacionais	52
3.3	– FORMAS DE INCORPORAÇÃO NA ENVOLTÓRIA	52
3.3.1	– Quanto à construtibilidade:.....	53
3.3.2	– Quanto às possibilidades estéticas e compositivas das tecnologias:.....	53
3.3.3	– Quanto à localização na envoltória (coberturas e fachadas):.....	54

3.3.4	– Quanto à movimentação do plano de geração:	56
3.3.5	– Outros requisitos da incorporação fotovoltaica em envoltórias:.....	57
3.4	- ABORDAGENS DE PROJETO.....	58
3.4.1	- SUBJUGADO	58
3.4.2	- DOMINANTE.....	59
3.4.3	- INTEGRADO	60
3.4.4	- SUBORDINADO	62
3.4.5	- IMITAÇÃO	63
3.4.6	- Considerações sobre a Secção	64
3.5	- CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO	64
IV.	CAPÍTULO.....	66
4.1	- APRESENTAÇÃO DO PROTÓTIPO	66
4.1.1	- CORPO DA RESIDÊNCIA	68
4.1.1	–ESTRUTURA ENVOLTÓRIA	69
4.1	– FATORES DETERMINANTES PARA TOMADA DE DECISÃO.....	75
4.1.1	– ATRIBUTOS DO PROJETO FOTOVOLTAICO	75
4.1.2	– ATRIBUTOS RESTRITIVOS	80
4.1.3	– ATRIBUTO DE ANÁLISE.....	82
4.1.4	– ATRIBUTOS DA INCORPORAÇÃO FOTOVOLTAICA AO LONGO DO CICLO DE VIDA.....	82
4.2	- RESULTADOS DURANTE A COMPETIÇÃO.....	86
4.3	- CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO	88
V.	CAPÍTULO.....	89
5.1	- INTRODUÇÃO	89
5.2	- ATRIBUTOS DE PROJETO.....	91
5.2.1	– Rendimento Energético.....	92
5.2.1.1	Estratégia de Balanço:	93
5.2.1.2	Localização:.....	94

5.2.1.3	Orientação:.....	95
5.2.1.4	Tecnologia Fotovoltaica:	95
5.2.1.5	Área:	95
5.2.1.6	Tipo de Incorporação - construtibilidade:	96
5.2.1.7	Indicador de Eficiência do Sistema:	96
5.2.1.8	Cálculo do Rendimento Anual:	97
5.2.1.9	Sombreamento:.....	97
5.2.2	Estética.....	98
5.2.2.1	Abordagens:.....	98
5.2.2.2	Substrato:	98
5.2.2.3	Moldura:	99
5.2.2.4	Célula:.....	99
5.2.3	– Estrutura de Suporte.....	99
5.2.4	– Controle.....	100
5.2.5	– Inovação	101
5.3	- ATRIBUTOS RESTRITIVOS.....	101
5.3.1.1	Segurança:	102
5.3.1.2	Confiabilidade:	103
5.3.1.3	Ergonomia:	103
5.3.1.4	Economia:.....	103
5.3.1.5	Legal:	104
5.3.1.6	Normas:	104
5.4	- Atributo de Análise.....	104
5.5	- ATRIBUTOS DA APLICAÇÃO FOTOVOLTAICA AO LONGO DO CICLO DE VIDA	105
5.6	- CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO.....	106
VI.	CAPÍTULO.....	108
6.1	- SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	110

VI. BIBLIOGRAFIA	111
Apêndice A	119
Exemplo III capítulo	119

I. CAPÍTULO

INTRODUÇÃO

1.1 – CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O crescimento das cidades impõe uma série de desafios aos arquitetos e urbanistas. Os modelos de cidades, em sua maioria, baseiam-se no uso intensivo de recursos com alta produção de resíduos, chamado por Rogers (2008) de “metabolismo linear”. Nessas cidades, alimentos, energia e mercadorias consumidas geram emissões, lixo orgânico e resíduos inorgânicos na mesma proporção (Figura I.1). As fontes de recursos e os locais de descarte estão cada vez mais distantes das cidades ou dos centros de consumo e geradores de resíduos. Com o crescimento das cidades ao redor do mundo, a preocupação com a finitude dos recursos vem ganhando força globalmente. Essa discussão envolve, dentre outros pontos, economia no consumo energético, utilização de fontes limpas e locais para geração de energia, diminuição das emissões etc.

Figura I.1– Esquema de cidades com “metabolismo linear”, grandes consumidoras de recursos, como energia, alimentos e mercadorias, gerando em igual proporção emissões de gases do efeito estufa, lixos e resíduos (fonte: ROGERS, 2008).

As edificações têm um papel decisivo no consumo de energia elétrica nas cidades. No Brasil, o consumo residencial chega a 19,8% do total (Figura I.2); somando-se aos setores público e comercial, as edificações são responsáveis por 40% do consumo energético do país (Figura I.2). Tendo em vista o crescimento populacional das cidades, do número de edificações, conjuntamente com o aumento na renda da população, a tendência é que o consumo de energia cresça cada vez mais.

Figura I.2– Consumo setorial de energia elétrica referente a 2012. Ao considerar o consumo em edifícios residenciais, comerciais e públicos, a porcentagem aumenta para 45,2% (Modificado pelo autor a partir de; BRASIL, 2013)

Segundo estimativas do Ministério de Minas e Energias (2011), esse crescimento será de aproximadamente 4,5% ao ano, variando de 112.690GWh em 2011, para 166.888 GWh em 2020, com ressalvas sobre medidas de eficiência energética:

Medidas de eficiência energética aplicadas no setor residencial podem contribuir para uma economia energética indo de 500 GWh em 2011, para cerca de 6.790 GWh em 2020. (BRASIL, 2011)

Esse panorama de economia energética em edifícios residenciais, economizando 6.290 GWh, exemplifica o impacto de medidas orientadas para a redução do consumo de energia, relacionadas à envoltória dos edifícios e eficiência de seus equipamentos. Somando-se a essas medidas, outras poderiam ser aplicadas nas cidades visando minimizar o consumo de energia, alimentos e mercadorias, reaproveitando, reduzindo e reciclando o possível para reintroduzir recursos novamente ao ciclo e aproximar-se do chamado “metabolismo circular” (ROGERS, 2008). Nesse modelo a entrada de alimentos, energias e mercadorias não apenas é minimizada, mas melhor aproveitada; reduz a geração de poluição, lixo (Figura I.3) e encurta distâncias na busca por recursos.

Figura I.3- Esquema de cidades com “metabolismo circular”, em que a entrada de alimentos, energia e mercadorias é minimizada, procurando também reutilizar e reciclar resíduos e lixos; desta forma, diminui a emissão de poluentes e outros descartáveis (fonte: ROGERS, 2008).

Essas mudanças na visão das cidades podem alterar mais do que a eficiência dos edifícios, ao entendê-los também dentro dessa visão holística e multidisciplinar. As chamadas Residências de Energia Zero (REZ), ou próximo de zero, em inglês *Nearly Zero-Energy Buildings*, são exemplos de iniciativas que caminham nesse sentido. Embora ainda não haja consenso em sua definição, podem ser definidas como:

Edifícios com o consumo anual baixo, obtido por alta eficiência energética, aliada à produção de energia renovável no edifício ou próximo dele. (SCOGNAMIGLIO; ROSTVIK, 2012).

No Brasil, os incentivos para edifícios como esses, com sistemas fotovoltaicos integrados em sua envoltória, ou próximos dela, ainda são incipientes. Contudo, o país tem uma localização privilegiada quanto à radiação solar, melhor do que em países onde o uso desses sistemas é mais difundido:

Índices de radiação solar, na região menos ensolarada do Brasil, são 40% maiores do que na região mais ensolarada da Alemanha (RÜTHER, 2004).

Sistemas fotovoltaicos têm uma grande possibilidade de integração com o espaço das cidades e com o ambiente construído, por ser uma fonte limpa e segura, não emitindo nenhum tipo de poluente durante sua utilização; são silenciosos e leves, se comparados a outras fontes, como à eólica ou às hidroelétricas.

Na teoria, sistemas solares necessitam apenas da disponibilidade local da radiação solar. Contudo, os desafios impostos pela falta de planejamento das cidades brasileiras e fatores como sombreamento, implantação, estética, construtibilidade, legislação, custos e assim por diante, nem sempre têm solução simples.

Essa problemática complexa, observada sob a perspectiva da economia e utilização responsável dos recursos disponíveis, é, portanto, uma discussão também sobre o conceito de nossos edifícios e cidades. Pressupõe uma visão abrangente, a fim de equalizar todos os fatores envolvidos. Neste sentido, a abordagem dos projetistas pode, assim como pontuam Scognamiglio e Rostvik (2012), caminhar na direção de tornar os edifícios eficientes o bastante para que a incorporação dos fotovoltaicos tenha contribuição considerável.

O entendimento do uso de sistemas ou módulos fotovoltaicos na envoltória de edificações oscila entre extremos, como: joias no topo de prédios, dois ou três módulos apenas, segundo o arquiteto Ren Koolhaas, como “ornamentos sustentáveis” (FEIRESS, 2008), ou edifícios como usinas de energia habitadas. Esses entendimentos tendem a afastar a discussão de uma visão ampla de edifícios e cidades (Figura I.3). Por outro lado, pensá-los como um “desafio criativo” (SCOGNAMIGLIO; ROSTVIK, 2012), pode trazer possibilidades interessantes de desenho:

Uma vez que os sistemas de geração renovável de energia, em contraste as formas convencionais, estão visíveis, pela primeira vez na tradição da arquitetura, a energia pode tomar uma “forma” (SCOGNAMIGLIO; ROSTVIK, 2012).

Uma vez que este desafio é colocado aos arquitetos, torna-se necessário um conhecimento mais aprofundado sobre a temática. O presente trabalho visa contribuir com um panorama geral sobre as tecnologias, seu funcionamento e possibilidades de integração em edifícios. Sistematizar os atributos e requisitos que contribuam para enfrentar os desafios voltados à incorporação de fotovoltaicos na envoltória de edifícios e integrados ao projeto arquitetônico, é o ponto de partida desta dissertação.

1.2– MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

A motivação para esta pesquisa surgiu em 2008, quando foi aberto um concurso nacional de ideias com o intuito de formar uma equipe para participar da competição internacional de casas solares, o Solar Decathlon Europe 2010, que aconteceria em Madri, Espanha, no ano de 2010. A entrada deste autor na equipe se deu por conta do projeto que conquistou o terceiro lugar no concurso nacional de ideias, que propunha a formação de um time para participar da competição com os três primeiros colocados. Em 2009, juntamente com mais três grupos de alunos e professores, formou-se o chamado Team Brasil.

Na primeira etapa do projeto, a base organizacional deste time foi dividida entre seis universidades: Universidade de São Paulo (USP), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). A parte conceitual do projeto foi desenvolvida na UFSC, em Florianópolis, e a fabricação e montagem aconteceria no campus da Cidade universitária da USP, em São Paulo, o que levou parte da equipe a se transferir para esta cidade em meados de 2009. Nessa altura, a casa desenvolvida recebeu o nome de Casa Solar Flex. De 2009 até 2010, o projeto foi desenvolvido, inclusive com a compra de alguns materiais, como

a madeira da estrutura, perfis de alumínio para cobertura, módulos fotovoltaicos, entre outros. A não participação no evento se deu por uma série de problemas financeiros, legais, organizacionais, entre outros

O projeto teve continuidade no início de 2011, com cronograma definido para participar da mesma competição, em Madri, no ano de 2012. Nessa segunda etapa do projeto, apenas duas universidades coordenaram os trabalhos, a UFSC e a USP. Dado o impedimento de submeter o mesmo projeto de 2010, a equipe foi reorganizada, desenvolvendo um projeto diferente do anterior, nomeado de Ekó House. Os estudos sobre a incorporação de fotovoltaicos na envoltória do protótipo continuaram com o foco voltado para a produção de energia, resultando em temas de pesquisa de dissertação.

Um dos objetivos do projeto foi alcançado com a participação no *Solar Decathlon Europe* no ano de 2012, juntamente com outras 17 casas, de 10 outros países (SOLAR, 2014). Essa oportunidade enriqueceu sobremaneira a visão e abordagem do tema. Não só pela participação no evento, mas pela possibilidade de envolvimento em todas as etapas de projeto, desde a concepção, detalhamento, projeto para produção, produção, montagem / desmontagem, transporte, funcionamento e operação do protótipo durante a competição.

Outro ponto a ser destacado é o caráter multidisciplinar do projeto. Os desafios impostos pelas logísticas de montagem, desmontagem e transporte demandaram uma abordagem colaborativa, inclusive com setores empresariais e governamentais, como o convênio firmado com a Eletrobrás. Apesar das dificuldades trazidas pelo ineditismo, a relativa liberdade da pesquisa de desenvolvimento permitiu soluções diferenciadas e inovadoras, possíveis apenas pela conexão próxima do detalhamento de projeto com a produção, em um exercício de projeto simultâneo incomum na indústria da construção residencial nacional.

Nos quatro anos de projeto o tema pôde ser aprofundado na troca de informações com todos os envolvidos. Durante este processo de projeto, execução e pesquisa, sentiu-se a necessidade de material de apoio à pesquisa, principalmente na literatura técnica nacional, voltado aos desafios impostos pelas tecnologias de geração fotovoltaica aos arquitetos e urbanistas, no âmbito de soluções arquitetônicas. Para entender tanto a complexidade e o papel dos agentes envolvidos em projetos de sistemas fotovoltaicos em envoltórias de edifícios, como questões relacionadas às possibilidades de incorporação, escolha de tecnologias, estruturas de suporte, percebeu-se que este seria um desafio a ser enfrentado na presente pesquisa.

É importante citar que o trabalho encontra-se dentro de um universo mais amplo de teses e dissertações que envolvem o projeto da Ekó House. Estão sendo desenvolvidos na USP trabalhos que se debruçam sobre questões relacionadas à segurança, estrutura de madeira da residência, sua produção e montagem, produção e prototipagem digital, emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE), entre outros já apresentados na UFSC com visões complementares da temática, uma vez que o objeto de estudo é o mesmo (protótipo Ekó House). Este contexto de pesquisa-ação contribuiu para a escolha e recorte do tema que será apresentado na sequência.

1.3– A COMPETIÇÃO DE CASAS SOLARES: SOLAR DECATHLON

A competição Solar Decathlon foi originalmente criada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (EUA), em 2002. Posteriormente, aconteceu em 2005, 2007, 2009 e 2011, na capital Washington, e em 2013 em Irvine, na Califórnia. A partir de 2005, equipes de outros países, que não os EUA, começaram a participar do evento, sendo que as edições de 2007 e 2009 foram vencidas por equipes alemãs. Na primeira versão europeia, em 2010, o evento foi sediado na cidade de Madri, Espanha, repetindo-se em 2012. Em 2014, ele acontecerá na França. Há uma versão Chinesa da competição cuja primeira edição foi realizada em 2013.

Em aspectos gerais, o evento tem propósitos educativos e científicos. Entre os propósitos específicos da versão europeia estão:

- *Estimular o trabalho multidisciplinar e o enfrentamento de problemas dos edifícios, por meio do desenvolvimento de soluções inovadoras;*
- *Por um lado, dar visibilidade, ao público leigo, das reais possibilidades na redução do impacto ambiental, sem prejudicar o conforto e a qualidade no desenho das casas. Por outro lado, permitir aos profissionais o acesso às técnicas e processos, tanto para estudo como para uso;*
- *Fomentar o acesso das universidades, empresas, e instituições públicas a novas maneiras de colaboração. Por exemplo, através de projetos científicos, testados em condições reais de uso, lançar novos produtos ou melhorar os existentes utilizando-os de maneira mais criativa.*

(SOLAR, 2014)

O nome do evento remete à modalidade olímpica de mesmo nome (decathlon), composta por dez diferentes provas. No caso do evento de casas solares europeu, as 10 provas foram divididas em 5 grupos (Figura I.4). O grupo de arquitetura é composto pela prova de “Arquitetura” e de “Engenharia e Construção”; o de energia pelas provas de “Eficiência Energética” e “Balanço Energético”; o de conforto por “Condições de Conforto” e “Funcionamento da Casa”; o social e econômico pelas provas de “Comunicação e Sensibilização Social” e “Industrialização e Viabilidade de Mercado”, e o grupo estratégico é composto por “Inovação” e “Sustentabilidade” (Figura I.4).

Figura I.4— As 10 provas do evento Solar Decathlon Europe, divididas em seus 5 grupos específicos, sendo que as duas provas do último grupo (estratégicas) são transversais às outras 8 provas (Adaptado pelo autor de SOLAR, 2012).

O Solar Decathlon Americano e o Europeu têm diferenças, inclusive nas regras. As provas estratégicas ganharam mais destaque a partir de 2010, na Europa, tanto no que diz respeito à pontuação, como no julgamento feito de forma transversal às outras 8 provas, como por exemplo, inovação ou sustentabilidade na arquitetura, na engenharia e construção, na eficiência energética. As regras representam a visão da organização - e por que não da escola europeia, sobre o tema das REZ, uma vez que ainda não há um consenso sobre sua definição. A abordagem do evento europeu procura alternativas que visem diminuir o consumo energético, aliadas à geração de eletricidade por fontes limpas, mantendo o padrão de conforto comum à vida moderna, porém, procurando diminuir o impacto sobre o meio ambiente.

As equipes envolvidas passaram por uma série de etapas anteriores ao período da realização das provas em Madrid, etapa final da competição. Essas etapas compreenderam o projeto, desenvolvimento, montagem e desmontagem dos protótipos nos seus respectivos países. Ao final de cada etapa, as equipes entregavam à coordenação do evento uma série de documentos relativos ao protótipo. Os principais eram o *Project Drawings* (PD), pranchas de desenho e o *Project Manual* (PM), memorial e especificações técnicas.

Pontos específicos relacionados às regras da competição que influenciaram de alguma forma o projeto do sistema fotovoltaico serão retomados no quarto capítulo.

1.4– TEMÁTICA ESPECÍFICA ABORDADA NESTA PESQUISA

A quantidade relativamente pequena de trabalhos publicados na literatura nacional, como os de Ruther (2014), Chivelete e Sollo (2010) e Santos (2013), que caracterizem atributos e requisitos para orientar arquitetos na incorporação de sistemas fotovoltaicos em envoltórias de edifícios, motivou, de forma determinante, o trabalho de pesquisa que aqui se apresenta.

Por esse motivo, mesmo sabendo de toda a complexidade que envolve a problemática, desde as relações entre os sistemas, preocupações com os custos, montagem, operação, manutenção, vida útil, entre outros, o foco é voltado à tomada de decisão relativa ao projeto preliminar arquitetônico do edifício.

Esse entendimento caminha no sentido de incentivar, como propõe Scognamiglio e Rostvik (2012), os arquitetos a se engajar nas questões relativas ao desafio criativo dos fotovoltaicos. E contribuir, assim, de forma efetiva, para a mudança de paradigmas no pensamento sobre energias renováveis e sustentabilidade, não como obrigatoriedade, mas como possibilidade de melhoria na qualidade dos edifícios e das cidades.

1.5– OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é caracterizar atributos e requisitos que orientem os projetistas na incorporação de sistemas de geração fotovoltaica em envoltórias de edificações.

1.5.1 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A partir do objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Apresentar o panorama geral das tecnologias de captação fotovoltaicas disponíveis;
- Analisar a incorporação dos painéis fotovoltaicos no protótipo de residência zero Ekó House;
- Apresentar um modelo de projeto para orientar os projetistas a incorporar tecnologias fotovoltaicas à envoltória de edificações.

1.6– METODOLOGIA

Buscando auxiliar o arquiteto nas decisões durante o projeto preliminar de sistemas fotovoltaicos integrados a envoltória de edifícios, este trabalho propõe a apresentação e organização de atributos e requisitos, segundo um modelo de projeto. A intenção é facilitar a obtenção de especificações, a gestão e interação com outros projetos, a identificação de caminhos críticos e o mapeamento das soluções possíveis, ampliando a visão geral do projeto.

Este desafio partiu de problemas práticos que envolveram a fabricação, montagem, funcionamento e desmontagem da REZ Ekó House. A interação multidisciplinar, aliada a necessidade de solucionar de problemas de produção, desafiaram os participantes do Team Brasil a olhar as residências com uma visão mais completa a respeito das influências do

projeto sobre a produção e da produção sobre o projeto. Ou seja: a experiência prática influenciou sensivelmente nos direcionamentos do trabalho e caracterização dos atributos e requisitos relevantes à fase de projeto preliminar arquitetônico.

Paralelamente, a pesquisa bibliográfica permitiu o aprofundamento e a sistematização do conhecimento sobre os componentes do sistema fotovoltaico, para conhecer as suas propriedades, limitações e a influência dos fatores ambientais no seu desempenho, nas formas de integração de módulos fotovoltaicos e nas interferências com outros sistemas da edificação.

A escolha por um modelo de projeto de produtos industriais para servir como base do modelo de integração fotovoltaico em envoltória, que será apresentado no decorrer do trabalho, deu-se por sua visão abrangente da cadeia produtiva, passando pelo projeto, produção e uso. No decorrer do projeto da Ekó House, ficou evidente a influência da cadeia produtiva nas decisões do projeto e o impacto das decisões iniciais sobre encaminhamentos subsequentes, reforçando a percepção de que o projeto deve partir de uma abordagem holística que norteie sua gestão, auxiliando para que a tomada de decisão inicial contemple toda, ou a maioria, das problemáticas envolvidas.

Outras ferramentas de apoio ao projeto de Residências Zero (LIMA, 2012), ou específica de fotovoltaicos (SANTOS, 2013), tiveram fundamental importância na pesquisa e no aprofundamento de questões estéticas, energéticas e específicas das tecnologias fotovoltaicas. Por outro lado, não contemplam de forma clara como outros atributos, por exemplo, os de segurança, ergonomia, confiabilidade, fabricabilidade, montabilidade, usabilidade, ambientais, entre outros, têm reflexo sobre as etapas iniciais de projeto.

Contudo, existem diferenças claras entre a produção de um produto industrializado e o de uma residência fabricada ou montada *in loco*. Destaque para o local, ou sítio onde a residência será colocada, que cria uma série de restrições e encaminhamentos, influenciando sensivelmente na tomada de decisão, principalmente em projetos com fotovoltaicos, em que latitude e orientação são características fundamentais. Especificidades sobre o modelo utilizado, de Fonseca (2000), que não tem um objetivo ou produto específico, também influenciou para a alteração do modelo como apresentado originalmente.

Dessa forma, o modelo proposto no quinto capítulo altera alguns dos atributos e requisitos apontados por Fonseca (2000), principalmente para inserir atributos específicos dos projetos de incorporação de fotovoltaicos em envoltórias, os chamados Atributos de Projeto. A interação entre os atributos também foi modificada, por se entender que, com um objeto claro para analisar, requisitos do usuário e do projeto também ficam mais evidentes. Nesse sentido, a experiência vivida durante o projeto da Ekó House também teve influência na determinação da inter-relação proposta pela espiral do desenvolvimento do projeto.

1.7 – ESTRUTURA DO PRESENTE DOCUMENTO

Este trabalho é composto por mais cinco capítulos. No segundo capítulo são apresentadas características da radiação solar e um panorama das tecnologias mais utilizadas,

relacionando-as no que diz respeito às células fotovoltaicas, seus tipos, eficiência, aspectos estéticos, aos módulos, aspectos construtivos, estéticos, de uso, de eficiência, e finaliza com os sistemas fotovoltaicos, tipos de conexão com a rede elétrica, seus componentes, entre outras características.

O terceiro capítulo é voltado à incorporação dessas tecnologias de geração de eletricidade em envoltória de edifícios. Após uma rápida introdução sobre as possibilidades de integração na envoltória, é apresentado um passo a passo para um cálculo simplificado de rendimento energético de um sistema fotovoltaico, que passa por questões e escolhas de projeto, procurando destacar o reflexo dessas decisões sobre o rendimento. Na sequência, formas de incorporação na envoltória quanto à construtibilidade, possibilidades estéticas e compositivas das tecnologias, sua localização na envoltória, possibilidade de movimentação e alguns requisitos que merecem destaque. Por fim, cinco formas de abordagem de um sistema fotovoltaico que podem ser encarados de forma analítica, ou como abordagem estética do projeto de incorporação.

O quarto capítulo será dedicado ao protótipo de REZ Ekó House. Primeiramente, a apresentação do protótipo, a planta baixa, estruturas e o sistema de cobertura. Depois, alguns dos fatores determinantes para tomada de decisão, com a divisão em atributos de projeto, atributos restritivos, atributos de análise e atributos da incorporação fotovoltaica ao longo do ciclo de vida. A passagem por esses atributos será pautada pelo estudo bibliográfico, e, sobretudo, pela experiência prática de participação no projeto da Ekó House. O entendimento do processo de projeto do protótipo pode contribuir para a compreensão do modelo de projeto que será apresentado no capítulo seguinte.

O quinto capítulo é onde o modelo para obtenção de especificações na incorporação de fotovoltaicos em edificações será apresentado. Parte dos requisitos do cliente na espiral de desenvolvimento do projeto e passa pelos atributos do projeto, como rendimento energético, estética, estrutura de suporte, controle e inovação; atributos restritivos como segurança, confiabilidade, ergonomia, leis, normas; atributos de análise, como impacto ambiental, e atributos da incorporação fotovoltaica ao longo do ciclo de vida, como fabricabilidade, montabilidade, embalabilidade, transportabilidade, armazenabilidade, funcionalidade, usabilidade, manutenabilidade, reciclabilidade e descartabilidade.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões para estudos futuros.

II. CAPÍTULO

TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS

da célula aos sistemas fotovoltaicos

2.1 – INTRODUÇÃO

As células de um sistema fotovoltaico são constituídas, em sua maioria, de silício. Uma célula isolada é insuficiente para a maioria das aplicações, necessitando da associação de várias células. Um conjunto de células compõe os módulos, que, quando associados em série ou paralelo, dão origem aos planos de geração. Existem ainda outros componentes, como os utilizados para fixação dos módulos, cabeamento para conectá-los entre si, disjuntores, sistemas de aterramento, inversores, entre outros. A organização de todos esses componentes dá origem aos sistemas fotovoltaicos (Figura II.1).

Figura II.1- Um conjunto de células fotovoltaicas dá origem aos módulos que, conectados, formam os planos de geração fotovoltaica que podem ser integrados às edificações (Modificado pelo autor de FARKAS *et al*, 2012).

O plano de geração fotovoltaica também pode se localizar junto à edificação, conectando-se à rede de distribuição elétrica, ou funcionando de forma isolada. No primeiro caso, o sistema fotovoltaico deve ser instalado em lugar onde exista a infraestrutura necessária, como postes e transformadores. Já no segundo, o sistema pode ser instalado em locais remotos, sem rede elétrica. Nesses casos são necessários acumuladores de energia, como baterias.

2.1.1 - IRRADIAÇÃO SOLAR

A intensidade da energia solar permanece quase constante ao longo do percurso até o encontro com a terra. Seu “valor aproximado, conhecido como *constante solar*, é de 1.367 W/m²” (WELLER *et al*, 2010). Ao encontrar a atmosfera, a radiação perde força, como pontuam Ruther (2004) e Weller *et al* (2010). Na passagem através da atmosfera e de partículas de O₃ (UV), H₂O (IR), CO₂ (IR), entre outras, a radiação solar reduz sua intensidade para um “máximo de 1.000 W/m² e tem a composição do espectro luminoso

alterada, englobando desde ondas curtas, como as ultravioletas, até as longas, como as infravermelhas (Figura II.2).

Figura II.2: Diagrama de comprimento de onda e frequência, com abrangência das ondas curtas, ultravioletas, até as longas, infravermelhas. (Modificado pelo autor de SELLERINK, 2012).

Contudo, a intensidade da radiação solar pode ser menor em dias com muita nebulosidade, como lembra Weller *et al* (2010), não ultrapassando intensidades de 50W/m². Isso porque a trajetória da radiação se dá através das partículas em suspensão ou massa de ar (em inglês *Air Mass* – AM).

Quando os raios solares estão perpendiculares à superfície terrestre, seu percurso é menor e o AM equivale a 1; a essa radiação dá-se o nome de radiação direta (Figura II.3). Por outro lado, quando o sol não está a pino, o caminho da radiação solar até atingir a terra é maior (AM>1) e parte da radiação é dissipada, recebendo o nome de radiação difusa, mais próxima do espectro de ondas curtas. Seu ângulo de incidência (α) é diferente de 90°, como observado na Figura II.3. Por esses motivos, a intensidade da radiação é menor no início e final do dia.

Figura II.3: Desenho esquemático que mostra de forma simplificada a radiação solar atravessando a atmosfera. Quando a radiação incide perpendicularmente sobre a superfície terrestre, não sendo refletida ou difundida por partículas de água ou sujeira, por exemplo, chama-se de radiação direta (AM=1). Quando a radiação incide inclinada (ângulo = α) ou é dissipada por algum obstáculo, partículas de água ou sujeira, por exemplo, dá-se o nome de radiação difusa (AM>1), aproximando-se mais das ondas curtas.

A radiação solar tem maior intensidade ao longo da linha do Equador e vai diminuindo quando se aproxima das calotas polares. Da mesma forma, não se distribui homogeneamente no globo terrestre ao longo do ano (Figura II.4). No Brasil, a incidência de

radiação global anual é elevada, maior do que em muitos países líderes na produção de energia fotovoltaica, como a Alemanha, Espanha e Estados Unidos, ratificando o potencial do país para gerar energia com a utilização dessa fonte.

Figura II.4: Irradiação global anual mundial (Fonte: Modificado pelo autor de ALMEIDA, 2012 *apud* METEONORM (2012)).

2.1.2 – PANORAMA DA TECNOLOGIA

Os sistemas fotovoltaicos, principalmente células, módulos e inversores, têm evoluído em variedade, eficiência e confiabilidade, ganhando espaço dentre as formas de geração de energia em várias partes do mundo. O potencial instalado e acumulado mundial, por exemplo, mais do que triplicou de 2007 até 2010 (Figura II.5).a):

Figura II.5: Em (a), tem-se a evolução da capacidade instalada mundial em geração fotovoltaica e, em (b), a relação entre a geração isolada e conectada à rede. (Fonte: Modificado pelo autor a partir de BRASIL, 2012c)

O que pode explicar esse fenômeno é o aumento de incentivos para instalação de sistemas fotovoltaicos em países como Alemanha, Estados Unidos, Japão e, mais

recentemente, Espanha, Itália e China. A diminuição do custo de instalação de sistemas fotovoltaicos, o esgotamento de algumas fontes de energia, principalmente advindas de carvão e petróleo, com o consequente aumento das tarifas para o consumo de energia, e a busca por “energia limpa” também podem ter contribuído (BRASIL, 2012c).

No gráfico da Figura II.5 (b), observa-se que a tendência da tecnologia é o desenvolvimento dos sistemas fotovoltaicos conectados à infraestrutura das redes elétricas existentes, eliminando, assim, a necessidade de acumuladores, como baterias. A partir de 2008, quando a capacidade acumulada ultrapassou 10.000 MW e começou a subir de forma mais acentuada, o percentual de sistemas isolados da rede elétrica não ultrapassou 5% do total, continuando nessa média nos anos seguintes.

O baixo nível de emissão de CO₂ equivalente para o meio ambiente, comparado a outras fontes de geração, como à hidroelétrica (Figura II.6), é outra característica positiva e um diferencial dessa tecnologia.

Figura II.6: Gráfico de missões equivalentes de CO₂ para a cadeia de energia. (Fonte: Modificado pelo autor de ROGNER; KHAN, 1998)

Em média, a garantia dos fabricantes de módulos é estimada em 25 anos para os componentes, e em 10 anos para geração acima de 80% do seu potencial, pois ao longo do tempo a capacidade de geração dos módulos diminui. No descarte, a maioria dos componentes, como moldura de alumínio, vidro, pode ser reaproveitada na fabricação de módulos novos.

Segundo Benedito (2009), a tarifa da energia fotovoltaica ainda é, em média, 2,1 vezes maior do que a cobrada pela energia da rede gerada pelos sistemas tradicionais: carvão, gás, hidroelétrica. Porém, o custo vem caindo ano após ano e a tendência, com o aumento da demanda e com a otimização dos processos produtivos, é que caia ainda mais. No Brasil, a política de governo é diminuir o preço da energia para o consumidor final, e no ano de 2013 houve redução de 16,2% na tarifa para o setor residencial e de 28% para o setor industrial.

(GLOBO, 2012). Contudo, o aumento da tarifa de energia elétrica é uma tendência mundial, em razão das conjunturas políticas, econômicas, além de considerar que as reservas de combustíveis fósseis estão mais escassas (BENEDITO, 2009). Por mais que a contribuição da geração de energia fotovoltaica ainda seja desprezível na cadeia energética nacional, as projeções de aumento global de energia, aliadas ao alto nível de incidência solar, como apresentado na Figura II.4, e a possibilidade de integração na arquitetura, permitindo a divisão de custos Estado/consumidor, entre outros benefícios, abre portas para que a energia fotovoltaica seja mais difundida e utilizada no Brasil.

2.2 - TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS

As células são os componentes básicos dos módulos fotovoltaicas, podem ser divididas em dois grandes grupos comerciais: silício cristalino e filmes finos. Um terceiro grupo alia células solares com nanotecnologia e tem obtido resultados promissores, embora ainda não se encontrem viáveis economicamente, principalmente por sua baixa capacidade de geração.

As células se diferenciam umas das outras em sua composição, eficiência, textura, coloração, contatos, tamanho, forma, transparência, podendo contribuir de diversas maneiras, tanto no desenho do edifício, quanto em sua função.

A seguir são apresentados os tipos de células e analisadas algumas de suas características, visando a incorporação em edificações. A seção é voltada, sobretudo, às células de silício cristalino e filmes finos, por serem as mais comercializadas

2.2.1 - Células de silício cristalino

As células feitas de silício cristalino, também denominadas de 1º geração, contabilizam cerca de 90% das células utilizadas em todo o mundo (CHIVELET; SOLLA, 2010). São atualmente as células mais eficientes no mercado e se consolidaram “por sua extrema robustez e confiabilidade” (RUTHER, 2004). As células de silício cristalino subdividem-se em: silício monocristalinas (m-Si) e silício policristalinas (p-Si).

As células de **silício monocristalinas** são consideradas mais puras, quanto aos cristais de silício, pelo processo produtivo:

[...] “crescidas” a partir de um banho de silício fundido de alta pureza (Si = 99,99% a 99,9999%) em reatores sob atmosfera controlada e com velocidades de crescimento do cristal extremamente lentas (da ordem de cm/hora). Levando-se em conta que as temperaturas envolvidas são da ordem de 1400°C, o consumo de energia neste processo é extremamente intenso (RUTHER, 2004).

Em razão dessa homogeneidade estrutural, seu potencial de conversão é considerado alto, variando de 15% a 21% de eficiência (CHIVELET; SOLLA, 2010; WELLER *et al*, 2010). Outra característica das células m-Si, como pontua Weller *et al* (2010), é sua melhor

eficiência em relação à escala final do espectro vermelho, ondas longas. Sendo assim, funcionam melhor com incidência de radiação direta.

Existem as células multicristalinas convencionais (Figura II.7a) e alguns outros tipos especiais; dentre eles destacam-se as de alta eficiência (Figura II.7b), com rendimentos maiores do que 24%, e as híbridas (HIT: *hetero junction with intrinsic thin layer*) (Figura II.7c), que combinam a capacidade de absorção dos filmes finos com as boas propriedades eletrônicas das bolachas monocristalinas (WELLER *et al*, 2010), chegando a rendimentos próximos a 19%.

Figura II.7 – (a) Célula solar multicristalina convencional da empresa Solland Solar (Fonte: SUPSI/ISAAC, 2013e); (b) célula de alta eficiência da empresa SunPower (Fonte: SUPSI/ISAAC, 2013e); (c) célula híbrida da empresa Sanyo (Fonte: RENEWBL, 2009).

As células de **silício policristalinas** têm produção simplificada, apresentando eficiência de conversão menor do que as monocristalinas.

O material de partida é o mesmo que para o m-Si, que é fundido e posteriormente solidificado direccionalmente, o que resulta em um bloco com grande quantidade de grãos ou cristais, no contorno dos quais se concentram os defeitos que tornam este material menos eficiente do que o m-Si em termos de conversão fotovoltaica. (RUTHER, 2004)

Apesar da perda de eficiência, em torno de 4,5% em comparação com as monocristalinas, a simplificação na fabricação reduz o custo de produção (RUTHER, 2004), assim como o consumo energético do processo, motivo pelo qual são mais facilmente encontradas atualmente (WELLER *et al*, 2010).

Existem as policristalinas convencionais (Figura II.8) e outros tipos especiais, dentre eles destacam-se as, em inglês, *ribbon technology* (RUTHER, 2004), que são em formato diferente, em tiras ou fitas.

Figura II.8- Célula solar policristalina convencional (Fonte: BRASIL, 2012c).

A **coloração** das células de silícios cristalinas contém matizes do azul escuro, passando pelo amarelo roxo, até o preto (Figura II.9), sendo que “em princípio pode-se dizer que quanto mais clara a cor, menor a eficiência da célula” (WELLER *et al*, 2010).

Figura II.9 – Células fotovoltaicas coloridas m- Si (a) da fabricante Sunways e p- Si (b) da fabricante Solartetc. (Fonte: SUPSI/ISAAC, 2013f).

Os **contatos** entre uma célula e outra são feitos por meio de uma fita de cobre, como está representado esquematicamente na Figura II.10:

*[...] soldada do contato frontal de uma célula (terminal negativo), até o posterior da próxima (terminal positivo), essas séries de células normalmente são conectadas em paralelo para aumentar a corrente e consequentemente a potência, restando no final apenas duas conexões, uma positiva e outra negativa (WELLER *et al*, 2010).*

Quando os contatos passam somente pela parte posterior das células, são chamados de contatos enterrados. Nesses casos a eficiência da célula tende a ser maior, uma vez que os próprios contatos, em módulos convencionais, sobreiam a célula. Esse é o caso das células m-Si de alta eficiência.

Figura II.10 - Contatos entre células fotovoltaicas, conectando a parte frontal de uma com a posterior da vizinha, aumentando, assim, a potência do conjunto. Vista frontal (a) e Lateral (b).

Além das células com contatos aparentes e com contatos enterrados, existem outros tipos de contatos, repercutindo sobre a estética da aplicação. É o caso das fabricadas pela SollandSolar (Figura II.11a), pela Photovoltech (Figura II.11b) e pela Canadian Solar (Figura II.11c).

Figura II.11- (a) Células solares com tipos diferentes de contatos das fabricantes: Solland Solar, (b) Photovoltech e (c) Canadian Solar. (Fonte: SUPSI/ISAAC, 2013e).

Células fotovoltaicas de silício são encontradas com mais frequência em quatro **formatos**: quadradas (Figura II.12.a), com vértices cortados em ângulo (Figura II.12.b), com vértices arredondados (Figura II.12.c) e redondas (Figura II.12.d). A diferença acontece, como pontua Weller *et al* (2010), pois os blocos de silício de onde as células são cortadas são diferentes. As m-Si são retiradas de um bloco redondo e posteriormente cortadas para melhorar o aproveitamento, quando colocadas nos módulos. Já as p-Si podem ser extraídas de blocos quadrados, não necessitando de cortes para melhorar o aproveitamento.

Figura II.12- Diferentes formatos de células fotovoltaicas e seus respectivos agrupamentos: (a) Células quadradas; (b) Com os vértices cortados em ângulo; (C) com os vértices arredondados e (d) Arredondadas (Adaptado pelo autor a partir de SUPSI/ISAAC, 2013e).

Os tamanhos das células giram em torno de 9cm a 15cm. Tamanhos menores podem ser atingidos com variações dos formatos mais comuns, como células circulares, cortadas em quatro partes. Todavia, quanto menor a célula, maior espaço deixado entre elas, prejudicando o aproveitamento do módulo e, consequentemente, sua eficiência.

Nas tecnologias de silício cristalino, normalmente a **transparência** acontece nos módulos, controlando a distância entre uma célula e outra. Contudo, a transparência pode acontecer também nas células, como é o caso da fabricada pela Sunways, apresentada na Figura II.13.

Figura II.13- Célula fotovoltaica de silício cristalino com transparência, fabricada pela empresa Sunways (Fonte: SUNWAYS, 2012)

2.2.2 - Filmes finos

Os filmes finos são conhecidos como a segunda geração de células fotovoltaicas. Eles podem ser produzidos com semicondutores à base de silício, originando células de silício amorfo (Figura II.14.a), micromorfo (Figura II.14.b) e microcristalino (Figura II.14.c). Também com semicondutores compostos de “telureto de cádmio (CdTe) (Figura II.14.d) e os compostos relacionados ao disseleneto de cobre (gálio) e índio (CuInSe₂ ou CIS e Cu(InGa)Se₂ ou CIGS) (Figura II.14.e). Neste último grupo aparecem elementos que são altamente tóxicos (Cd, Se, Te), ou muito raros (Te, Se, Ga, In, Cd), ou ambos” (RUTHER, 2004).

Figura II.14: (a) Módulo fotovoltaico de silício amorfo flexível em substrato plástico (Fonte: RÜTHER, 2004); (b) Células de silício micromorfo (Fonte: GmbH, 2010); (c) Módulo de silício microcristalino (Fonte: DirectIndustri, 2014); (d) Módulo de telureto de cádmio (CdTe) (Fonte: FirstSolar, 2014); (e) Módulo flexível de disseleneto de cobre (gálio) e índio (CIS) (Fonte: LUND et all, 2008)

Dentre as vantagens dessa tecnologia estão, como pontuam Ruther (2004) e Weller *et al* (2010), o baixo consumo de energia durante a produção e o baixo custo de produção em relação às células de silício cristalino, por conta de seu processo de produção, que atinge temperaturas relativamente baixas, menores do que 300°C.

A configuração final dos módulos é diversificada, podendo ter virtualmente qualquer forma ou tamanho e ser aplicada “sobre um grande número de substratos diferentes, como vidro, chapa metálica, aço inoxidável, cerâmica ou materiais plásticos” (CHIVELET; SOLLA, 2010), o que abre inúmeras oportunidades quanto à integração com a arquitetura.

Como pontua Ruther (2004), essas tecnologias tendem a absorver as radiações mais próximas do azul, ou seja, com comprimentos de ondas menores, melhorando a eficiência na geração, em comparação às de silício cristalino, quando em presença de radiação difusa ($AM > 1$). Outro ponto que pode ser uma vantagem em um país quente como Brasil, é que a perda de eficiência com o aumento de temperatura dessas tecnologias é menor do que com as de silício cristalino, o que será aprofundado na seção 2.3.4 do presente capítulo.

Com as tecnologias de corte a laser, empresas como a Soliker (2011) conseguem **imprimir padrões** variados nas células (Figura II.15), buscando satisfazer as necessidades estéticas das tecnologias fotovoltaicas incorporadas à arquitetura.

Figura II.15 - Células fotovoltaicas com padrões de desenho impressos a laser (Fonte: SOLIKER, 2011).

Os filmes finos também podem propiciar **transparência**, tanto no afastamento de uma fita de células da outra, como na transparência da própria célula. Fabricantes, inclusive, fornecem diferentes taxas de transparência e tonalidades, como pode ser visto na Figura II.16, onde a transparência é de 30%.

Figura II.16 - Módulos de silício amorfo com taxas de transparência de 30% (Fonte: RIXINSOLAR, 2014)

2.2.3 - Células baseadas em nanotecnologia

Células baseadas em nanotecnologia, ou células solares da 3ª geração, ainda não apresentam muitas aplicações comerciais devido a sua falta de estabilidade e baixa eficiência (WELLER *et al*, 2010), apesar de seu desenvolvimento caminhar em ritmo acelerado.

Como lembra Weller *et al* (2010), essas células podem ser orgânicas, conhecidas em inglês como *dye-sensitised solar cells*, ou células sintéticas ou inorgânicas: CIS (Figura II.17.a). As primeiras células solares com essa tecnologia baseavam-se em uma tinta com nano partículas de CIS aplicadas sobre lâmina de alumínio de alta condutividade (Figura II.17.b).

Figura II.17: (a) Células flexíveis com nano partículas de CIS. (b) Nano partículas de CIS aplicadas em lâmina de alumínio de alta condutividade em células colares (Fonte: WELLER *et al*, 2010).

A nanotecnologia aplicada em células fotovoltaicas é bastante promissora, diversas aplicações já são vislumbradas. Um exemplo pode ser visto na Figura II.18, a *Solar Ivy*, que em inglês significa hera solar; pretende funcionar como uma cortina solar, substituindo plantas, como as heras nas fachadas dos edifícios.

Figura II.18 - Célula com Nanotecnologia Solar; pretende funcionar como heras nas fachadas (Fonte; FARKAS *et al*, 2012)

2.3- MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Módulos fotovoltaicos são formados pelas associações de células, devidamente protegidas e estruturadas. Atualmente há uma grande quantidade de módulos no mercado, com diferentes configurações, quanto a tamanho, densidade e tipo de células (Figura II.19.a), composição do módulo, secção transversal (Figura II.19.b), transparência e coloração das células (Figura II.19.c), possibilidade de curvatura (Figura II.19.d), plasticidade do módulo (Figura II.19.e) e forma de fixação na envoltória do edifício (Figura II.19.f).

Figura II.19 – Diferentes configurações dos módulos fotovoltaicos quanto a: (a) tamanho, densidade e tipo de células; (b) composição do módulo, secção transversal; (c) transparência e coloração das células; (d) possibilidade de curvatura; (e) plasticidade do módulo; (f) moldura e forma de fixação na envoltória do edifício (adaptado de WELLER *et al*, 2010)

A célula fotovoltaica contida no módulo define se ele é de silício cristalino, filme fino ou nanotecnologia. Nesta secção, a atenção é voltada apenas para os módulos mais

comumente utilizados na arquitetura: os de silício cristalino, os monocristalinos convencionais, de alta eficiência, híbridas (HIT) e policristalinos convencionais, nos filmes finos os amorfos, micromorfos, microcristalinos, de Cadmio (CdTe) e de Selênio, Índio e Enxofre (CIS) e Telureno, conforme a Figura II.20.

SILÍCIO CRISTALINOS	Monocistalino (conv.)	De Alta Eficiência	Hibrida HIT
	Policristalino (conv.)
FILMES FINO	Silício Amorfo	Silício Micromorfo	Silício Microcristalino
	CdTe	CIS

Figura II.20 – Tipos mais utilizados na arquitetura de módulos fotovoltaicos: os de Silício Cristalino, os Monocristalinos convencionais (Fonte: NITROMIDIA, 2012), de Alta Eficiência (PM, 2012), Híbridas HIT (Fonte: Panasonic, 2013) e as Policristalinas convencionais (Fonte: NITROMIDIA, 2012); os Filmes Finos, os de Silício Amorfo (Fonte: RÜTHER, 2004), de Silício Micromorfo (Fonte: GmbH, 2010), de Silício Microcristalino (Fonte: DirectIndustri, 2014), de Telureto de Cádmio (CdTe) (Fonte: FirstSolar, 2014) e de Disseleneto de Cobre (gálio) e Índio (CIS) (Fonte: LUND *et al*, 2008).

Na sequência, são apresentados aspectos relacionados com os módulos fotovoltaicos, sendo eles: eficiência, relação da eficiência com a área, composição dos módulos e a variação de seu rendimento com a temperatura, sombreamento e com diferentes intensidades de radiação.

2.3.1 – Eficiência;

Segundo Chivelet e Sollo (2012), a eficiência do módulo é definida pelo produto da potência máxima por sua área e subsequente divisão pela potência luminosa que o módulo recebe.

A “potência de máxima ou de pico” é a potência máxima que um módulo é capaz de gerar sob condição padrão (também conhecida como Condição Padrão de Teste, ou CPT) de iluminação e temperatura (1.000 watts por metro quadrado de irradiância solar e atmosfera padrão e 25°C de temperatura do módulo). (CHIVELET; SOLLO, 2010)

Quando normalizado, a eficiência será o quociente entre a potência máxima de um módulo de 1m² e a potência luminosa máxima possível por metro quadrado (1000 W/m²). Por exemplo, um módulo monocristalino de alta eficiência, como os utilizados na Ekó House, com área de 1,2m² e potência máxima de 230 W, sob potência luminosa incidente de 1000 W/ m², terá um rendimento de aproximadamente 19,2%. Na ficha técnica do módulo da SunPower, utilizado no protótipo, a eficiência apontada é de 18,5%, como será visto no quarto capítulo. Essa diferença pode acontecer por conta de perdas a que o módulo está sujeito, como as que acontecem no vidro e substratos, por exemplo.

A Tabela II.1 mostra a máxima eficiência de algumas das células e módulos mais utilizados atualmente na envoltória de edifícios.

	Tipo de célula	Mx. Eficiência da célula (lab.) [%]	Eficiência do Módulo (comercial) [%]
Silício Cristalino	Monocristalina conv.	21,6	12 -- 16
	De alta eficiência	24,7	16 -- 20
	Híbrida HIT	20,2	16 -- 17
	Policristalina Conv.	20,3	11.5 -- 15
Filmes Finos	Silício amorfo	13,2	5 -- 7
	Micromorfo	15,2	5 -- 7
	Microcristalina	13	7 -- 9
	CIS convencional (selênio)	20	8 -- 11
	CdTe	16.5	6 -- 11

Tabela II.1 - Exemplos de eficiências médias de célula e de módulo pelas tecnologias mais comumente utilizadas na envoltória de edifícios (Fonte: WELLER et al, 2010).

A eficiência dos módulos de silício cristalino ainda é maior que a dos módulos de filmes finos, embora as tecnologias de 2º geração tenham evoluído, chegando perto da eficiência dos de silício em alguns casos, a exemplo das células de CIS.

Os materiais utilizados para o encapsulamento das células normalmente refletem parte do espectro luminoso, por esse motivo a eficiência dos módulos é sempre menor, quando comparado à eficiência das células. Como pontuaram Gnoatto, Ferruzzi e Ricieri (2004), fora de condições de laboratório, o rendimento pode ser afetado por uma série de fatores, como céu encoberto ($AM > 1$), aquecimento excessivo, sombreamento parcial ou total, entre outros.

2.3.2 – Eficiência Vs. Área de geração

Quando os fotovoltaicos são incorporados em envoltórias de edifícios, as relações entre a eficiência da tecnologia e o espaço necessário para gerar energia suficiente para seu funcionamento são importantes para dar suporte aos primeiros estudos dos projetistas.

O cálculo da *Área necessária* (A_n) para gerar 1kWp tem relação com a eficiência da tecnologia (Eff) empregada no projeto. A área necessária é a de 1kWp pela eficiência do módulo (FARKAS *et al*, 2012):

$A_n [m^2] = 1 [kWp] / Eff$	eq. 2.1
-----------------------------	---------

Por exemplo, utilizando uma tecnologia de células de silício amorfo com rendimento de 6%, seriam necessários aproximadamente 16,7 m² para gerar 1 kWp ($A_n [m^2] = 1 [kWp] / 0,06 = 16,6 \text{ m}^2$). Segue Tabela II.2 com a área aproximada para gerar 1kWp para outras tecnologias.

	Tipo de célula	Área necessária para gerar 1kWp (m ²)
Silício Cristalino	Monocristalina conv.	8,3 -- 6,25
	De alta eficiência	6,25 -- 5
	Híbrida HIT	6,25 -- 5,9
	Policristalina Conv.	8,7 -- 6,7
Filmes Finos	Silício amorfo	20 -- 14,3
	Micromorfo	20 -- 14,3
	Microcristalina	14,3 -- 11,1
	CIS convencional (selênio)	12,5 -- 9,1
	CdTe	16,7 -- 9,1

Tabela II.2 - Áreas aproximadas dos módulos mais comuns para gerar 1kWp, a partir da eq. 2.1

2.3.3 – Composição dos Módulos

A composição dos módulos fotovoltaicos de silício cristalino e filmes finos é diferente, como pode ser visto na

Figura II.21. Isso acontece pelas diferentes necessidades de proteção desses dois tipos de células e pelos diferentes processos de fabricação e aplicação.

Figura II.21 – Detalhe esquemático da seção, com a composição mais comum, dos módulos de silício cristalinos (a) e dos filmes finos (b), que também podem estar contidos em moldura. (Fonte da imagem: Autor modificado a partir de CHIVELET; SOLLO, 2010 e WELLER *et al*, 2010).

Características físicas das células de silício cristalino, como menor flexibilidade e resistência contra intempéries e choques, assim como limitações dimensionais, acarretam em uma estrutura de secção transversal mais robusta, comparativamente aos filmes finos.

Os módulos de silício cristalino mais comuns têm substrato e cobertura posterior, normalmente, de EVA e PVF, segundo Almeida (2012):

[...] EVA ou acetato de vinil etila (nome científico de copoli(acetato de vinil etila), aplicado diretamente sobre a superfície das células fotovoltaicas e coberto por vidro temperado fabricado com baixo teor de ferro, para reduzir as perdas por absorção, e que também pode ser texturizado para diminuir a reflexão. Na cobertura posterior comumente é empregado o PVF ou fluoreto de polivinil (nome científico de poli(fluoreto de vinila)), comercialmente conhecido como Tedlar® [...] (ALMEIDA, 2012).

Como pontuam Chivelet e Sollo (2010), as células são protegidas por uma moldura metálica de alumínio, com basicamente três funções: proteção do módulo, aumento de resistência e interface de fixação/vedação. Contudo, tanto os módulos de silício cristalino, quanto os filmes finos, não precisam necessariamente dela. O impacto estético dá-se pela falta ou presença da moldura, que nesses casos pode também ser colorida.

Como já visto, o tipo das células, formato, tamanho e disposição nos módulos podem influenciar na estética, na transparência, na eficiência, no funcionamento. Segundo Weller *et al* (2010), a distância mínima necessária para garantir o isolamento elétrico entre duas células é de 2mm. Se for maior, pode propiciar transparência (Figura II.22.a) ou modificar a cor do conjunto (Figura II.22.b), dependendo se o substrato e vedação posterior são incolores ou coloridos. Todavia, quanto maior o afastamento, menor a quantidade de células por módulo, e menor seu potencial de geração.

Figura II.22 – (a) Aplicação de módulos fotovoltaicos com substrato transparente (Fonte: ZEDFACTORY, 2011); (b) Diferentes módulos com substratos coloridos (Fonte: SUPSI/ISAAC, 2013g).

Os módulos de filmes fino têm sua secção transversal simplificada e podem ser aplicados sobre uma gama maior de substratos, permitindo novas configurações, formatos e aplicação sobre diferentes materiais de suporte (Figura II.23)

Figura II.23: Módulos de silício amorfo encapsulados em EVA, com membrada transparente e módulo flexível com células amorfas (Fonte: WELLER *et al*, 2010).

2.3.4 - Prejuízo do rendimento pelo aumento da temperatura

As tecnologias fotovoltaicas têm temperaturas ideais de funcionamento. Sua operação fora desta faixa ótima pode acarretar em redução no desempenho:

*Temperaturas de módulos maiores que 80°C são possíveis em algumas situações, principalmente, nos meses de verão, o que pode reduzir em mais de 25% em sua eficiência (WELLER *et al*, 2010).*

Sendo assim, é importante que estratégias, como a boa ventilação dos módulos, sejam implementadas, principalmente em países tropicais e quentes como o Brasil. A escolha de tecnologia com melhor desempenho, em climas com temperaturas mais elevadas, também deve ser levada em consideração, uma vez que a eficiência não é uniforme. A Tabela II.3 mostra as perdas médias na eficiência de algumas tecnologias com o aumento de temperatura de 1°C acima da ideal. Estes valores podem ser encontrados nas fichas técnicas dos módulos.

	Tipo de célula	Perda na eficiência com o aumento de temperatura [% / °C]
Silício Cristalino	Monocristalina conv.	0,4 -- 0,5
	De alta eficiência	0,3 -- 0,4
	Híbrida HIT	0,33
	Policristalina Conv.	0,4 -- 0,5
Filmes Finos	Silício amorfo	0,1 -- 0,2
	Micromorfo	0,5 -- 0,7
	Microcristalina	0,3 -- 0,4
	CIS convencional (selênio)	0,3 -- 0,4
	CdTe	0,2 -- 0,3

Tabela II.3 - Perda de eficiência aproximada dos módulos mais comuns, para cada grau centígrado de variação da temperatura, fora do STC (WELLER *et al*, 2010).

2.3.5 - Prejuízo do rendimento pelo sombreamento

Tendo em vista que os fotovoltaicos geram energia quando expostos à radiação solar, é compreensível o impacto do sombreamento, parcial ou total, sobre seu rendimento. Contudo, as tecnologias de filme fino e silício cristalino sofrem de forma diferente com as sombras, como pode ser visto na Figura II.24.

Isso acontece pela forma como as células são conectadas umas às outras nos módulos de silício cristalino. Normalmente as linhas de células são conectadas em série, que se conectam em paralelo umas às outras. Sendo assim, quando sombreada uma célula da linha ligada em série, todas as outras da conexão serão impactadas da mesma forma. Nos filmes finos, segundo Weller *et al* (2010), as células são normalmente estreitas e em longas tiras, conectando-se de forma diferente, tornando este fenômeno menos preocupante.

Figura II.24 – Diferença no percentual de perda de rendimento por sombreamento em módulos de silício cristalino e filme fino (Adaptado pelo autor a partir de WELLER *et al*, 2010).

Outro problema ocasionado pelo sombreamento em módulos de silício cristalino é conhecido como *hot spot* e, segundo Ruther (2012), ocorre mais frequentemente quando o sombreamento é parcial, o que diminui a possibilidade de ocorrência quando o acúmulo de sujeira, por exemplo, acontece de forma homogênea, tendendo a afetar somente a geração.

Uma célula solar (em um módulo fotovoltaico) parcialmente sombreada pode vir a atuar como uma carga, o que pode levar a um aquecimento excessivo da célula e possivelmente à destruição do módulo. (RUTHER, 2004)

Por conta dos motivos apresentados, a preocupação com o sombreamento em um projeto que utiliza módulos de silício cristalino deve ser maior. Aspectos relacionados ao sombreamento têm implicações na manutenção dos módulos ao longo do ciclo de vida, principalmente, as associadas à limpeza, com comprometimento também nos atributos de projeto relacionados à segurança no uso, durabilidade, acesso, ergonomia.

2.3.6 –Variação no desempenho dos módulos de acordo com o tipo de radiação incidente

A eficiência dos módulos em CPT é caracterizado com radiação máxima de 1000 W/m, ou seja, para atingir essa eficiência, leva-se em conta o sol em sua localização mais propícia, em um dia sem nuvens ou obstruções. Contudo, as diferentes tecnologias fotovoltaicas têm sensibilidades distintas com relação ao tipo do espectro luminoso incidente, como pode ser observado no gráfico da Figura II.25.

Células de silício cristalino são particularmente sensíveis às radiações solares de ondas longas, já os filmes finos com as partes visíveis do espectro, ou seja, ondas mais curtas. Células amorfas e micromorfas

em particular, atingem melhores rendimentos com irradiação mais fraca e difusa porque eles absorvem ondas curtas (espectro azul) melhores que todas as outras (WELLER et al, 2010).

Figura II.25: Gráfico de Intensidade Relativa [%] por Comprimento de ondas, mostrando que a eficiência das células fotovoltaicas é influenciada pela composição do espectro da luz (Adaptado a partir de WELLER et al, 2010).

Quando aplicados em edifícios, os módulos nem sempre serão utilizados em regiões com bons níveis de radiação direta, como coberturas. Sendo assim, fazer um paralelo entre a variação no desempenho com radiação direta ou indireta, de determinada tecnologia fotovoltaica e sua localização na envoltória do edifício, pode ajudar a maximizar a geração desta aplicação.

2.4– SISTEMA FOTOVOLTAICO

Os componentes mais importantes para os sistemas fotovoltaicos são os módulos. Contudo, existe uma série de outros componentes, como cabos, disjuntores, caixas de passagem, inversores, também fundamentais para o funcionamento do conjunto. Quando incorporada aos edifícios, esta infraestrutura impactará também sobre o espaço físico. Nesse sentido, a fixação dos módulos, a localização dos inversores, de dispositivos de controle e medição ou baterias, o local para passagem dos cabos, são questões que o projeto arquitetônico tem de responder.

Dentro dos sistemas fotovoltaicos existem duas formas por meio das quais o edifício pode desfrutar de sua geração, são elas:

- **Isolado ou autônomo** - Quando o sistema não é conectado à rede, acumulando o excedente da geração em baterias. Esses sistemas são mais comuns em lugares isolados, longe das infraestruturas urbanas, como indicado na Figura II.26.

Figura II.26 - Exemplo de aplicação fotovoltaica autônoma, no Monte Rosa-Zermatt, Suíça (Fonte: FARKAS *et al*, 2012)

- **Conectados à Rede** – São sistemas que utilizam a rede de energia elétrica como suporte, fornecendo a ela o excedente da energia, ou energia durante o dia para utilização no período noturno ou ainda quanto há necessidade. Esse pode ser subdividido em sistemas Centralizados e Decentralizados.

Centralizados: Quando a energia é gerada por grandes centrais fotovoltaicas, conhecidas como fazendas solares (*farms*), não necessariamente próximas às fontes consumidoras. A distribuição de sua energia é similar à das usinas hidrelétricas. Utiliza grande infraestrutura de transmissão para levar a energia do ponto de geração até o de consumo.

Decentralizados ou Distribuída: Quando os pontos de geração elétrica estão pulverizados no território e próximos dos pontos consumidores. Isso é praticável na perspectiva de cidades com metabolismo circular (ROGERS, 2008), em que edifícios podem gerar toda, ou parte, da energia localmente. A geração distribuída conectada à rede torna-se importante, porque favorece as tecnologias fotovoltaicas pelo seu potencial de integração.

“Quaisquer que sejam as modalidades de captação e conversão de energia solar, quanto mais pontos de aproveitamento e conversão desta energia, melhor: adéqua-se a potência gerada aos consumidores específicos, aumenta-se a auto-suficiência de micro-regiões, diminui-se o custo do transporte da energia”. (PALZ, 2002)

Essa rede energética, em que edifícios consumidores podem exportar energia para rede, é tendência entre os países que mais utilizam energia fotovoltaica, mostrado na Figura II.5. Principalmente porque os acumuladores existentes ainda aparecem como um entrave, principalmente por seu tamanho e vida útil. Desta forma, e levando em consideração o tema do presente trabalho, a abordagem dos sistemas fotovoltaicos, neste trabalho, está focada na forma de **geração destituída**.

Os módulos fotovoltaicos são associados em série e/ou paralelo, no intuito de aumentar a potência do sistema; portanto, na comparação entre dois sistemas com módulos e orientações iguais, o que tiver mais módulos vai gerar mais energia. Esses sistemas podem ser divididos em dois, conforme ilustração da Figura II.27. Como pontua Almeida (2012), os

módulos fotovoltaicos (à esquerda na Figura II.27) produzem corrente contínua. Ao passar pelos inversores (A e B), a corrente é convertida em corrente alternada, permitindo o uso nos pontos de consumo da edificação. Os pontos C, D e E, na Figura II.27, representam os dispositivos de seccionamento, proteção, controle e medição do sistema. O lado de corrente alternada (esq.) inclui as instalações elétricas em corrente alternada, condutores e dispositivos de seccionamento, proteção e controle, assim como os relógios de medição (C, D e E).

Figura II.27: Esquema que representa o grid fotovoltaico de uma residência. Os três arranjos fotovoltaicos, com módulos com $P_{max}=100W$ (exemplo), são conectados a dois inversores (A e B), que se conectam a um medidor de geração (D), que, de um lado, passa pelo medidor de consumo (E), ligado aos pontos de consumo, e, de outro lado, a um medidor de energia excedente (C), que é ligado à rede de distribuição de energia. Ao lado esquerdo da imagem, separada pela linha pontilhada, o campo de corrente contínua, ao lado direito de corrente alternada (Modificado a partir de ALMEIDA, 2012 ; FARKAS *et al*, 2012).

No esquema da Figura II.27, supondo que cada um dos 9 módulos tem potência de pico (P_{max}) de 100W, tem-se três arranjos (ou seja, três linhas de módulos conectados), com três painéis em cada um. O arranjo 1 é composto por três módulos em série até o inversor (B). Cada um dos arranjos 2 e 3 liga três módulos em série; por sua vez, os dois arranjos (2 e 3) estão ligados em paralelo e conectados ao inversor A.

Desconsiderando possíveis perdas, a potência de pico que chega ao inversor B é de (n° de módulos conectados (3) x P_{max} do painel) é de 300W, e no inversor A é de (6 x P_{max} do painel) 600W. As potências máximas estimadas são referências para a especificação das potências nominais de projeto para os inversores, ou seja, para o inversor A 600W e para o B 300W. No entanto, isso depende do posicionamento dos módulos no projeto:

Em aplicações onde os módulos não apresentam uma orientação ótima e desta forma não atingem uma alta concentração de irradiação (especialmente em casos de fotovoltaicos em fachadas), é recomendável

escolher inversores com potência nominal de saída menor que a geração dos fotovoltaicos, medida que aumenta a eficiência e reduz o custo dos inversores (WELLER et al, 2010).

Para um arquiteto, o estudo dos possíveis arranjos dos módulos fotovoltaicos em uma cobertura ou fachada pode parecer demasiado específico e sem utilidade para o projeto. De fato, é ideal que a configuração e concepção de projetos sejam um trabalho multidisciplinar e colaborativo. Por outro lado, conhecimentos básicos ajudam na interação e diálogo com profissionais de outras disciplinas podem contribuir no sentido de conceber um projeto mais completo, funcional e bem integrado à arquitetura.

A divisão de um sistema fotovoltaico em coberturas ou fachadas em diferentes arranjos pode trazer benefícios. Isso é de interesse para o projeto de arquitetura, por exemplo, no caso da utilização de painéis de silício cristalino em que seu rendimento é muito afetado por condições de sombreamento. Se hipoteticamente sombreia-se um dos painéis do arranjo 2, o rendimento de todos os painéis desse arranjo será afetado, sendo que o rendimento de cada um não poderá ser maior que o rendimento do painel que está gerando menos. Desta maneira, em um projeto em que o sombreamento em um determinado período do dia é inevitável, o arranjo das conexões, isolando os painéis que sofrem sombreamento em um arranjos independente, pode aumentar o rendimento de todo o sistema.

Sobre as instalações elétricas de corrente contínua é importante frisar que o cabeamento deverá ser protegido de intempéries, utilizando cabos com proteção contra UV.

Como já foi dito anteriormente, os painéis fotovoltaicos geram energia em corrente contínua (DC), tornando-se necessário um equipamento que transforme essa energia em corrente alternada (AC), adequando-a aos padrões de utilização pelas edificações. Esse equipamento tem o nome de inversor. Além de converter a eletricidade de DC para AC, os inversores modernos acumularam algumas outras funções:

[...] seguimento do ponto de máxima potência (SPMP) do gerador fotovoltaico, medidas de segurança para desconexão da rede em condições adversas, mecanismos de anti-ilhamento, medição de parâmetros elétricos (ALMEIDA, 2012).

[...] monitoramento de operação e interface de comunicação (WELLER et al, 2010).

Inversores podem ser conectados aos módulos basicamente de três formas: como o inversor A (Figura II.27), em que somente um arranjo é conectado ao inversor; como o inversor B (Figura II.27), em que dois ou mais arranjos são conectados em paralelo e então ligados ao inversor. E uma terceira, em que cada módulo tem seu próprio inversor.

A eficiência do inversor é tão importante, ou até mais, que a eficiência dos módulos, tendo em vista que é nele que a energia será transformada para o uso final. Dessa forma, é importante não só a especificação de um inversor confiável, mas também o projeto do local onde os inversores serão instalados, que devem atender uma série de exigências para o bom

funcionamento desses equipamentos. Via de regra, os inversores devem ser instalados em locais:

[...] frescos, secos, longe de sujeira e de fácil acesso para manutenção ou substituição (WELLER, 2010).

[...] também é recomendável que o lugar onde se instalará o inversor esteja isolado do resto do edifício, preferencialmente, longe de uma zona de trânsito (CHIVELET; SOLLA, 2010).

Segundo Weller, *et al* (2010), diferentemente dos módulos fotovoltaicos que têm características físicas relativamente simples, os inversores têm componentes muito mais complexos. Dessa forma são os componentes do sistema fotovoltaico mais suscetíveis a falhas e precisam ser substituídos, pelo menos, uma vez durante a vida útil do sistema.

2.5– CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO

O projeto para instalação de módulos fotovoltaicos em envoltórias deve estar harmonizado ao projeto arquitetônico. O conteúdo exposto neste capítulo, sobre características da radiação solar e dos elementos que compõem um sistema fotovoltaico, precisa ser entendido juntamente com as necessidades dos usuários, projetos, edifícios e paisagens. Ou seja, para dar sentido à integração entre as tecnologias de geração fotovoltaica, o edifício e o entorno, o conhecimento prévio dessas variáveis facilitam o diálogo entre os diferentes agentes que influenciam no processo de projeto.

Sabe-se também que as necessidades no campo da geração, distribuição e consumo de energia são prementes na sociedade atual. Essa necessidade de suprir a demanda de energia tem potencializado a evolução de várias tecnologias de geração de energia em todo o mundo, incluindo a fotovoltaica. A tecnologia fotovoltaica, principalmente o modelo conectado à rede, é utilizada no próprio ambiente de consumo (residencial ou industrial), o que, evidentemente, terá reflexos sobre o projeto arquitetônico, uma vez que vem incorporada à edificação por princípio. O uso dessa tecnologia reforça a necessidade de formação dos profissionais, que devem estar preparados para os desafios relacionados à utilização dos recursos disponíveis, de forma consciente e propositiva.

III. CAPÍTULO

APLICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS EM ENVOLTÓRIAS DE EDIFÍCIOS

3.1– INTRODUÇÃO

A aplicação das tecnologias fotovoltaicas em envoltórias de edifícios possibilita a geração de energia em áreas isoladas ou dentro do tecido das cidades. Projetos bem sucedidos são baseados sobretudo em dois fatores: viabilidade econômica e qualidade arquitetônica (SCOGNAMIGLIO, *et al*, 2011). Em países como Alemanha, Estados Unidos, Espanha, Japão e mais recentemente a China, o aumento de projetos com fotovoltaicos incorporados está vinculado também a políticas governamentais de incentivo, reduzindo custos ou concedendo incentivos nas tarifas, por exemplo, facilitando a viabilidade econômica.

No Brasil, incentivos como esses ainda são incipientes ou inexistentes, o que aumenta a responsabilidade dos projetistas, uma vez que atributos do projeto arquitetônico ganham ainda mais importância, já que a motivação é do usuário, ou dono do imóvel, e não de políticas governamentais, o que poderia motivar a incorporação. Sendo assim, um conjunto de características ganha importância, com destaque para a estética, que, como lembram Scognamiglio e Rostvik (2012), tem sido identificada e enfatizada como um fator chave para o sucesso da incorporação de fotovoltaicos em edifícios.

A interação entre os vários agentes envolvidos em projetos de edifícios que incorporam fotovoltaicos em sua envoltória pode ser resumida na relação e sobreposição de três esferas principais: energética, construtiva e arquitetônica/urbanística (Figura III.1). A visão sistêmica sobre o projeto torna-se fundamental, uma vez que as próprias tecnologias fotovoltaicas, sua fixação na envoltória, a geometria mais adequada, fatores legais e normativos, a relação com a cidade, apresentam-se como desafios significativos para o sucesso dessa incorporação.

Figura III.1: Intersecção entre as diferentes esferas de um projeto de incorporação de sistemas fotovoltaicos na arquitetura. Organizam-se ao redor do projeto e usuário questões referentes à: energia, construção e arquitetura e urbanística (Modificado pelo autor a partir de WELLER et al, 2010).

O uso do sistema fotovoltaico pode ser viabilizado economicamente em um empreendimento privilegiando aplicações em harmonia com o entorno, permitindo o aproveitamento das melhores características de cada tecnologia, do ponto de vista construtivo, energético e arquitetônico, substituindo outros elementos da construção por módulos fotovoltaicos. A incorporação dos módulos pode desempenhar outras funções, além da produção de energia, como, por exemplo, proteção solar, contra as intempéries, revestimento, em conjunto com estratégias de conforto térmico, reduzindo custos e buscando elevar o valor agregado do projeto como um todo.

Os módulos fotovoltaicos mais comercializados, como pontua Ruther (2004), são compostos de molduras de alumínio e vidro com alta qualidade, feitos para trabalhar em condições externas de uso, expostos dia e noite às intempéries. Tais características permitem a utilização dos módulos em fachadas ventiladas, por exemplo, podendo em alguns casos utilizar o mesmo sistema de fixação. Soluções que caminham nesse sentido ajudam a minimizar o custo da instalação, tendo em vista que substituem elementos que já seriam incorporados à envoltória do edifício. Nesses casos, custos da instalação como, por exemplo, compra de materiais para fixação e revestimento, podem ser abatidos do custo final da instalação fotovoltaica.

3.1.1 - Possibilidades de Integração na Envoltória

As possibilidades de integração de tecnologias fotovoltaicas em envoltórias de edifícios vêm crescendo à medida em que aumenta o número de integrações, o que requer habilidade do projetista para contemplar no projeto arquitetônico o resultado das discussões com os envolvidos no tema, o desenvolvimento tecnológico e as especificidades dos produtos.

A evolução das tecnologias fotovoltaicas pode ser analisada do ponto de vista do desempenho energético, que vem melhorando com o passar dos anos, mas também considerando o preparo da tecnologia fotovoltaica para integração na envoltória de edifícios. Sistemas Fotovoltaicos Adaptados a Edifícios, ou em inglês *Building Added / Attached Photovoltaic* (BAPV), e Sistemas Fotovoltaicos Integrados a Edifícios, do inglês *Building*

Integrated Photovoltaic (BIPV), são termos cada vez mais recorrentes na literatura técnica. Segundo Scognamiglio e Rostvik (2012), a definição desses dois tipos de incorporação de fotovoltaicos nas envoltórias é:

BAPV: produtos que necessitam de sistemas de montagem adicionais.

BIPV: produtos que contemplam outras exigências das envoltórias de edifícios (como de resistência mecânica, isolamento térmico, sombreamento, etc.) e podem substituir integralmente componentes da envoltória.

Por fazer parte integral da envoltória dos edifícios, um problema recorrente no BIPV é a perda de eficiência pelo aumento na temperatura. Segundo Maturi, et al, 2012, no caso de fachadas sem ventilação, a temperatura dos módulos pode chegar 85°C. Por outro lado, a utilização desses sistemas vinculados a estratégias de ventilação, como as chaminés solares (NEVES, 2012), podem melhorar o desempenho do sistema fotovoltaico e contribuir para estratégias de conforto. Essa possibilidade de integração depende da abordagem multidisciplinar do projeto.

A adaptação mais efetiva dos produtos acompanham a necessidade e as discussões sobre a prática arquitetônica, no que se refere aos fotovoltaicos e edifícios autossuficientes em energia. Em um primeiro momento, quatro possibilidades de integração se destacavam: integração de fotovoltaicos como elementos técnicos, com o foco voltado à geração (Figura III.2.a); elementos fotovoltaicos com estrutura independente (Figura III.2.b); elementos fotovoltaicos com mais de uma função, seja como claraboia, guarda-corpo, proteção solar, entre outras; (Figura III.2.c); integração fotovoltaica como parte da composição formal da envoltória (Figura III.2.d).

Figura III.2 –Possibilidades de integração de fotovoltaicos na envoltória: (a) Como elementos técnicos, foco voltado à geração; (b) Estrutura dos fotovoltaicos independentes; (c) Com mais de uma função, seja como claraboia, guarda-corpo, proteção solar, entre outras; (d) integração fotovoltaica como parte da composição formal da envoltória (Adaptado pelo autor de FARKAS *et al*, 2012).

Porém, outra abordagem pode abrir diferentes perspectivas às tecnologias, aos arquitetos e, por que não, às cidades. É uma mudança no próprio paradigma da incorporação fotovoltaica em envoltórias, preocupando-se não com o que as tecnologias podem fazer pelo edifício, mas com o que o edifício pode fazer pelas tecnologias. Abre portas, como resume Scognamiglio *et al* (2011), para a adaptação da envoltória não só ao sistema fotovoltaico, mas à própria incidência solar, modelando o invólucro do edifício de acordo com uma

determinada orientação, possibilidade de sombreamento, iluminação natural, conforto térmico, entre outros (Figura III.3.b).

Figura III.3 – Desenho esquemático do novo paradigma na incorporação de fotovoltaicos a edifícios: (a) Incorporação tradicional na envoltória; (b) A forma da envoltória é influenciada pela incidência de radiação solar no edifício, com um desenho que privilegie essa incidência (Adaptado pelo autor de FARKAS *et al*, 2012).

3.2– RENDIMENTO ENERGÉTICO

O rendimento energético de um sistema fotovoltaico é a quantidade de energia elétrica produzida por este sistema em determinado período de tempo (normalmente horas, dias ou anos), em relação a um referencial, um modelo. Sendo assim, é uma das características mais importantes em projetos que utilizam fotovoltaicos. Nesses sistemas o rendimento é, de maneira geral, a quantidade de energia solar incidente em determinada superfície, menos suas perdas, como apresentado na Figura III.4. Dentre as perdas, destacam-se as relacionadas à radiação incidente no plano de geração, à orientação, à inclinação e à área do plano de geração, à eficiência do módulo, às ocasionadas pelo aquecimento dos módulos, sombreamento, desempenho dos inversores, entre outras.

É importante que o projetista consiga fazer estimativas do rendimento energético nas fases iniciais do projeto, para que possa tomar decisões com racionalidade e efetividade. A *International Energy Agency* (IEA), TASK 41 (FARKAS *et al*, 2012) apresenta um método para pré-dimensionar o rendimento, baseando-se em quatro passos, que resumem sete procedimentos (Figura III.4); são eles:

1º passo) Radiação solar horizontal global e (3.2.1) e orientação do plano de geração ou fator orientação (3.2.2);

2º passo) Referente à eficiência dos módulos (3.2.3) e à área do plano de geração (3.2.4);

3º passo) Tipo de integração, quanto ao afastamento dos fotovoltaicos da envoltória do edifício (3.2.5), e determinação do rendimento energético do sistema, com o auxílio de fatores conhecidos (3.2.6);

4º passo) E, por fim, a estimativa da geração de energia elétrica (3.2.7);

Figura III.4 - Adaptação de modelo para estimativa do rendimento, segundo os critérios da *International Energy Agency* (IEA), na TASK 41 (Adaptado pelo autor de FARKAS *et al*, 2012).

3.2.1 – Radiação Solar Horizontal Global (1º passo):

A Radiação Solar Horizontal Média Anual (G) pode ser acessada no Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA, *et al*, 2006). Como apresentado na Figura III.5, existe uma distribuição da geração média (Wh/Wa/ano) para cada uma das regiões geográficas do Brasil, mais intensa na parte central do país, mas com médias altas, de forma geral, em comparação a países europeus.

Figura III.5 – Mapa da Radiação Solar Global Horizontal - Média Anual do Brasil (Modificado pelo autor a partir de PEREIRA, *et al*, 2006)

Valores da radiação solar horizontal global para capitais brasileiras foram calculados por Santos (2013) e são apresentados na forma de ábacos. A Tabela III.1 foi estruturada a partir desses ábacos. A tabela organiza as 27 capitais brasileiras em função de sua latitude, referenciais solares e três regiões diferentes, segundo a Figura III.6. É possível observar, por exemplo, que a intensidade média máxima de radiação sobre o plano horizontal varia cerca de 20% entre a cidade com menor intensidade de radiação (Florianópolis) e a maior (Goiânia). Essa variação produz reflexos na radiação diária, sendo que ao longo do ano isso pode ser significativo. Ao considerar um ciclo de vida de 30 anos, tais referenciais podem se tornar muito importantes.

	CIDADES	LAT.	100% Radiação Média Máxima no Plano Horizontal		
			PLANO [kWh/m²]	DIA [kWh/m²/dia]	ANO [kWh/m²/a]
REGIÃO 1	Macapá - AP	0,03°N	5,423	5,4	1979
	Belém - PA	1,4°S	5,466	5,4	1995
	São Luis - MA	2,5°S	5,576	5,6	2035
	Boa Vista - RR	2,8°S	5,547	5,5	1949
	Manaus - AM	3,1°S	5,165	5,1	1885
	Fortaleza - CE	3,7°S	5,677	5,7	2072
	Teresina - PI	5°S	5,77	5,8	2106
	Natal - RN	5,7°S	5,497	5,5	2006
	João Pessoa - PB	7,1°S	5,424	5,4	1979
REGIÃO 2	Recife - PE	8°S	5,248	5,2	1915
	Porto Velho - RO	8,7°S	5,261	5,2	1920
	Maceió - AL	9,6°S	5,34	5,3	1949
	Aracaju - SE	10,9°S	5,525	5,5	2016
REGIÃO 3	Salvador - BA	12,9°S	5,487	5,5	2002
	Rio Branco - AC	9,9°S	5,274	5,3	1925
	Palmas - TO	10,1°S	5,598	5,6	2043
	Cuiabá - MT	15,6°S	5,63	5,6	2054
	Brasília - DF	15,8°S	5,698	5,7	2078
	Goiania GO	16,6°S	5,935	5,9	2166
	Belo Horizonte - MG	19,9°S	5,73	5,7	2091
	Vitória - ES	20,2°S	5,056	5	1841
	Campo Grande - MS	20,4°S	5,827	5,8	2126
	Rio de Janeiro - RJ	22,9°S	5,145	5,1	1878
	São Paulo - SP	23,5°S	5,067	5,1	1849
	Curitiba - PR	25,4°S	4,927	4,9	1798
	Florianópolis - SC	27,5°S	4,77	4,8	1741
	Porte Alegre - RS	30°S	5,125	5,1	1870

Tabela III.1 –Apresenta as 27 capitais brasileiras em função da Latitude e de um referencial de insolação, e é organizada por regiões, segundo Figura III.6. (Fonte: organizada a partir de SANTOS, 2013).

3.2.2 - Fator Orientação (1º passo):

A intensidade de irradiação recebida pelos planos de geração é influenciada diretamente pelas: localização, latitude, orientação e inclinação em relação ao plano horizontal. O fator de orientação é uma grandeza que representa a porcentagem [%] de irradiação incidente sobre um plano, considerando sua orientação e inclinação.

No trabalho de Santos (2013), são apresentados ábacos planificados para todas as capitais do país, utilizando dados do programa SWERA e Radasol. Foram encontradas semelhanças com relação às características de incidência de irradiação apresentadas nos ábacos, possibilitando a organização das capitais em três grupos. Considerando as capitais

como representativas dos Estados, o trabalho apresentou uma divisão do mapa do Brasil, especializando os grupos de semelhanças dos ábacos em três regiões, segundo a Figura III.6.

Figura III.6 – Mapa do Brasil dividido em três regiões, segundo semelhanças nos padrões de incidência de radiação solar dos ábacos das capitais brasileiras (adaptado pelo autor a partir de SANTOS, 2012).

Com o propósito de facilitar a visualização dos dados contidos nos ábacos apresentados por Santos (2013), foram elaboradas representações tridimensionais com os dados de interesse a esta pesquisa. Para tanto, foram selecionados, para cada uma das três regiões, onze pontos diferentes em cada um dos ábacos das capitais e identificados com letras em ordem alfabética do “a” ao “l”, como apresentado na Figura III.8. Esses pontos representam os fatores de orientação encontrados nas onze faces da representação volumétrica (ábaco volumétrico), sendo elas (orientações e respectivas inclinações): Norte (0° , 45° e 90°), Nordeste (45° e 90°), Leste (45° e 90°), Noroeste (45° e 90°) e Oeste (45° e 90°), conforme a Figura III.7.

Representações tridimensionais semelhantes foram encontradas na bibliografia técnica européia, nomeadamente Weller, *et al*, (2010) e Farkas *et al* (2012). A escolha por esse tipo de representação, embora menos precisa do que os ábacos planificados, deu-se por entender que sua leitura é mais direta e simplificada para os primeiros estudos energéticos e volumétricos do edifício. Isso não exclui a utilização do abáco planificado, ou de outros métodos para obtenção dos fatores de orientação.

Figura III.7 – Ábaco volumétrico com a marcação dos onze pontos (nomeados por letras do “a” ao “l”), que serão transferidos para os ábacos planificados, para obtenção do fator orientação em cada face para as três regiões do Brasil.

Na sequência são apresentados, para cada uma das três regiões, o ábaco planificado com a indicação dos onze pontos referentes às faces do ábaco volumétrico, bem como as representações tridimensionais finalizadas. Também são apresentadas as principais características de cada região.

3.2.2.1 - Região 1

A Região 1 pode ser identificada na Figura III.6, e as suas nove cidades estão listadas na Tabela III.1.

O ábaco na Figura III.8 apresenta o potencial de radiação recebido pelas superfícies em Natal, RN, que foi escolhida como representativa da região 1, por conta de sua latitude intermediária em relação às outras cidades dessa região. Os pontos “a”, “b”, “c”, “d” e “e” representam os fatores solares encontrados nas faces ortogonais do solo (90°), com orientações, respectivamente: oeste, noroeste, norte, nordeste e leste. Os pontos “f”, “g”, “h”, “i” e “j” representam os fatores solares encontrados nas faces inclinadas a 45° , com orientações, respectivamente: oeste, noroeste, norte, nordeste e leste. Já o ponto “l” representa o fator solar encontrado na face paralela ao solo (0°), orientada ao zênite.

Figura III.8 – Ábaco planificado do potencial de radiação recebido pelas superfícies na cidade de Natal, RN, escolhida como representativa da Região 1, com a marcação dos onze pontos necessários para montar o ábaco volumétrico, segundo a Figura III.7 (adaptado pelo autor a partir de SANTOS, 2012).

A média entre o resultado do fator de orientação de cada um dos pontos nas nove capitais da Região 1 deu origem às representações tridimensionais expostas na Figura III.9. O valor da radiação média máxima, em um dos onze planos do ábaco volumétrico, é o produto da radiação média máxima em determinada cidade dessa região, Tabela III.1, pelo fator orientação desse plano. Portanto, se 100% da radiação incidente sobre um plano em Natal é $5,495 \text{ kWh/m}^2$, o valor da radiação incidente sobre a fachada norte, perpendicular ao solo (90°), seria reduzida à metade ($5,495 \text{ kWh/m}^2 \times 0,50 = 2,747 \text{ kWh/m}^2$), pois o fator solar é 50% (Figura III.9) para esse plano, nessa região.

Figura III.9 – Ábaco volumétrico representativo das cidades capitais da Região 1, listadas na Tabela III.1 e especializadas no mapa do Brasil, no lado superior esquerdo da figura. Apresenta a porcentagem [%] do potencial de radiação recebido pelas onze superfícies representadas no ábaco.

Observando o ábaco volumétrico da Região 1 (Figura III.9), é possível concluir a respeito do fator orientação que:

- O fator orientação máximo (95%) é atingido no plano orientado a zênite (0°).
- Com a inclinação do plano de 45° , o fator orientação é igual a 85% para todas as orientações.
- Planos perpendiculares (90°) orientados a leste, nordeste, oeste e noroeste possuem ganhos maiores que os voltados para Norte, características de cidades mais próximas da linha do Equador devido à trajetória solar.

Outras conclusões relativas à orientação e à inclinação dos planos de geração na cidades da Região 1, pontuadas por Santos (2013) e que podem ser observadas no ábaco planificado da Figura III.8, são:

- Planos com inclinação variando de 0° a 20° , ou iguais às latitudes das cidades, têm valores máximos do fator orientação (95%) em qualquer orientação.
- Planos com inclinação variando de 20° a 35° têm valores do fator orientação igual a 90%, em qualquer orientação.

3.2.2.2 - Região 2

A Região 2 pode ser identificada na Figura III.6, e suas quatro cidades estão listadas na Tabela III.1.

O ábaco na Figura III.10 apresenta o potencial de radiação recebido pelas superfícies em Cuiabá, MT, que foi escolhida como representativa da região 2, por conta de sua latitude intermediária em relação às outras cidades dessa região.

Figura III.10 - Ábaco planificado do potencial de radiação recebido pelas superfícies na cidade de Cuiabá, MT, escolhida como representativa da Região 2, com a marcação dos onze pontos necessários para montar o ábaco 3D, segundo a Figura III.7 (adaptado pelo autor a partir de SANTOS, 2012).

A identificação dos pontos e a leitura do ábaco seguem a mesma metodologia da utilizada na Região 1, mencionada anteriormente. Sendo assim, se 100% da radiação incidente sobre um plano em Cuiabá, conforme Tabela III.1, corresponde a $5,630 \text{ kWh/m}^2$, o valor da energia incidente na fachada norte, perpendicular ao solo, é o máximo de energia ($5,630 \text{ kWh/m}^2$) multiplicado pelo fator orientação nessa fachada (55% segundo a Figura III.11), neste caso resultando em aproximadamente $3,096 \text{ kWh/m}^2$.

Figura III.11 - Ábaco volumétrico representativo das cidades capitais da Região 2, listadas na Tabela III.1 e especializadas no mapa do Brasil no lado superior esquerdo da figura. Apresenta a porcentagem [%] do potencial de radiação recebido pelas onze superfícies representadas no ábaco.

Observando o ábaco volumétrico da Região 2 (Figura III.11), é possível concluir a respeito do fator orientação que:

- O fator orientação máximo (95%) é atingido no plano orientado a zênite (0°).
- Com a inclinação do plano de 45° , o fator orientação é igual a 90% para as orientações do quadrante norte, e diminui 8% para leste e oeste.
- Planos perpendiculares (90°) com qualquer orientação têm o mesmo fator de orientação (55%).

Outras conclusões relativas à orientação e inclinação dos planos de geração na cidades da Região 2, pontuadas por Santos (2013) e que podem ser observadas no ábaco planificado da Figura III.8, são:

- Planos com inclinação variando de 0° a 15° , ou iguais à latitude das cidades, têm valores máximos do fator orientação (95%) nas orientações norte, noroeste e nordeste.
- Planos com inclinação variando de 0° a 30° têm valores máximos do fator orientação (95%), com orientação variando entre 60° Leste / Oeste.

3.2.2.3 - Região 3

A Região 3 pode ser identificada na Figura III.6, e suas quatorze cidades estão listadas na Tabela III.1.

O ábaco da Figura III.12 apresenta o potencial de radiação recebido pelas superfícies em São Paulo, SP, que foi escolhida como representativa da região 3, por sua latitude intermediária em relação às outras cidades dessa região.

Figura III.12 - Ábaco planificado do potencial de radiação recebido pelas superfícies na cidade de São Paulo, SP, escolhida como representativa da Região 3, com a marcação dos onze pontos necessários para montar o ábaco 3D, segundo a Figura III.7 (adaptado pelo autor a partir de SANTOS, 2012).

A identificação dos pontos e a leitura do ábaco segue a mesma metodologia da utilizada na Região 1, mencionada anteriormente. Sendo assim, se 100% da radiação incidente sobre um plano em São Paulo, conforme Tabela III.1, corresponde a 5,067 kWh/m², o valor da energia incidente na fachada norte, perpendicular ao solo, é o máximo de energia (5,067 kWh/m²) multiplicado pelo fator orientação nessa fachada (50%), segundo a Figura III.13, nesse caso resultando em aproximadamente 2,533 kWh/m², ou à metade da incidência média máxima.

Figura III.13 - Ábaco volumétrico representativo das cidades capitais da Região 3, listadas na Tabela III.1 e especializadas no mapa do Brasil, no lado superior esquerdo da figura. Apresenta a porcentagem [%] do potencial de radiação recebido pelas onze superfícies representadas no ábaco.

Observando o ábaco volumétrico da Região 3 (Figura III.13), é possível concluir a respeito do fator orientação que:

- O fator orientação é igual a 90%, quando o plano é orientado a zênite (0°) e a norte com inclinação de 45°.
- Com a inclinação do plano de 45°, o fator orientação é menor nas fachadas leste e oeste (80%) e aumenta em até 10%, quando orientado a norte.
- Planos perpendiculares (90°) orientados a leste e oeste têm a menor porcentagem de fator solar (45%), em comparação aos valores dos outros dois ábacos.

Outras conclusões relativas à orientação e inclinação dos planos de geração na cidades da Região 2, pontuadas por Santos (2013) e que podem ser observadas no ábaco planificado da Figura III.8, são:

- Planos com inclinação variando de 5° a 15° têm valores máximos do fator orientação (95%), em qualquer orientação do quadrante norte.
- Planos com inclinação variando de 5° a 30°, ou iguais à latitude das cidades, têm valores máximos do fator orientação (95%), com orientação variando entre 45° Leste / Oeste

Considerações sobre a Seção:

Pode-se observar, de forma geral, que o arquiteto usufrui de uma liberdade para orientação e inclinação das coberturas, buscando as taxas médias máximas de incidência solar mais convenientes ou adequadas ao projeto, maior do que, muitas vezes, se pensa.

No caso das representações volumétricas, mesmo que sejam menos precisas e não tenham tantas interpretações, como as fornecidas por ábacos planificados, por exemplo, elas podem servir como ferramentas interessantes para a análise rápida dos potenciais de integração fotovoltaica em determinada região. Se esse tipo de ferramenta for utilizada já nas fases iniciais do projeto, durante o projeto preliminar, pode ajudar tanto na definição conceitual, como a traçar diretrizes mais precisas a respeito da envoltória do edifício.

3.2.3 Eficiência dos módulos (2° passo)

A eficiência dos módulos em CPT é um dos atributos mais importantes dos módulos fotovoltaicos e trará implicações diretas sobre o rendimento do sistema e a área de aplicação do plano de geração. Caso a especificação dos módulos ainda não tenha sido decidida no momento do início do projeto, podem-se utilizar as eficiências médias encontradas na Tabela – II.1, no segundo capítulo.

Nesse caso características, como o tipo da tecnologia fotovoltaica utilizada, densidade de células por módulo, tipo de sua secção transversal, coloração, transparência e outras características relacionadas aos fotovoltaicos, não influenciam de forma direta. Contudo, como foi visto no capítulo anterior, algumas dessas características têm reflexos sobre a eficiência dos módulos, portanto, devem ser consideradas na análise.

3.2.4 - Área do plano de geração (2º passo)

Em termos médios, pode-se calcular a *Área necessária* (A), segundo Farkas *et al* (2012), como sendo função da *Potência nominal do sistema* (P_{FV}) de n kWp, dividida pela eficiência da tecnologia (Eff), como apresentado na Equação III.1:

$A [m^2] = P_{FV} [kWp] / Eff$	Equação III.1
--------------------------------	---------------

Por exemplo, ao optar por uma tecnologia com eficiência de 6%, para gerar 5kWp, pode-se obter a área requerida para a geração pretendida, como exposto na Equação III.2

$A [m^2] = 5 [kWp] / 0,06 = 83m^2$	Equação III.2
------------------------------------	---------------

Áreas aproximadas podem ser arbitradas também utilizando a Tabela II.2, apresentada no segundo capítulo.

Convém destacar que são dados aproximados, voltados aos primeiros estudos, durante o projeto básico. Simulações que considerem a incidência solar do local, a orientação e inclinação do plano de cobertura, são necessárias para dados mais precisos.

3.2.5 Tipo de Integração (3º passo):

A incorporação dos módulos fotovoltaicos em envoltórias de edifícios pode considerar a ventilação na parte posterior dos módulos, procurando diminuir sua temperatura. O *Swiss BIPV Center of Competence* diferencia o afastamento dos módulos da superfície da envoltória de três formas: integrando o módulo sem deixar espaço para ventilação, resultando em perdas de cerca de 10%; deixando pouco espaço, aproximadamente 5 cm, para perdas de 5% e, por fim, com espaço suficiente para a ventilação aceitável, a partir de 15cm, resultando em perdas nulas ou próximas de zero (Figura III.14). Essas diferenciações são importantes, pois como já foi visto, a eficiência dos módulos cai consideravelmente com o aumento de temperatura, o que é minimizado caso haja espaço suficiente para a circulação de ar na parte posterior dos módulos.

Figura III.14 – A figura apresenta três formas diferentes de integrar os módulos fotovoltaicos em envoltórias, quanto ao espaço deixado entre os módulos e a superfície externa do edifício: (a) com espaço maior ou igual a 15cm, as perdas por aquecimento são próximas de zero; (b) com espaço de aproximadamente 5cm, perdas por aquecimento próximas de 5%; (c) sem espaço para ventilação, perdas de aproximadamente 10%(Modificado pelo autor a partir de SUPSI/ISAAC, 2013b)

Essas porcentagens de perdas são aproximações para um primeiro cálculo, que não leva em consideração o desempenho das diferentes tecnologias em relação ao aquecimento, como visto no capítulo anterior, nem as temperaturas relativas de cada localidade, que no Brasil tendem a ser mais elevadas do que na Suíça, onde o estudo foi feito. É importante que o projetista utilize esse conhecimento na fase inicial do projeto. Por exemplo, se o projeto inviabiliza o afastamento dos módulos em relação ao envelope do edifício, a alternativa pode ser a escolha por tecnologias que não tenham sua eficiência tão afetada pelo aquecimento, ou o resfriamento dos módulos com outra estratégia.

3.2.6 - Rendimento Energético do Sistema (3º passo)

Existe uma série de indicadores que medem o rendimento de sistemas fotovoltaicos. Segundo Leloux, Narvarte e Tresbosc (2011), o mais comum é o conhecido, em inglês, como *Performance Ratio* (PR), que é simplificada a relação entre o rendimento esperado e o rendimento real do sistema, medido durante a operação do sistema.

A efetiva medida do PR de um sistema fotovoltaico só pode ser conhecida com o acompanhamento do desempenho do sistema em funcionamento. Vários fatores podem influenciar no rendimento de sistemas fotovoltaicos, como temperatura dos módulos, o tipo de integração do sistema, a radiação solar incidente, o sombreamento por elementos externos ou sujeira, perdas nos cabos e inversores, tipo da tecnologia fotovoltaica aplicada, entre outros, o que dificulta estimativas precisas do PR.

Contudo, estudos em países europeus, como a França e a Bélgica, apontam rendimentos médios de, respectivamente, 76% e 78%, sendo que em alguns casos ele pode chegar próximo de 96% (LELOUX; NARVARTE; TRESBOSC, 2011). Sistemas mais novos tendem a ter perdas menores. Autores (FARKAS, *et al*, 2012 ; WELLER, *et al*, 2013) consideram porcentagens entre 70% e 85% rendimentos aceitáveis para sistemas fotovoltaicos bem projetados. Sendo assim, para estimativas preliminares do rendimento, pode-se adotar o valor médio de 80%, considerando um arredondamento do rendimento, uma

vez que se parte do princípio que o sistema será bem projetado, buscando estratégia que privilegiem o bom rendimento do conjunto. Caso a integração não permita ventilação, por exemplo, o PR de 80% será decrescido de 10%, como visto na seção anterior.

3.2.7 – Estimativa da Geração de Energia Elétrica (4º passo)

A estimativa da geração de energia elétrica (do inicial do Rendimento Energético, como definido na Equação III.2) é função de G (Radiação Solar Média Máxima Anual), dos valores para as capitais encontrados na Tabela III.1, do Fator de Orientação (obtido segundo a seção 3.2.1), da área do plano de geração (seção 3.2.3), da eficiência da tecnologia (Tabela II.1) e do rendimento do sistema.

$Produção\ energética = G[kWh/m^2a] \cdot Fator\ Orientação[\%] \cdot Área[m^2] \cdot eff[\%] \cdot PR[\%]$	Equação III.3
---	---------------

A produção de energia de um sistema fotovoltaico é, em termos gerais, a quantidade de energia incidente sobre determinada área do plano de geração, menos uma série de coeficientes de minoração, definidos neste caso por: fator orientação, eficiência dos módulos e desempenho do sistema.

3.2.8 – Cálculo Avançado do Rendimento Energético e uso de ferramentas computacionais.

Cálculos mais precisos da geração em determinado plano podem auxiliar diretamente o projeto de incorporação fotovoltaica. Existe uma série de aplicativos computacionais (*softwares*) que facilitam a simulação para estudo de diferentes cenários de uma incorporação. Tais dispositivos auxiliam o projetista e facilitam o entendimento do estudo, ante as facilidades de compartilhamento com os aplicativos de projeto arquitetônico.

Exemplo desses aplicativos são, no âmbito internacional, o Sunny Designs da empresa de equipamento para sistema fotovoltaicos SMA; nacionalmente, destacam-se o SunData, do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), disponível no site <http://www.cresesb.cepel.br/sundata/>, e o RADIASOL, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), disponível em <http://www.solar.ufrgs.br/#softwares>. Por não ser de aplicação direta neste trabalho o aprofundamento no uso dessas ferramentas computacionais, essa questão não é aprofundada.

3.3– FORMAS DE INCORPORAÇÃO NA ENVOLTÓRIA

As tecnologias fotovoltaicas podem ser incorporadas de diversas formas na envoltória dos edifícios. Essas incorporações são recursos à disposição do projeto arquitetônico para contemplar as tecnologias e os melhores posicionamentos quanto à radiação solar. A seção a seguir apresenta possibilidades para a incorporação das tecnologias fotovoltaicas na envoltória de edifícios a partir da síntese da Weller, *et al*, (2010), Chivelet e Solla (2010), Farkas, *et al*, (2012), Santos (2013) e de informações presentes no website da *Swiss BIPV Center os Competence* (SUPSI/ISAAC, 2013a).

As possibilidades de incorporação são agrupadas quanto à construtibilidade, estética e composição, localização da envoltória e movimentação do plano de geração.

3.3.1 – Quanto à construtibilidade:

Do ponto de vista construtivo, as incorporações fotovoltaicas na envoltória do edifício se distinguem em três diferentes abordagens, como pontua Weller, *et al*, (2010):

Adição (Figura III.15.a): Quando os fotovoltaicos estão sobrepostos à envoltória, mas sua relação é apenas de suporte. Necessita de outros sistemas auxiliares para o acoplamento no edifício.

Substituição (Figura III.15.b): Quando os fotovoltaicos estão sobrepostos à envoltória, mas substituem outros elementos do edifício, como revestimentos, proteções solares, telhas, entre outros. Podem necessitar de sistemas auxiliares de montagem, mas muitas vezes os módulos são adaptados para exercer determinada função.

Integração (Figura III.15.c): Quando os fotovoltaicos são a própria envoltória do edifício, não sendo possível sua diferenciação ou separação. Não têm a necessidade de outros sistemas auxiliares de montagem.

Figura III.15 – Formas básicas para acoplamento dos módulos fotovoltaicos na envoltórias de edifícios: (a) sobreposta à envoltória construída da edificação, com afastamento entre os fotovoltaicos e a edificação; (b) sobreposta à envoltória construída da edificação, sem afastamento; (c) quando a tecnologia fotovoltaica é a própria envoltória do edifício (modificado pelo autor a partir de WELLER, *et al*, 2010).

Independentemente da abordagem utilizada, é importante levar em consideração na tomada de decisão os aspectos construtivos, como a fabricação, a montagem, a disponibilidade no mercado; os aspectos energéticos ou aspectos funcionais, como a eficiência, a possibilidade de superaquecimento, a manutenção, e os aspectos arquitetônicos, como a relação com o entorno, com o resto do edifício, com outros sistemas, abordando-os de forma multidisciplinar.

3.3.2 – Quanto às possibilidades estéticas e compositivas das tecnologias:

Do ponto de vista construtivo, a forma como o módulo se incorpora ao edifício se relaciona também com as características da tecnologia escolhida. Como já foi visto no segundo capítulo, as tecnologias fotovoltaicas disponíveis atualmente fornecem uma série de possibilidades estéticas de incorporação, permitindo ao arquiteto liberdade compositiva considerável quanto à estética da tecnologia, modulação na superfície da envoltória, transparência, flexibilidade e curvatura, como pode ser visto na Figura III.16:

Estética da tecnologia (Figura III.16.a): Diz respeito às características estéticas das tecnologias fotovoltaicas. Nas células, os principais aspectos são o tipo da célula, suas cores e tipos de contatos. Nos módulos, as molduras, suas cores e densidade de células por módulo.

Modulação na superfície da envoltória (Figura III.16.b): Diz respeito à composição dos módulos no conjunto arquitetônico. Leva em consideração o tamanho dos módulos e a forma com que são dispostos na superfície da envoltória.

Transparência (Figura III.16.c): Diz respeito à permeabilidade das células e substratos, que podem possibilitar uma maior integração das tecnologias à superfície do edifício, tanto no que diz respeito aos aspectos visuais, quanto à proteção solar. Existem produtos com níveis diferentes de transparência, por exemplo.

Flexibilidade do plano de geração (Figura III.16.d): Diz respeito a integração de fotovoltaicos em superfícies orgânicas. Neste sentido, a escolha da tecnologia é importante, pois algumas podem facilitar integração por permitir maior plasticidade no que diz respeito às características do módulo. Outros pontos a serem analisados envolvem a conexão com o inversor, conexão dos arranjos, entre outros.

Curvatura do plano de geração (Figura III.16.e): Diz respeito a integração de fotovoltaicos em superfícies curvas. A escolha da tecnologia e/ou tipo de conexão com inversor, que permita essa abordagem, também são aspectos importantes a serem considerados nestes casos.

Figura III.16 – Possibilidades estéticas e compositivas da incorporação: (a) Estética da tecnologia, ou seja, cores, tipos de contatos e densidade das células, assim como as cores dos substratos e molduras dos módulos, entre outros; (b) Modulação na superfície da envoltória, composição dos módulos no conjunto arquitetônico; (c) transparências tanto das células, quanto dos substratos; (d) Flexibilidade do plano; neste sentido é importante escolher uma tecnologia que permita este tipo de abordagem, tanto no que diz respeito ao módulo, quanto a sua ligação com o inversor, por exemplo; (e) Possibilidade de curvatura (modificado pelo autor a partir de SUPSI/ISAAC, 2013c).

3.3.3 – Quanto à localização na envoltória (coberturas e fachadas):

A incorporação de sistemas fotovoltaicos pode se localizar na cobertura ou na fachada dos edifícios. Sua localização deverá levar em conta fatores construtivos, assim como as possibilidades estéticas e compositivas das tecnologias. A seguir são exploradas algumas possibilidades para que essa incorporação aconteça:

Cobertura: A cobertura, segundo definição de Azeredo (1977), tem como principais finalidades a de abrigo contra intempéries, possuindo propriedades isolantes e de resistência

estrutural. A incorporação fotovoltaica em coberturas pode acontecer nas coberturas planas e inclinadas. Exemplos dessas possibilidades são apresentados abaixo:

Coberturas Inclinadas (Figura III.17.a): Fotovoltaicos instalados, acompanhando o plano de coberturas inclinadas, procurando, na maioria das vezes, maximizar a potência de orientação e assim o rendimento do sistema.

Coberturas Inclinadas tipo shed (Figura III.17.b): Fotovoltaicos instalados em coberturas inclinadas do tipo *shed*, comuns em fábricas e grandes galpões. Esse recurso é utilizado normalmente, quando a inclinação é necessária para melhorar o rendimento do sistema e o plano de cobertura é grande demais, obrigando a divisão da cobertura em várias secções. Ou para possibilitar a transparência no plano oposto aos fotovoltaicos, possibilitando assim a iluminação zenital, sem alterar características da tecnologia que poderiam diminuir sua eficiência.

Coberturas Planas (Figura III.17.c): Fotovoltaicos instalados, acompanhando o plano de coberturas planas. Nesses casos, normalmente, os fotovoltaicos ficam com uma inclinação mínima, que gira em torno de 5° , para minimizar o acúmulo de sujeira e água.

Coberturas Planas com claraboias (Figura III.17.d): Fotovoltaicos instalados entre dois blocos ou partes de um mesmo edifício, criando assim uma conexão entre eles. Muitas vezes, nesses casos, características da tecnologia, como a transparência, são utilizadas. Também pode ser um recurso para melhorar a ventilação dos módulos.

Coberturas Planas e fotovoltaicos inclinados (Figura III.17.e): Quando, por questões construtivas, energéticas ou arquitetônicas, os módulos ficam inclinados em relação à cobertura plana.

Fotovoltaicos que excedem a cobertura do edifício (Figura III.17.f): Quando os fotovoltaicos excedem o plano da cobertura ou os limites do edifício. Esses casos podem acontecer tanto nas aplicações sobre coberturas inclinadas, como nas planas. Normalmente com finalidade de aumentar o tamanho do plano de geração, ou para proteção contra chuva ou radiação solar, como é o caso de beirais.

Figura III.17 – Possibilidade de incorporação fotovoltaica na cobertura de edificações: (a) Coberturas inclinadas; (b) Coberturas inclinadas tipo *shed*; (c) Coberturas planas; (d) Coberturas planas com claraboias; (e) Coberturas planas e fotovoltaicos inclinados; (f) Fotovoltaicos que excedem a cobertura do edifício.

Fachadas: As incorporações em fachadas normalmente são feitas em edifícios com pouca área de cobertura e muita de fachada, ou seja, prédios de múltiplos andares. A aplicação na fachada normalmente requer um cuidado maior com relação ao sombreamento. A princípio, podem acontecer de duas formas: perpendicular e inclinado, ambos em relação

ao solo. Dentro dessas, outras variações podem ser encontradas, inclusive com os fotovoltaicos funcionando como proteção solar ou guarda-corpo, como é visto a seguir:

Fachadas perpendiculares ao solo (Figura III.18.a): Fachadas perpendiculares ao solo normalmente têm um fator de orientação baixo em relação a outras inclinações. Por esse motivo, devem ser considerados outros fatores, como por exemplo, se o edifício é novo ou antigo, ou com relação ao meio urbano onde o edifício está inserido, dentre outros.

Fachadas inclinadas ao solo (Figura III.18.b): Esse tipo de abordagem pode acontecer por diversas razões, como estéticas. Contudo, inclinação em fachadas, mesmo que mínima, pode aumentar o rendimento de um sistema fotovoltaico ou mesmo a área de geração. Estudos feitos por Lima (2012) para cidade de Campinas, SP, por exemplo, indicam que mudanças de 10° na inclinação podem resultar em acréscimo de até 16% na geração anual de energia.

Fotovoltaicos como proteção solar nas fachadas (Figura III.18.c & Figura III.18.d): Fotovoltaico são muitas vezes utilizados nas fachadas dos edifícios como proteção solar (brises), tanto verticalmente (Figura III.18.c), quanto horizontalmente (Figura III.18.d). Essa estratégia, além de proteger o edifício da radiação solar direta, permite a inclinação do módulo com relação ao solo que, como já visto, pode potencializar a geração energética.

Fotovoltaicos como parte do peitoril nas fachadas (Figura III.18.e): Essa é outra estratégia que pode ser utilizada para inclinar os fotovoltaicos, procurando maximizar sua geração, integrando-os ao desenho do edifício.

Fotovoltaicos que excedem a projeção do edifício (Figura III.18.f): Os fotovoltaicos podem ser instalados nas fachadas também em elementos que excedem a projeção dos edifícios, como em marquises, ou no guarda-corpo de varandas, por exemplo.

Figura III.18 – Possibilidades de incorporação fotovoltaica na fachada de edificações: (a) Plano de geração perpendicular ao solo; (b) Plano de geração inclinado em relação ao solo; (c) Fotovoltaico como proteção solar vertical; (d) Fotovoltaicos como proteção solar horizontal; (e) Fotovoltaicos como peitoril na fachada de edifícios; (f) Fotovoltaicos que excedem a projeção do edifício, como marquises e guarda-corpos, por exemplo.

3.3.4 – Quanto à movimentação do plano de geração:

As movimentações dos fotovoltaicos acontecem sobre planos ou eixos. Os planos podem se movimentar sobre a fachada ou cobertura, como na Figura III.19.a, ou como um plano que acompanha a incidência solar durante o dia, a exemplo da Figura III.19.b.

Movimentações sobre o eixos podem ocorrer tanto nas coberturas, como nas fachadas. Nas coberturas, com o eixo em uma das extremidades (Figura III.19.c), privilegia mais

fortemente uma orientação, como a norte, por exemplo; com o eixo de giro localizado ao centro do plano de geração (Figura III.19.d), procura privilegiar duas orientações, como por exemplo, a leste e oeste. Nas fachadas, a movimentação é utilizada normalmente em elementos de proteção solar, com o eixo de giro nas extremidades (Figura III.19.e), ou no centro (Figura III.19.f), tanto para maximizar a geração, como a proteção solar.

Figura III.19 – Aplicação de fotovoltaico quanto à movimentação: (a) Plano que se movimentação sobre a fachada ou cobertura; (b) Plano que acompanha a trajetória solar; (c) Movimentação sobre um eixo na extremidade do plano de geração na cobertura; (d) Movimentação sobre um eixo centralizado no plano de geração na cobertura; (e) Movimentação sobre um eixo na extremidade do plano de geração em proteções solares; (f) Movimentação sobre um eixo centralizado no plano de geração em proteções solares.

3.3.5 – Outros requisitos da incorporação fotovoltaica em envoltórias:

Algumas das questões citadas nesta secção já foram abordadas anteriormente no segundo capítulo. Contudo, a ênfase nestes requisitos se dá por sua importância.

A ventilação na parte posterior dos módulos (Figura III.20.a), por exemplo, é uma estratégia muito utilizada para diminuir sua temperatura, fator importante em países quentes como o Brasil, na comparação a países europeus, ou da América do Norte, por exemplo. Contudo, é importante lembrar que outras estratégias podem ser tomadas a esse respeito, como por exemplo, a da equipe Oddo Project do SDEurope (2012), em que a água era expelida na cobertura para diminuir a temperatura dos módulos e reutilizada aquecida, posteriormente, na estratégia de conforto da residência, como apresentado na secção

O sombreamento é outro ponto importante, que pode decorrer tanto de elementos externos à edificação, como da própria edificação, ou mesmo por falta de limpeza, como pode ser visto na Figura III.20.b.

A reflexão que acontece pela incidência solar em superfícies como vidros pode interferir de diversas formas no entorno de um edifício com fotovoltaicos (Figura III.20.c). Se esse for localizado perto de vias públicas, por exemplo, pode causar incômodo ou expor motoristas ou transeuntes a riscos de acidentes. Por outro lado, se a reflexão for utilizada para direcionar a radiação indireta para o plano de geração (Figura III.20.d), pode contribuir para aumentar o rendimento do sistema.

Figura III.20 – (a) ventilação na parte posterior dos módulos fotovoltaicos; (b) Sombreamento no plano de geração, por elementos externos a residência, da própria residência ou por sujeira; (c) reflexão ótica dos fotovoltaicos; (d) reflexão contribuindo para o aumento da radiação indireta incidente (Adaptado pelo autor a partir de SUPSI/ISAAC, 2013b).

3.4- ABORDAGENS DE PROJETO

Uma vez apresentadas as informações sobre radiação, atributos da tecnologia, possibilidades de integração, cálculos do rendimento energético, formas de integração na envoltória, entre outros, há que integrar todos estes atributos ao projeto arquitetônico. A abordagem do projetista ao trabalhar com fotovoltaicos determina a forma como a incorporação será feita, o que leva em conta uma série de aspectos, como: estética, economia, rendimento, localização, uso do edifício, se ele é novo ou já existente, entre outros.

Classificar os tipos de abordagem de um projeto com fotovoltaicos pode ajudar tanto a ampliar a visão sobre as possibilidades de projeto, como para analisar incorporações já existentes. Essas abordagens, segundo Chivelet, Solla (2010) e Weller *et al* (2010), podem se dividir em 5 grupos que utilizam como critério principal, para diferenciação entre eles, a relação entre o edifício, as tecnologias fotovoltaicas e o resultado formal ou estético dessa incorporação.

As Formas de Incorporação na Envoltória, apresentadas anteriormente, podem fazer parte das abordagens do projetista. Contudo, as abordagens caminham mais no sentido do conceito pretendido pela incorporação, e, desse conceito, resultará uma forma de incorporação.

Para melhor entendimento das abordagens, faz-se um relacionamento com abordagens de projeto apresentadas na competição SDEurope (2012).

3.4.1 - SUBJUGADO

Segundo Weller *et al* (2010), esse tipo de abordagem tem foco voltado à captação da irradiação solar. É quando o sistema fotovoltaico subjugua a edificação, exercendo domínio claro sobre sua estética, sem maiores preocupações com a integração dos fotovoltaicos com a arquitetura ou demais sistemas da edificação. O objetivo principal é, quase que exclusivamente, a produção de energia.

Na competição do SDEurope (2012), não houve exemplos claros dessa abordagem, tendo em vista que as equipes eram, em sua maioria, multidisciplinares, e um dos objetivos da competição era a integração das tecnologias fotovoltaicas com a arquitetura. No entanto, a casa chinesa, chamada de Para Eco-House, apesar da preocupação arquitetônica clara na

incorporação dos fotovoltaicos na fachada (Figura III.21.b), aparentemente, a equipe não teve a mesma preocupação com a cobertura, como pode ser visto na Figura III.21.a.

Na competição do SDEurope (2012), não houve exemplos claros dessa abordagem, tendo em vista que as equipes eram, em sua maioria, multidisciplinares e um dos objetivos da competição era a integração das tecnologias fotovoltaicas com a arquitetura. No entanto, a equipe da casa chinesa, chamada de Para Eco-House, apesar de revelar preocupação arquitetônica na incorporação dos fotovoltaicos na fachada (Figura III.21.b), aparentemente não teve a mesma preocupação com a cobertura, como pode ser visto na Figura III.21.a.

Das casas que participaram da competição em 2012, a abordagem dada à cobertura pela equipe chinesa é a que melhor define o conceito de subjugada. O sistema é acoplado, sem integração com o desenho. Não acompanha a estrutura de madeira dos brises na envoltória, utilizando-a somente como suporte para o sistema fotovoltaico (Figura III.21.a).

Figura III.21 - a) Vista superior da casa Para Eco-House, da equipe chinesa participante do SDEurope 2012, onde é possível visualizar os módulos fotovoltaicos na cobertura. b) Vista dos fotovoltaicos instalados nos brises da fachada oeste da casa (Fonte: GALERIA 2012).

Nessa abordagem não há preocupação em enxergar a incorporação fotovoltaica como parte do contexto do edifício, integrando-a com outros requisitos de conforto térmico, ventilação, ou iluminação, por exemplo. Tendo em vista que este trabalho é fundamentado em um pensamento holístico sobre incorporação de fotovoltaicos, e acreditando que esta preocupação é chave ou determinante, não apenas para o sucesso da aplicação, como para o rendimento satisfatório da tecnologia de geração de energia, entende-se que essa abordagem limita as vantagens do uso de fotovoltaicos na geração de energia renovável de forma local. É mais comum em edifícios em que a instalação fotovoltaica é feita posteriormente à construção do mesmo.

3.4.2 - DOMINANTE

Segundo Weller (2010), essa abordagem é usada quando a tecnologia fotovoltaica tem um papel decisivo no desenho do edifício. O projeto de fotovoltaicos interfere diretamente na orientação, volume e configuração do envelope; por esse motivo, é mais comum em projetos de fotovoltaicos em edifícios novos, onde os processos de projeto caminham

simultaneamente. Em muitos casos, a instalação fotovoltaica contrasta com o resto da envoltória, dominando a estética do edifício.

No projeto da Ekó House, a ser apresentado no capítulo 4, procurou-se adequar a cobertura com a melhor orientação e inclinação para a época da competição em Madri, Espanha, considerando uma quantidade grande de módulos, com o foco voltado para máxima geração de energia. Pela influência que o projeto de fotovoltaicos teve no processo de projeto, quanto à forma e seu destaque no conjunto (parte estética da residência) (Figura III.22.a & b), pode-se considerar a abordagem como dominante.

O foco em maximizar a produção de energia não significou falta de preocupação com o desenho e com a possibilidade de o sistema fotovoltaico exercer outras funções. O beiral da cobertura fotovoltaica na fachada frontal sombreia o pano de vidro da fachada, procurando evitar o ganho excessivo de calor (Figura III.22.a).

Figura III.22: Casa Ekó Brasil, equipe brasileira participante do SDEurope 2012. a) Vista dos módulos fotovoltaicos na cobertura, da fachada frontal (sul no hemisfério norte) e da fachada leste. É possível observar também a sombra do beiral na fachada frontal da residência. b) Vista da fachada oeste, onde é possível ver parte da cobertura, as faces posteriores dos módulos e sua implicação no conjunto do desenho (Fonte: GALERIA 2012).

Nessa abordagem existe preocupação em entender o projeto de integração fotovoltaica como parte do edifício, interagindo e integrando-a com outros sistemas e estratégias, mesmo que os fotovoltaicos tenham um peso maior, em comparação a outros atributos, sobre as decisões na envoltória do edifício.

3.4.3 - INTEGRADO

Essa abordagem, segundo Weller *et al* (2010), acontece quando a instalação fotovoltaica está em harmonia com a edificação. Abarca do projeto arquitetônico ao contexto da geração de energia, assim como outros requisitos da edificação, como de conforto, de iluminação, de espaços, de visuais, de fluxos, todos devidamente equilibrados. A tecnologia solar, a estrutura e a arquitetura estão em simbiose de forma quase inseparável. Sendo assim, como na abordagem anterior, essa integração tem de acontecer nas fases iniciais no projeto de edificios novos. Frequentemente nesses casos, os módulos fotovoltaicos funcionam não só para geração de energia, mas desempenham outros papéis, tais como proteção solar, proteção contra o intemperismo, ou de composição arquitetônica. Como exemplos de abordagens

integradas, destacam-se a casa francesa, cujo nome é Canopea (Figura III.23.a e b), e a húngara, chamada Oddo-Project (Figura III.24.a e b).

Na francesa, a incorporação de módulos fotovoltaicos, com substrato transparente na cobertura, também funcionava como proteção contra intemperismos e criava um espaço de estar no pavimento superior, sombreando-o, sem tirar sua claridade, com um padrão de sombras interessante em todo o ambiente (Figura III.24.b). Do ponto de vista do observador, os módulos não são reconhecíveis ou visíveis do lado exterior. Na integração bem equilibrada, os fotovoltaicos compuseram com o desenho, sem se destacar, porém, integrados a proposta e ao espaços interno da residência.

Figura III.23: Casa Canopeia, da equipe francesa, participante do SDEurope 2012. (a) Integração dos módulos fotovoltaicos na cobertura, vista superior. (b) Vista do espaço de estar do pavimento superior e da parte posterior dos módulos fotovoltaicos de silício com substrato transparente. Na parte inferior dos módulos, foram desenhados padrões semelhantes a folhas, que “marcavam” o ambiente com sombras, influenciando assim em sua estética (Fonte: GALERIA 2012).

A incorporação dos módulos fotovoltaicos na cobertura e fachada da casa Húngara foi pensada procurando diminuir os contrastes entre o revestimento da casa e os módulos, sem ao mesmo tempo escondê-los (Figura III.24). A linguagem da modulação dos fotovoltaicos foi expandida para o resto da casa, dando a sensação de que os módulos fotovoltaicos continuavam nas fachadas da residência. O sistema fotovoltaico foi integrado a um sistema semi-passivo para o controle térmico da residência. Um sistema de bombas aspergiu água nos módulos de cobertura durante as tardes para baixar sua temperatura. Posteriormente a água foi recolhida e a reutilizava no controle térmico da residência.

Figura III.24: Casa Odo, equipe húngara, participante do SDEurope 2012. (a) Vista superior da residência com os módulos fotovoltaicos na cobertura; é possível observar a continuidade do padrão modular dos módulos nas fachadas (b) Esquema do sistema passivo que, através de um sistemas de aspersão de água nos fotovoltaicos, baixava sua temperatura, melhorando o desempenho, reutilizando a água para o sistemas de controle térmico da casa (Fontes: (a) GALERIA, 2012; (b) ODOOPROJECT, 2012).

Dentre as abordagens, essa é considerada a mais desejável quando se inicia um projeto que incorpora fotovoltaicos à arquitetura. A vantagem dessa abordagem é o equilíbrio do conjunto, que, quando atingido, pode melhorar não só a aceitação arquitetônica/estética da incorporação fotovoltaica, mas o próprio desempenho do sistema, o que, pela lógica integrada da abordagem, acaba contribuindo para melhoria de outros sistemas, como visto nos exemplos anteriores. A recomendação é que essa abordagem seja a meta de todos os projetos de fotovoltaicos integrados na envoltória dos edifícios, embora se reconheçam as dificuldades e desafios para alcançá-la.

3.4.4 - SUBORDINADO

Na integração subordinada, segundo Weller *et al* (2010), o sistema de captação de energia solar é dificilmente reconhecido ou observável, em razão do seu formato, de suas dimensões, posição relativa ao observador, ou cor. A instalação fotovoltaica fica subordinada ao edifício.

No SDEurope (2012), a casa Pátio 2.12, da equipe espanhola de Andaluzia, é um exemplo desse tipo de integração. Os módulos fotovoltaicos da casa podiam ser avistados somente na vista superior da casa, como é possível analisar na Figura III.25.a. Do ponto de vista do observador, os módulos não ficavam visíveis interna ou externamente (Figura III.25.b).

Figura III.25: Casa Pátio 2.12, equipe espanhola, participante do SDEurope 2012. (a) Vista aérea da residência com os módulos fotovoltaicos da cobertura em destaque. (b) Vista da fachada norte da residência do ponto de vista do observador, onde os módulos fotovoltaicos não são visíveis (Fonte: GALERIA 2012).

Essa abordagem é o contraponto da Dominante. Mas não quer dizer necessariamente que não haja preocupação com a integração fotovoltaica, apenas que o destaque será dado ao edifício e a outros elementos. Desde que o projeto procure responder aos requisitos dos fotovoltaicos, sem prejudicar seu desempenho e procurando, quando possível, desempenhar outras funções que não somente a produção de energia, essa é uma escolha estética. A casa de Patio 2.2 foi classificada em segundo lugar no geral da competição, o que sugere, segundo o parecer do júri, o cumprimento de uma série de atributos do projeto fotovoltaico de forma integrada com outros sistemas.

Todavia, esse tipo de incorporação não se vale, como pontuam Scognamiglio e Rostvik (2012), da tecnologia fotovoltaica como ferramenta e desafio de desenho da envoltória do edifício, uma vez que, como já foi pontuado, é a primeira vez na história da arquitetura que a fonte de energia do edifício pode tomar forma.

3.4.5 - IMITAÇÃO

Autores como Chivelet e Solla (2010) não fazem a distinção entre esta abordagem e as outras, considerando que já estaria contemplada junto as anteriores. Contudo, segundo Weller *et al* (2010), essa abordagem pode ser diferenciada, pois, ao invés de ocultar os módulos fotovoltaicos, eles tentam reproduzir formas tradicionais de construção, se mimetizando de tal forma que a diferença entre o tradicional e a cópia são quase imperceptíveis.

A casa Omotenashi House, da equipe japonesa, utiliza essa abordagem. As “telhas fotovoltaicas”, nesse projeto, simulam telhas convencionais (Figura III.26), transformando um telhado tradicional de quatro águas em um telhado fotovoltaico, sem modificar a aparência tradicional da residência.

Figura III.26: Casa Omotenashi House, equipe japonesa, participante do SDEurope 2012. Vista da “telhas fotovoltaicas” na cobertura (Fonte: GALERIA 2012).

Os questionamentos são os mesmos da abordagem anterior, ou seja, quando se inicia um projeto com essa perspectiva de aplicação, perde-se a oportunidade de explorar os fotovoltaicos também em suas qualidades de desenho, ficando a cargo do arquiteto e do cliente aceitar o desafio ou não. Por outro lado, quando o edifício já está construído, ou no caso de uma intervenção em edifícios históricos, essa abordagem pode ser uma boa alternativa para manter a linguagem arquitetônica e, ao mesmo tempo, gerar energia de fontes limpas e locais.

3.4.6 - Considerações sobre a Secção

As abordagens são divididas, principalmente, pela forma como os sistemas fotovoltaicos transparecem na envoltória do edifício, sua estética. Contudo, as abordagens também indicam processos de projeto; uns com direções mais unilaterais, como a *abordagem Subjugada*; outros com propostas mais multidisciplinares, com destaque para a *abordagem Integrada*.

As abordagens representam desejos e encaminhamento de projeto, influenciados por direcionamentos dos arquitetos, de especialistas, dos clientes, mas também impostos por questões de implantação, custo, estética, tecnologia, contexto urbano, entre outras. Dentro deste universo complexo, a tomada de decisão nas fases iniciais do projeto em um atributo tão amplo, ajuda o projetista a direcionar soluções e mapear os possíveis caminhos críticos.

Deixar esta secção por último neste capítulo, tem função didática, entendendo que a passagem por questões, como as *Possibilidades de Integração na Envoltória*, *Rendimento Energético* e *Formas de Integração*, contribuiriam para o entendimento das *Abordagens de Projeto*.

3.5- CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO

A síntese de aplicações de fotovoltaicos em envoltórias que tentam resolver os desafios envolvidos de forma multidisciplinar, integrada e equilibrada, procurando responder a todos os atributos e requisitos que envolvem o projeto de edifícios, está na interação entre as esferas arquitetônica, construtiva e energética (Figura III.1).

Decisões como a localização do plano de geração, seu tamanho, orientação, tipo de tecnologia aplicada, se ela fica aparente ou não, se tem ou não outra função no edifício, influenciam os demais projetos da edificação, assim como a construção e funcionamento do sistema. Do ponto de vista energético, a localização do plano, seu tamanho, orientação e tecnologia podem ser mais importantes. Construtivamente, o tamanho, tipo da integração, fixação, fabricação, montagem, entre outras, se destacam. Na arquitetura, questões relacionadas à envoltória, como localização, tamanho, tipo de abordagem do projeto, se os módulos exercem outra função, a preservação de visuais, são exemplos. Contudo, cabe ao projetista a gestão de todos esses aspectos e, dentro de um trabalho colaborativo, sintetizando estes desejos por meio do desenho.

Os pontos levantados neste capítulo fizeram parte, em maior ou menor profundidade, do processo de projeto da cobertura da Ekó House. O exercício de projeto e produção da casa e a participação na competição possibilitaram aos envolvidos a passagem pelas três esferas dentro dos diferentes níveis, do projeto à operação da residência. O que permitiu uma visão abrangente dos desafios envolvidos na incorporação de fotovoltaicos em edifícios. Os fundamentos sobre sistemas fotovoltaicos e suas aplicações, explanados no Capítulo II e no presente, são utilizados no capítulo seguinte para descrever este processo de projeto e as decisões tomadas pela equipe do Team Brasil, que possibilitaram a participação da Ekó House na competição SDEurope (2012). Da mesma forma, essas informações compõem os fundamentos que estruturam o modelo proposto, de integração dos sistemas fotovoltaicos ao projeto arquitetônico, apresentado no capítulo 5.

IV. CAPÍTULO

APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA NO PROTÓTIPO EKÓ HOUSE

4.1 - APRESENTAÇÃO DO PROTÓTIPO

O protótipo de Residência Zero (REZ) Ekó House (Figura IV.1) foi desenvolvido com basicamente dois propósitos. Em médio e curto prazo, participar na competição de casas solares, Solar Decathlon Europe 2012. Em longo prazo, iniciar o desenvolvimento do projeto e construção de REZ adaptados ao Brasil, por meio de um convênio firmado com a empresa Eletrobrás.

Figura IV.1 – Imagem geral da Ekó House durante a competição do Solar Decathlo Europe 2012 (GALERIA, 2012).

A residência foi desenvolvida com base nas regras da competição, apresentadas no primeiro capítulo, que serviram como diretrizes de projeto. O protótipo deveria ser concebido para um casal, tendo como ambientes obrigatórios internos a cozinha, banheiro, quarto, sala de jantar, estar e área de estudos (Figura IV.2). A área interna condicionada tem, aproximadamente, 45m² (área mínima exigida pela competição), procurando diminuir a quantidade de ar a ser condicionada para uma melhor eficiência no uso e consumo energético do sistema de condicionamento artificial.

A área externa compreende as varandas, o estar externo, a rampa de acesso e o gabinete técnico, que tem ao lado uma bancada de apoio para cozinha e para a máquina de lavar roupas (Figura IV.2). As varandas leste e oeste têm um sistema móvel de proteção solar, que procura minimizar a incidência de radiação solar direta nas paredes e aberturas, quando necessário. No Gabinete Técnico estão dispostos equipamentos de suporte aos sistemas de fotovoltaicos, hidráulicos, elétricos, de automação e de condicionamento. Sua localização na parte externa da residência deu-se para minimizar o ruído e a necessidade de isolamento da estrutura por conta da vibração, pela manutenção facilitada e pela proximidade e facilidade de conexão, tanto do sistema de aquecimento de água, quando do sistema de geração de energia.

Figura IV.2: Planta Baixa da Ekó House. Mostra a área interna (condicionada) da residência com a cozinha, banheiro, quarto, sala de jantar, estar e estudos e a área externa, com as duas varandas laterais cobertas (leste/oeste), o espaço do Gabinete Técnico, o estar externo e a rampa de acesso na fachada frontal (sul). A figura mostra a orientação da casa implantada no hemisfério norte, local da realização da competição (Madrid, Espanha).

A parte interna (condicionada) e a parte externa da residência podem ser divididas em duas estruturas, ou *layers*: o Corpo da Residência, fabricada em painéis estruturais de madeira, e a Estrutura Envoltória, estruturada predominantemente com perfis metálicos extrudados e chapas metálicas dobradas (Figura IV.3).

Figura IV.3: Diferentes estruturas que dão forma ao protótipo Ekó House. No Corpo da Residência, feito de painéis estruturais de madeira, estão os espaços internos e a Estrutura Envoltória, estruturada basicamente com perfis metálicos, onde se encontram os espaços externos, varandas, cobertura.

4.1.1 - CORPO DA RESIDÊNCIA

A escolha da madeira como estrutura para o **Corpo da Residência** foi pautada pelo seu desempenho térmico, que minimiza o impacto de pontes térmicas, se comparado com estruturas metálicas, por exemplo. Também pela vontade da equipe em trabalhar com esse material, explorando técnicas construtivas para construção em madeira, material renovável e abundante no país, que pode ser originário de florestas nativas ou plantadas. Esse corpo estrutural tem medidas aproximadas de 8,6m longitudinalmente, 6,0m transversalmente e altura de 3,0m.

É constituído de painéis estruturais de madeira com isolamento térmico incorporado em seu interior, assim como revestimentos externos e internos. Essa solução foi escolhida, principalmente, pelo transporte e montagem, possibilitando o embarque da estrutura dentro de *containers* e sua montagem em aproximadamente três dias. A estrutura de painéis compõe-se três módulos (

Figura IV.4). O Módulo 1 abriga a cozinha, o banheiro e o quarto, facilitando a conexão das infraestruturas de água e esgoto com o Gabinete técnico e mantendo os cômodos básicos de uma residência em um só Módulo. Os Módulos 2 e 3 abrigam os outros cômodos. Na parte central do Módulo 2, existem dois painéis menores, que auxiliam estruturalmente, principalmente, no período da montagem; é onde se localizam os quadros elétrico e de automação e um armário de uso geral.

Figura IV.4: Painéis estruturais em madeira do Corpo da Residência Ekó House, divididos em três módulos. No Módulo 1, a cozinha, banheiro e quarto. Nos Módulos 2 e 3, os outros cômodos da residência.

4.1.1 –ESTRUTURA ENVOLTÓRIA

A Estrutura Envoltória é mais heterogênea no que diz respeito à funcionalidade e ao Corpo da Residência. As cinco diferentes partes da Estrutura Envoltória da Ekó House têm diferentes usos, sendo elas: Estrutura de Suporte dos Decks, responsável pelo piso externo da casa; Estrutura das Varandas, que dá suporte ao sistema de proteção solar; Gabinete Técnico, que abriga a maioria dos sistemas da casa; Sistema de cobertura ou simplesmente Telhado, com as telhas metálicas e Sistemas Solares, como os fotovoltaicos e o U-pipes, para água quente, como pode ser visto na Figura IV.5.

Figura IV.5: As cinco diferentes partes da Estrutura Envoltória da Ekó House podem ser subdividida em cinco partes: a Estrutura de Suporte dos Decks, a Estrutura das Varandas, o Gabinete Técnico, o Sistema de Cobertura ou simplesmente Telhado e os Sistemas Solares, com os fotovoltaicos e U-pipes.

Estrutura de suporte dos decks: Composta na sua maioria por módulos em alumínio (Figura IV.6), com medidas em planta de 2000mmX1000mm e 1000mmX1000mm. Os pés ou apoios telescópicos propiciam a regulagem da altura, adaptando-se melhor aos diferentes

terrenos. Nessa estrutura apoia-se o piso da área externa da casa, de madeira Teca, como é possível observar na Figura IV.6. Na Estrutura de Suporte dos Decks também se apoiam os módulos da Estrutura das Varandas.

Figura IV.6: Estrutura de suporte dos decks. No detalhe, um dos quadros padrão da estrutura de suporte dos decks, com tamanho de 2m x 1m, onde são encaixadas as réguas da madeira Teca.

A escolha por esse sistema deu-se pela relativa facilidade de montagem e regulação de altura, adaptando-se melhor a possíveis inclinações ou imperfeições do terreno. Há disponibilidade do produto no mercado nacional, dispensando projeto específico. Além disso, a fabricação em alumínio o torna leve, podendo ser transportado por apenas uma pessoa, e tem maior durabilidade contra intemperismos.

Estrutura das varandas: Composta por quadros metálicos (Figura IV.7), fabricados basicamente com perfis “U” de abas desiguais (101,60x41,63x4,67mm) e perfis “U” de abas desiguais curtas (57,15x22,22x3,17mm), em alumínio com liga 6351-T6 (ABNT, 2006). Os quadros dão suporte aos sistemas de proteção solar, sejam as taquaras de bambu, das faces leste, oeste e norte, como pode ser visto no detalhe da Figura IV.7, ou às persianas automatizadas na fachada frontal da residência. Essas estruturas delimitam o espaço das varandas, que, além de possibilitar a expansão da área interna da residência, sombreiam as fachadas do protótipo, participando assim da estratégia de condicionamento passivo da Ekó House.

Figura IV.7: Estruturas metálicas dos quadros das varandas, que dão suporte aos sistemas de sombreamento da residência e delimitam as varandas que circundam o Corpo da Residência. No detalhe, os quadros horizontais da cobertura da varanda e os quadros verticais, ambos com as proteções solares em bambu se destacando.

Os quadros metálicos têm medidas compatíveis com container padrão e são transportados montados, inclusive com os sistemas de sombreamento acoplados. A escolha por perfis de alumínio deu-se pelo peso específico baixo, se comparado ao do aço, por exemplo, possibilitando uma estrutura esbelta, com durabilidade quanto a intemperismos, sem necessidade de películas protetoras.

Gabinete técnico: Composto por duas estruturas tridimensionais metálicas (Figura IV.8), fabricadas com perfis de seção tubular retangular (80x40x4mm) em alumínio com liga 6351-T6 (ABNT, 2006), assentadas, cada uma, sobre as mesmas estruturas dos decks. São revestidas por painéis metálicos perfurados ou por placas cimentícias.

Tem a função de dar suporte e proteger contra intempéries os reservatórios de água quente e demais componentes do sistema hidráulico, as máquinas de ar condicionado, do sistema de condicionamento de ar, os quadros elétricos e de automação, bem como os inversores do sistema fotovoltaico (Figura IV.8). O Gabinete Técnico se conecta ao corpo da residência tanto pela parte inferior (sistema hidráulico), por baixo do piso dos decks, como pela parte superior, por meio de duas passarelas (Figura IV.8), que, além de protegerem a fiação dos sistemas elétricos e de automação, dão acesso para manutenção da cobertura.

Figura IV.8 - As duas estruturas metálicas tridimensionais que dão forma ao Gabinete Técnico e as duas passarelas que conectam a casa, assim como revestimentos laterais e superior. Na parte interna, os dois reservatórios de água quente, a máquina do HVAC, os quadros elétrico e de automação e os dois inversores do sistema fotovoltaico.

Os dois módulos do Gabinete Técnico têm medidas que permitem seu transporte dentro de containers de tamanho padrão. Para o transporte, o gabinete foi parcialmente desmontado; apenas os quadros de controle das instalações elétricas e de automação e alguns conectores permaneceram fixados na estrutura do gabinete técnico. Os inversores, a máquina do HVAC e os revestimentos externos, foram transportados em embalagens próprias para evitar danos e perda de funcionalidade durante o transporte, carga e descarga.

Sistema de cobertura: É composto de telhas de alumínio e acabamentos laterais em chapas dobradas de aço (ABNT, 2000). Tem a função de proteger a cobertura contra intempéries. A declividade é de aproximadamente 2% em direção às calhas, que conduzem as águas pluviais a um tubo de queda de seção retangular na região central da fachada frontal (Figura IV.9). A água de chuva coletada é armazenada em um tanque posicionado embaixo dos decks, na varanda leste.

Figura IV.9: Sistema de cobertura Ekó House

Esse sistema tem acessórios que permitem o acoplamento de estruturas na parte superior das telhas (Figura IV.18), sem que sejam necessários furos, e que facilitem a entrada de água, sendo ponto crucial para escolha dessa tecnologia, como será abordado mais à frente. Outro fator que influenciou na escolha é a montagem rápida, uma vez que as telhas metálicas não poderiam ser transportadas já montadas nos painéis estruturais da cobertura do Corpo da Residência, pela configuração dos mesmos.

Sistemas solares: É resultado da composição do plano de geração e do seu sistema de suporte. O plano de geração é formado por componentes dos sistemas de geração de energia térmica (tubos evacuados e tubulações) e de geração de energia elétrica fotovoltaica (módulos fotovoltaicos, cabos e conexões). São utilizados 48 módulos fotovoltaicos e 4 conjuntos de 10 tubos evacuados cada. O sistema de suporte é composto por estruturas metálicas (Figura IV.10) fabricadas com perfis “U”, com abas desiguais (101,60x41,63x4,67mm) e perfis “U”, de abas desiguais curtas (57,15x22,22x3,17mm), em alumínio com liga 6351-T6 (ABNT, 2006) que se fixa nas telhas metálicas por meio de grampos de fixação (Figura IV.18). A estrutura de suporte é dividida em três módulos estruturalmente iguais. Os módulos 1 e 3 suportam, respectivamente, 20 e 18 módulos fotovoltaicos. No Módulo 2, os perfis longitudinais foram rebaixados para que os tubos evacuados não sombreiem os módulos fotovoltaicos.

Figura IV.10: Três estruturas metálicas para sustentação dos módulos fotovoltaicos, e conjuntos de tubos evacuados.

A Figura IV.11 ilustra a perspectiva do plano de geração e os elementos e sistemas com os quais tem relação.

Figura IV.11: Plano de geração e demais sistemas e elementos relacionados.

4.1 – FATORES DETERMINANTES PARA TOMADA DE DECISÃO

A tomada de decisão no projeto do sistema fotovoltaico da Ekó House foi norteadada por uma série de atributos e requisitos, relacionados ao rendimento energético, estética, segurança, confiabilidade, economia, normas técnicas, regras da competição, fabricação, montagem, transporte, funcionamento, manutenção. Esse processo decisório não foi linear ao longo de quatro anos; interrupções e descontinuidades também influenciaram nas decisões.

O sistema fotovoltaico é o conjunto constituído de plano de geração (módulos fotovoltaicos, cabos e conexões), inversores, controles e dispositivos de segurança próprios do sistema. O foco da análise está no sistema fotovoltaico, bem como em outros sistemas, elementos e espaços da edificação com os quais o sistema fotovoltaico tem relação, direta ou indireta, incluindo: o sistema de apoio, o sistema de cobertura, o gabinete técnico.

A seguir serão explicitados os atributos que influenciaram no projeto de integração dos fotovoltaicos da Ekó House. Primeiramente, aqueles relativos ao projeto, ou desenho, da envoltória, ao balanço energético, orientação, local da incorporação, tipo e características da tecnologia, estrutura de suporte e sistema de controle. Posteriormente, alguns atributos que restringem, ou limitam a incorporação, como, por exemplo, segurança, confiabilidade, ergonomia e economia. O atributo de análise é relacionado com o impacto ambiental das escolhas de projeto. Por fim, parte dos atributos relacionados ao ciclo de vida do sistema fotovoltaico, especificamente os de fabricação, montagem, embalagem e transporte.

4.1.1 – ATRIBUTOS DO PROJETO FOTOVOLTAICO

O balanço energético anual de uma residência com fotovoltaicos é a relação entre a energia gerada anualmente e a energia consumida no mesmo período. A estratégia do projeto do sistema fotovoltaico da Ekó House baseou-se em duas premissas. A primeira foi minimizar o consumo e maximizar a geração de energia (Figura IV.12).

Figura IV.12 – Balanço energético mensal com usos finais. A simulação considerou os dados solares de Madrid, Espanha.

A segunda está ligada à viabilidade de mercado, vislumbrada pela equipe de que a casa poderia funcionar como um hotel em áreas isoladas e desprovidas de rede de energia. A energia excedente poderia alimentar outras edificações da comunidade, prioritariamente aquelas voltadas aos serviços básicos, como escolas e centros de saúde (TEAM BRASIL, 2012b).

Figura IV.13 – Conjunto de residências Ekó House. Pode funcionar como hotéis em regiões isoladas, sem acesso à rede de energia elétrica, fornecendo eletricidade para serviços básicos dessas comunidades (Adaptado pelo autor de TEAM BRASIL, 2012b).

A decisão sobre o balanço energético foi o ponto de partida para o projeto de incorporação dos fotovoltaicos, influenciando-o substancialmente. Um exemplo é a orientação e localização do plano dos sistemas fotovoltaicos. Os módulos foram voltados para orientação mais favorável e localizados na cobertura, plano de maior incidência de radiação direta. O direcionamento do plano de geração depende do hemisfério em que o protótipo foi montado. No caso de Madri, voltou-se para o sul; no Brasil deve ser orientado prioritariamente para o norte.

A inclinação de 15° , como pode ser visto na Figura IV.14, procurou privilegiar a produção de energia no período da competição, considerando a possibilidade de dias chuvosos ou nublados que poderiam afetar o rendimento do sistema. A competição foi realizada em uma janela pequena de tempo (duas semanas), durante o outono espanhol. Adicionalmente, essa inclinação permitiu que o plano de geração de energia ficasse inscrito no Envelope Solar fornecido pela competição (Figura IV.14 e Figura IV.15).

Figura IV.14: Vista lateral da Ekó House. Plano de cobertura dos sistemas solares com inclinação de 15° , inscrita no Envelope Solar

O envelope solar, definido pelas regras do concurso, garantiu que o plano dos sistemas solares não fosse sombreado por edificações vizinhas ou quaisquer outros elementos externos ou internos ao lote, tais como postes ou árvores (Figura IV.15). No caso de uma

residência convencional, estudos de sombreamento precisam ser feitos para garantir que os módulos não sejam sombreados, para não ocasionar perdas de rendimento e, em último caso, danos aos módulos.

Figura IV.15: Vistas do Envelope Solar disponibilizado pela organização do SDEurope (2012). O lote onde as residências deveriam ficar inscritas tem 20m x 20m e a altura 6m (Adaptado pelo autor de SOLAR, 2012).

A área total, somente dos módulos, é de aproximadamente 57m². Sua integração na cobertura excede os limites do Corpo da Residência, com uma projeção em balanço na sua parte frontal. O beiral criado pelo plano de geração protege a fachada e suas esquadrias da incidência direta do sol nos meses mais quentes, e permite que o sol entre na casa nos meses mais frios (Figura IV.16), contribuindo assim para o sistema passivo de controle térmico.

Figura IV.16: Desenho esquemático da insolação na fachada frontal, no verão e no inverno. O plano dos sistemas de geração protege a fachada durante os meses quentes de verão e permite a passagem da radiação solar durante o inverno.

Tendo sido projetada para retornar ao país, a residência teve sua montagem, em um primeiro momento, em São Paulo, com possibilidade de ser remontada em outros lugares; por isso, o plano de geração foi projetado para ser posicionado em diferentes inclinações. Os

estágios crescem em intervalos de 5°, variando de 5° até 30°, englobando a maioria do território nacional (Figura IV.17). A mudança de inclinação deve ser feita durante a montagem do protótipo, pois, com a cobertura finalizada, essa mudança se torna mais complexa. Para diferentes inclinações no plano de geração, outras modificações são necessárias no protótipo, como por exemplo, adaptação da cobertura que conecta o Gabinete Técnico ao plano dos sistemas solares, como pode ser visto na Figura IV.17.

Figura IV.17: Vista lateral da cobertura com Sistemas Solares da Ekó House, variando sua inclinação, e o mapa do Brasil com latitudes

A escolha de módulos fotovoltaicos monocristalinos faz parte da premissa de maximizar a geração de eletricidade. Quando foram adquiridos, em 2010, eram uns dos mais eficientes do mercado, com 18,5% de eficiência em CPT (PROJECT MANUAL, 2012). Comparado com a eficiência de módulos pontuados como “A” pelo INMETRO, que estão na faixa de 13,5% (BRASIL, 2011b), os da Ekó House são cerca de 27% mais eficientes, ou seja, geram 27% mais energia elétrica. Outra característica dessa tecnologia de módulos é a queda acentuada de eficiência pelo aumento de temperatura, 0,38%/°C (PROJECT MANUAL, 2012), no caso dos utilizados pela equipe. Pensando em minimizar esse problema, o plano de geração foi descolado do Corpo da Residência, procurando melhorar a circulação do ar na parte posterior dos módulos.

Esses módulos têm a estrutura convencional dos módulos de silício monocristalinos, que consistem em células fotovoltaicas monocristalinas pretas opacas, protegidas por vidro temperado, de aproximadamente de 3,2m, com substrato rígido na cor branca, emoldurados por perfis em alumínio com pintura eletrostática preta, como apresentado no capítulo 2. Em alguns casos, a alteração na estrutura dos módulos pode se mostrar viável, por exemplo, por facilitar a incorporação do módulo na envoltória. Por outro lado, não modificar essa estrutura evita possíveis quedas na eficiência; no caso de substituição por células com outras cores, por exemplo, facilita a compra, uma vez que são módulos encontrados no mercado e não insere custos adicionais, que uma alteração na configuração provavelmente acarretaria.

A potência instalada de 10.000W nos inversores era uma exigência da regra da competição, que limitava a geração nesse patamar (SOLAR, 2012). Muito embora o arranjo de 48 módulos de 230W cada produza 11.040W (48 x 230W), os dois inversores de 5.000W cada mantinham a Ekó House na faixa exigida pela competição.

O sistema de suporte dos módulos fotovoltaicos foi parcialmente descrito anteriormente e é composto pelo conjunto de estruturas que dão suporte aos módulos fotovoltaicos e aos conjuntos de tubos evacuados, pelas régua de fixação e pelos grampos de fixação (Figura IV.11). O principal objetivo na sua concepção foi de que ele trabalhasse em conjunto com os outros sistemas de cobertura, sem que um prejudicasse o funcionamento do outro. Nesse sentido, a escolha do sistema de telhas metálicas foi fundamental, pois permite o acoplamento de estruturas sem a necessidade de perfuração das telhas (Figura IV.18). Isto é possível com o uso de componentes do sistema de telhas metálicas, no caso, grampos para fixação de passarelas, sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, entre outros usos, adaptado para o sistema de cobertura da Ekó House.

Figura IV.18: Conexão Grampos de fixação nas telhas metálicas. A régua com os clips de sustentação das telhas, com os clips já espaçados na distância necessária de 41cm para o encaixe das telhas, são fixados na cobertura do Corpo da Residência. Os grampos, por sua vez, prendem-se nas telhas sem que haja necessidade de perfurá-las. Nos grampos são presas as régua de fixação da estrutura de suporte e, posteriormente, a própria estrutura com os sistemas solares

Alguns equipamentos de medição foram instalados na cobertura para o monitoramento do sistema. Eles medem e registram dados meteorológicos (irradiação solar, temperatura dos módulos, velocidade do vento, entre outros), além de medirem a temperatura e umidade relativa interna da casa. Foram utilizados 2 inversores que, além de converterem a corrente contínua em corrente alternada, também armazenam dados sobre a geração de eletricidade. Outros equipamentos e dispositivos instalados são necessários para o controle, a conexão com a internet, a segurança do sistema, a medição da energia fornecida e retirada da rede e a interface entre o sistema e o usuário (Figura IV.19).

Como a Ekó House tem fins acadêmicos e de pesquisa, o sistema de medida e armazenamento de dados climatológicos e os dispositivos de monitoramento e interface com o usuário são importantes. Contudo, são de interesse também para residências convencionais. Com eles o usuário pode controlar o sistema, acompanhar seu desempenho, podendo prever inclusive possíveis manutenções e problemas advindos de sujeira nos módulos, por exemplo.

A localização adequada e segura desses equipamentos e dispositivos exigiu o trabalho conjunto dos arquitetos e engenheiros da equipe. Desse trabalho conjunto resultou a decisão de se projetar uma área técnica (gabinete técnico) isolada e com acesso independente do corpo principal da casa. O gabinete técnico foi posicionado e dimensionado para abrigar os equipamentos e dispositivos, provendo condições de acesso seguro, boa ventilação, controle de umidade e proteção do intemperismo. No gabinete técnico, a localização dos inversores é um ponto crítico, pois, como já foi dito, precisam estar em local seco, bem ventilado,

protegido das intempéries e com os afastamentos garantidos para seu correto funcionamento, além de serem fixados a um substrato resistente e seguro.

Para a conexão com a rede (*grid*), a organização do evento montou na Villa Solar (local onde foi realizada a competição) um sistema de *smartgrid*, onde as casas participantes puderam se conectar, fornecendo eletricidade para a rede durante o dia e usando a eletricidade da rede no período noturno. Por esse motivo não foi necessária a utilização de qualquer forma de armazenamento de energia.

Figura IV.19 – Desenho esquemático representando os dispositivos de controle do sistema fotovoltaico, que monitoram o clima, a incidência de radiação solar, a temperatura dos módulos, transformam a corrente de contínua para alternada, fornecem dados de geração e fazem a interface entre o sistema e o usuário (Adaptado pelo autor de TEAM, 2012b).

Questões técnicas relativas ao dimensionamento, operação e controle do sistema fotovoltaico da Ekó House não são abordadas neste trabalho, mas foram tratadas por Giovani A. Dávi (2013) em sua dissertação de mestrado.

4.1.2 – ATRIBUTOS RESTRITIVOS

A segurança é um atributo importante de um sistema fotovoltaico, desde sua fabricação até o descarte. Esse cuidado tem de estar presente na escolha dos materiais, observando-se sua resistência contra fogo, possibilidade de liberar substâncias tóxicas, fabricação, para que se minimizem os riscos na montagem e se evite que o trabalhador seja exposto a situações que comprometam sua integridade física, entre outros. Alguns desses cuidados serão comentados na seção denominada Atributos da Incorporação Fotovoltaica ao Longo do Ciclo de Vida (4.3.4).

Questões relativas à confiabilidade do sistema também podem restringir decisões, teoricamente, exclusivas do desenho da incorporação fotovoltaica. Algumas já foram abordadas nas seções anteriores, como o afastamento dos módulos visando sua melhor

ventilação, os cuidados relativos ao sombreamento do plano de geração, evitando assim o fenômeno de *hot spot*, que pode danificar os módulos e a localização dos inversores. Sistemas de controle também podem auxiliar nesse sentido, uma vez que o aumento de informações disponibilizadas ao usuário podem ajudá-lo a gerenciar o sistema e antecipar a solução de possíveis problemas na operação e funcionamento.

A ergonomia também é um atributo importante e que, se pensada nas fases iniciais de projeto, pode evitar problemas consideráveis. No caso da Ekó House, duas questões relativas à ergonomia na montagem do sistema fotovoltaico podem ser destacadas. A primeira tem relação com o peso das peças da estrutura de suporte dos sistemas solares, e a segunda com a falta de passarelas para locomoção sobre as telhas metálicas. Esses dois fatores dificultaram a movimentação, tanto para montagem da estrutura e dos sistemas solares, quanto para sua conexão. Para realizar qualquer trabalho com segurança, os cuidados com o local de realização do trabalho não devem ser negligenciados. Prover condições seguras para o deslocamento sobre o telhado permite ao trabalhador carregar peças, como os módulos fotovoltaicos, por exemplo, com mais conforto e segurança. Por outro lado, em locais inadequados e de difícil acesso, mesmo trabalhos de pequena escala envolvendo cargas leves tornam-se muito mais difíceis e expõem os trabalhadores a riscos desnecessários.

Outro ponto relativo à ergonomia, que não foi levado em consideração durante o projeto, foi o espaço para a conexão dos módulos mais próximos à fachada frontal da residência, como pode ser observado na Figura IV.20. Pela inclinação do plano de cobertura, o acesso à face inferior dos módulos foi dificultado. O trabalho de conexão dos módulos foi feito em condições não adequadas para o posicionamento dos instaladores e para o manuseio das ferramentas. Os acessos e áreas mínimas adequadas ao trabalho de instalação e manutenção desses sistemas devem ser projetados com rigor.

Figura IV.20 – Vista lateral da Ekó House. O círculo indica o local onde o acesso é dificultado, tanto para a montagem dos módulos, quanto para conexão dos mesmos, apontando problemas de ergonomia.

Dois pontos das regras da competição limitavam o custo, tanto das células, que não poderiam exceder a 6 € por watt pico, como dos módulos, cujo preço máximo era de 12 € por watt pico em Standard Test Conditions [STC], a fim de estabelecer um equilíbrio entre os times participantes (SOLAR, 2012).

4.1.3 – ATRIBUTO DE ANÁLISE

Do ponto de vista do impacto ambiental, a geração local de energia elétrica, a partir de fontes renováveis, caminha no sentido de minimizar o impacto de longas infraestruturas para a transmissão, aproximando as fontes geradoras do consumo, como já comentado anteriormente. Porém, a escolha do material da estrutura de suporte do sistema de geração é também uma questão significativa, no que diz respeito ao impacto ambiental, com reflexos sobre as escolhas e o processo do projeto.

Diferentes ligas de alumínio foram usadas para a especificação das telhas e dos perfis da estrutura de suporte do plano de geração. Apesar do uso intensivo de energia durante a fabricação dos perfis, o alumínio é mais leve e mais resistente à corrosão atmosférica e às intempéries, se comparado ao aço. Essas propriedades facilitam a manutenção do material e prolongam a sua vida útil. Além disso, pode ser reciclado, facilitando a sua reincorporação à cadeia produtiva ao final da sua vida útil. As características do material foram importantes para argumentação apresentada em uma das provas do concurso – a de viabilidade de mercado, considerando que havia a possibilidade da Ekó House ser implantada em locais de elevada agressividade atmosférica, como os próximos ao mar.

4.1.4 – ATRIBUTOS DA INCORPORAÇÃO FOTOVOLTAICA AO LONGO DO CICLO DE VIDA

Durante o projeto da estrutura de suporte do sistema de geração de energia, foram levadas em consideração algumas questões de fabricação e montagem da estrutura, uma vez que deveria ser feita pela equipe do Team Brasil. A escolha do alumínio como material a estrutura, em razão, entre outras, do seu peso próprio baixo e maior resistência à corrosão, se comparados ao aço, acabou facilitando também na movimentação das peças no canteiro, fabricação e montagem.

Basicamente quatro operações foram feitas, para fabricação e montagem da estrutura: corte (Figura IV.21.a), furação (Figura IV.21.b), colagem e parafusamento (Figura IV.21.c), uma vez que a solda nesse material necessita mão-de-obra especializada, o que no final acabou minimizando riscos. Essas atividades foram executadas por dois profissionais e um ajudante que auxiliaram a equipe em diversas atividades, inclusive na fabricação de todas as peças que compuseram a estrutura dos sistemas solares. Evidentemente esses detalhes de encaixe e montagem das peças influenciaram no detalhamento desta estrutura. Nesse sentido, a ferramenta computacional utilizada pela equipe possibilitou não só o detalhamento dessas peças, como também sua organização e numeração. Cada peça da estrutura tinha um endereço, que foi marcada à medida que ficava pronta (Figura IV.21.d), auxiliando de forma eficaz no processo de montagem. Outro trabalho de mestrado de um dos integrantes da equipe aborda mais profundamente o assunto relacionado à fabricação digital e o auxílio dessas ferramentas durante o processo de fabricação da Ekó House.

Figura IV.21 – Processos de montagem da estrutura de suporte dos sistemas solares: (a) operação de corte de uma peça metálica da estrutura; (b) operação de furação de um perfil metálico da estrutura; (c) após a limpeza da peça e aplicação de cola, a peça de ligação (bacalhau) é aparafusada pela equipe; (d) peças prontas e devidamente referenciadas para auxiliar na montagem da estrutura (Fotos: Autor).

A necessidade de montagem rápida durante a competição levou a equipe ao desenvolvimento de um sistema que facilitasse e acelerasse o processo de acoplamento dos módulos fotovoltaicos, preferencialmente, sem a necessidade de ferramentas. A solução foi a adaptação experimental de fechos-gatilho, comumente utilizados em janelas, na parte superior dos módulos fotovoltaicos e na parte inferior um perfil metálico “U”. A operação de montagem e desmontagem dos módulos foi simplificada, encaixando-se primeiro a parte inferior (perfil “U”), no perfil horizontal “U” da estrutura de suporte, e posteriormente o fecho gatilho prendia em orifícios quadrados, com aproximadamente 1cm x 1cm, feito no perfil horizontal “U” do lado oposto, a operação inversa é feita para desmontagem (Figura IV.22).

A necessidade de montagem rápida durante a competição levou a equipe ao desenvolvimento de um sistema que facilitasse e acelerasse o processo de acoplamento dos módulos fotovoltaicos, preferencialmente, sem a necessidade de ferramentas. A solução foi a adaptação experimental de fechos-gatilhos, comumente utilizados em janelas, na parte superior dos módulos fotovoltaicos, e, na parte inferior, foi usado um perfil metálico “U”. A operação de montagem e desmontagem dos módulos foi simplificada, encaixando-se primeiro a parte inferior (perfil “U”) no perfil horizontal “U” da estrutura de suporte, e, posteriormente, o fecho-gatilho prendia em orifícios quadrados, com aproximadamente 1cm x 1cm, feito no perfil horizontal “U” do lado oposto. A operação inversa é feita para desmontagem (Figura IV.22).

Figura IV.22: Estágios de desacoplamento dos módulos fotovoltaicos da estrutura de suporte. Da esquerda para direita: primeiro, o módulo acoplado; segundo, puxa-se o fecho gatilho e empurra-se o módulo para cima; terceiro, desacoplamento da parte inferior dos módulos (perfil “U”).

A logística de transporte pode ter uma série de implicações em qualquer obra ou instalação. Seja pelo acesso de uma determinada estrutura até o canteiro, ou mesmo no deslocamento de um módulo fotovoltaico do chão até a cobertura. No caso da Ekó House, o transporte transoceânico e a necessidade de montagem rápida durante a competição exigiu que as duas estratégias fossem pensadas em paralelo. O uso de container padrão *containers* e padrão de mercado *high cube 40'*, com medidas internas de: comprimento 12,036m, largura da porta 2,338m e altura da porta 2,697m, para o transporte rodo-marítimo, definiu a modulação de todas as partes da casa, inclusive a cobertura. A logística para estufagem (termo utilizado para designar a colocação das peças nos containers) também foi considerada, uma vez que algumas partes teriam de ser içadas, embaladas, protegidas e só então estufadas.

A dificuldade maior, no entanto, foi com a estrutura de suporte dos sistemas solares, tendo em vista que é uma estrutura tridimensional. A solução foi desenvolver um projeto em que as estruturas tridimensionais pudessem se fechar, transformando-as em planos com dimensões de 8,20mX2,40m. Com esse objetivo, foi necessário que os módulos ficassem com um balanço lateral, de um lado e de outro, de 40cm (Figura IV.23). Uma vez que cada módulo fotovoltaico tem aproximadamente 1,5m de comprimento, e cada conjunto de treliças receberia dois módulos lado a lado, a dimensão totalizaria 3m, o que não caberia em containers padrão. A desmontagem de cada módulo metálico da estrutura de suporte dos sistemas solares segue 4 fases: retirada dos módulos fotovoltaicos e evacuação do conjuntos de tubos da estrutura metálica de suporte; na sequência, a retirada dos perfis que mantêm a estrutura tridimensional, como pode ser visto na Figura IV.23, da 2º para 3º fase; em seguida, a estrutura é dobrada para uma estrutura com 2 dimensões predominantes (Figura IV.23).

Figura IV.23: fases de desmontagem das estruturas de suporte dos sistemas solares. Da esquerda para direita: tiram-se os módulos fotovoltaicos (1º fase); já com a estrutura vazia (2º fase), tiram-se os dois perfis metálicos que mantêm a estrutura montada (3º fase); fecha-se a estrutura para que fique nas medidas padrões para viajar em containers standards (4º fase).

Os módulos fotovoltaicos foram transportados em caixas de madeira, com espuma protetora contra impactos, como pode ser observado na Figura IV.24.a. Foram embalados dois a dois, para aproveitamento de espaço nas caixas. Já viajaram com os fechos-gatilhos instalados e foram endereçados um a um (Figura IV.24.b), para que sua instalação durante a competição acontecesse da mesma forma que a testada na montagem no Brasil, na tentativa de minimizar incertezas.

Figura IV.24 – (a) Módulos fotovoltaicos sendo embalados e protegidos dois a dois para colocação nas caixas de madeira. (b) Módulos fotovoltaicos dentro das caixas de madeira, com proteção interna de espuma contra impactos. (Fotos: Fernanda Antônio)

Como já foi explicitado, o período curto de montagem e desmontagem do protótipo foi uma condicionante que permeou várias etapas do projeto da Ekó. No caso da estrutura de suporte dos sistemas solares, características como a distribuição de massa, o passo a passo da montagem e a forma de fixação na estrutura da casa tiveram grande importância nas tomadas de decisão. Cada conjunto de treliça, por exemplo, tem aproximadamente 200kg, massa excessiva para ser erguida sem o suporte mecânico. Essa característica exigiu não só cuidados na logística de movimentação pelo canteiro, como também em seu acoplamento nas telhas metálicas, uma vez que seria necessário aparafusar cada conjunto de treliças nas régulas de fixação, exigindo cuidados no trabalho na cobertura.

Transportar as estruturas pré-montadas certamente contribuiu para a rapidez da montagem e desmontagem do protótipo durante a competição. Com o auxílio de uma grua, cada um dos três conjuntos de treliças foi movimentado até um local determinado no canteiro (Figura IV.25). Posteriormente, as duas barras verticais foram recolocadas. A estrutura tridimensional foi então erguida até o topo da residência, onde foi aparafusada em réguas previamente fixadas nas telhas metálicas.

Figura IV.25: Movimentação das estruturas de suporte do sistema de absorção de energia no canteiro em Madri (GALERIA, 2012).

4.2- RESULTADOS DURANTE A COMPETIÇÃO

Os resultados durante a competição, no que diz respeito ao sistema fotovoltaico, aconteceram dentro do esperado pela equipe, destacando a qualidade no projeto e execução. A montagem transcorreu sem problemas consideráveis, apenas, como já foi citada, a dificuldade de acesso para instalação de alguns fotovoltaicos e movimentação na cobertura. A Ekó House foi a casa que mais injetou energia na rede, dentre as que participaram da competição, alinhando-se com a estratégia de alta produção.

Como pode ser visto no gráfico da Figura IV.26, a energia produzida pelo sistema foi de muito maior que o consumido pela residência, chegando a até 6 vezes mais no dia 24, o que condiz com discurso de Viabilidade de Mercado e com as simulações. Contudo, se aplica em residências convencionais, provavelmente essa estratégia teria de ser adaptada, tendo em vista que a produção muito além do consumo, dificulta a viabilidade comercial. Para a competição, gerar muita energia não é, necessariamente, uma vantagem. Na prova de Balanço Energético, por exemplo, a discrepância entre a geração e o consumo foi prejudicial, o que acarretou a 14ª colocação para equipe. Por outro lado, o discurso de Viabilidade de Mercado foi bem avaliado pelos jurados da prova de Sustentabilidade, considerando que gerar mais energia era um ponto importante uma vez que seria distribuída a comunidade, nesta prova o Team Brasil ficou com o 3º lugar.

A oscilação na geração, que pode ser observada no gráfico da Figura IV.26, aconteceu pois o desempenho do sistema depende, sobretudo, da radiação incidente nos módulos e de

sua temperatura. No dia 19, por exemplo, como pontua Davi (2013), observou-se os maiores índices na incidência de radiação, porém, a maior produção aconteceu no dia 24 por seus bons níveis de radiação, aliados a temperaturas mais amenas.

Figura IV.26 – Gráfico do balanço de energia elétrica da edificação durante o SDEurope (2012) comparando a energia produzida, a injetada na rede e a importada da rede elétrica, a produzida pelos fotovoltaicos e diretamente consumida e o total de energia consumida (Adaptada pelo autor de DAVI, 2013)

É interessante observar também o PR do sistema foi elevado, com uma média de 89%, chegando próximo a 96% em alguns dias, como pode ser observado na Figura IV.27. Segundo Davi (2013) o PR sofre grande influência da radiação solar local e da temperatura dos módulos, o que salienta a qualidade da ventilação no plano de geração da Ekó House, tendo em vista que os níveis observados de PR são elevados, valorizando a preocupação da equipe em assumir estratégias que melhorem o rendimento do sistema, evidentemente, impactando em questões estéticas.

Figura IV.27 – Gráfico da Produtividade e do Indicador de Desempenho do Sistema (PR) da Ekó House no período da competição em SDEurope (2012) (Adaptado pelo autor de DAVI, 2013)

4.3- CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO

O desenvolvimento do projeto foi feito de forma espiral, ou seja, levou-se em conta uma série de premissas, no caso dos fotovoltaicos, relativas principalmente ao seu desempenho e geração e, à medida que o projeto evoluía, consideravam-se outros requisitos, de forma que, muitas vezes, as primeiras premissas foram retomadas, encaradas sob outra perspectiva.

A partir desse método, desenvolvido à luz da experiência prática de projeto, da sua fabricação, montagem e operação da Ekó House, são esclarecidos os motivos que direcionaram a proposta apresentada no quinto capítulo, ou seja, de um modelo que auxilie arquitetos na organização dos atributos, e facilite a tomada de decisão em projetos de incorporação de sistemas fotovoltaicos em envoltórias de edificações.

V. CAPÍTULO

MODELO PARA OBTENÇÃO DE ESPECIFICAÇÕES NA INCORPORAÇÃO DE FOTOVOLTAICOS EM EDIFICAÇÕES

5.1 - INTRODUÇÃO

Tomar decisões é fazer escolhas. Segundo Santos (2013), “o processo de decisão compreende desde a identificação de uma situação problema, até a escolha e colocação em prática da solução”. Para esse autor, existe uma série de ferramentas que auxiliam na tomada de decisão em projetos, buscando “minimizar erros e aumentar o grau de certeza de decisões, a partir de uma decisão lógica e coerente com o problema apresentado”

Nos capítulos anteriores foram apresentadas características das tecnologias fotovoltaicas mais difundidas e comercializadas, conceitos e possibilidades de integração dessas tecnologias em envoltórias, e um exemplo de integração fotovoltaica em uma residência unifamiliar. Neste capítulo, esses conteúdos serão inter-relacionados para formatar a proposta de um modelo para a aquisição das especificações de projeto na incorporação de fotovoltaicos na envoltória de edifícios.

A proposta é apresentar os atributos envolvidos no processo de projeto em quatro grupos (Figura V.1). Os *atributos de projeto* influenciam o desenho, o arranjo e a organização espacial, a estética e o rendimento dos sistemas fotovoltaicos. Os *atributos* restritivos limitam as escolhas de projeto em razão da segurança, confiabilidade, ergonomia, economia, leis ou normas. O *atributo de análise* permite a apreciação do projeto no que se refere aos possíveis impactos ambientais aplicáveis aos outros três grupos de atributos de forma transversal. Por fim, os *atributos da incorporação fotovoltaica ao longo do seu ciclo de vida*, que tratam das questões executivas relacionadas à fabricação, ao uso e descarte dos equipamentos e estruturas de suporte relacionadas ao sistema fotovoltaico. Dentro do atributo de impacto ambiental, ainda poderão ser considerados aspectos referentes à análise da emissão de poluentes, consumo de água, eletricidade, contaminação do solo e água na cadeia produtiva dos fotovoltaicos. Embora todos os atributos estejam dentro do contexto das incorporações fotovoltaicas, o foco será voltado aos *atributos de projeto*.

Figura V.1– Divisão dos atributos envolvidos nos projetos de incorporação de fotovoltaicos em envoltórias de edifícios em quatro grupos (projeto, restritivos, de análise e do produto ao longo do ciclo de vida) e seus respectivos subgrupos.

A interação entre os atributos acontecerá a partir da “espiral do desenvolvimento do projeto”, como pode ser visto na Figura V.2. Os *atributos de projeto* são utilizados para a elaboração do projeto preliminar ou projeto pré-executivo, uma vez que têm maior implicação no desenho da incorporação. Por este motivo, esses atributos são sugeridos como ponto de partida para o processo de projeto, a partir dos requisitos do usuário. À medida que o projeto se desenvolve, passando por todos os subgrupos dos *atributos de projeto*, *restritivos*, *de análise* e de *ciclo de vida*, os requisitos de projeto ficam mais claros, assim como o detalhamento do projeto executivo final.

Figura V.2– Espiral do desenvolvimento do projeto, passando pelos quatro grupos de atributos. O processo de projeto parte dos requisitos do usuário.

As definições de projeto preliminar ou projeto pré-executivo e projeto executivo final são as utilizadas pelo o Instituto de Arquitetos do Brasil (IAB-SP), que define:

Anteprojeto ou Projeto Pré Executivo: *Solução Geral do problema com a definição do partido adotado, da concepção estrutural e das instalações em geral, possibilitando clara compreensão da obra a ser executada.*

Projeto Executivo Final: *Solução definitiva do Anteprojeto, representada em plantas, cortes, elevações especificações e memoriais de todos os pormenores de que se constitui a obra a ser executada: determinação da distribuição dos elementos do sistema estrutural e dos pontos de distribuição das redes hidráulicas, sanitárias, telefônicas, ar condicionado, elevadores e de informática.*

(Fonte: IABSP, 2013)

Apesar da indicação de início do processo de projeto pelos *atributos de projeto*, por sua ligação com conceito do desenho, em grupos multidisciplinares com o envolvimento de profissionais de outras áreas, a análise sobre os diferentes tipos de atributos, ou sobre os subgrupos de atributos pode acontecer de forma simultânea, sem que haja uma ordem pré-estabelecida.

O presente capítulo aprofunda os conceitos dos *atributos de projeto*, por entender, como já foi pontuado, que tem maior influência nas decisões referentes ao desenho da incorporação do sistema fotovoltaico, assunto deste trabalho. Apesar de reconhecer a influência dos outros três grupos de atributos no projeto, principalmente do grupo de atributos do ciclo de vida, sua apresentação não será detalhada.

A seguir, a apresentação do modelo para a obtenção de especificações que contribuem no projeto e desenho de sistemas fotovoltaicos integrados na envoltória de edifícios residenciais.

5.2 - ATRIBUTOS DE PROJETO

Os atributos de projeto compreendem cinco subgrupos, como pode ser visto na Figura V.3: Rendimento Energético, Estética, Estrutura de Suporte, Controle e a Inovação. O desenho da envoltória fotovoltaica será determinado, em sua maioria, pelas problemáticas trabalhadas dentro desses atributos. Iniciando pelos requisitos do usuário, o projetista pode começar o processo de projeto em um dos subgrupos que melhor represente as necessidades do usuário. O conjunto de necessidades pode incluir a autossuficiência energética, a facilidade de manutenção ou pode estar associado ao desejo de uma casa bonita, que represente uma escolha consciente do uso de tecnologias de menor impacto ambiental.

Figura V.3– O grupo de atributos de projeto, que compreende o projeto básico ou preliminar, e o desdobramento de seus cinco subgrupos: Rendimento Energético, Estética, Estrutura de Suporte, Controle e Inovação.

5.2.1 – Rendimento Energético

Os atributos presentes neste subgrupo são determinantes para o rendimento energético do sistema. Interferem também em questões estéticas, como a escolha da face do edifício em que os fotovoltaicos serão aplicados. Sendo assim, devem interagir com os outros subgrupos.

O rendimento energético contempla dez outros atributos: estratégia de Balanço, Localização, Orientação, Tecnologia Fotovoltaica, Área, Tipo de Integração, Indicador de Eficiência do Sistema, Cálculo do Rendimento Anual e Sombreamento, que, por sua vez, também são subdivididos, conforme a Figura V.4.

Figura V.4– Subgrupo dos Atributos de Projeto. O Rendimento Energético se desdobra em outros dez atributos: Estratégia de Balanço, Localização, Orientação, Tecnologia Fotovoltaica, Área, Tipo de Integração, Indicador de Eficiência do Sistema, Cálculo do Rendimento Anual e Sombreamento.

Na sequência, o detalhamento de cada uma das subdivisões.

5.2.1.1 Estratégia de Balanço:

A estratégia de balanço é uma decisão importante do projeto com sistemas fotovoltaicos e considera quatro tipos de estratégia:

- Balanço energético anual superior ao consumo da edificação;
- Balanço energético anual semelhante ao consumo da edificação;
- Balanço energético anual inferior ao consumo da edificação;

- Balanço energético superior ao consumo da edificação e voltado a um período do ano;

Como já exposto no primeiro capítulo, sistemas fotovoltaicos integrados a edifícios, com contribuição significativa no balanço entre seu consumo e geração de eletricidade, caminham para uma geração, no mínimo, equivalente ao consumo. Contudo, questões relacionadas ao custo dos fotovoltaicos, eficiência, área disponível insuficiente ou consumo elevado de energia pelo edifício podem dificultar o caminho até a estratégia ideal de balanço. Esse percurso segue duas vertentes: uma relativa ao sistema fotovoltaico, maximizando sua produção de energia e minimizando suas perdas, outra que diz respeito ao edifício, procurando reduzir seu consumo energético. Nesta seção será explorada a primeira vertente.

A estratégia de balanço pode começar a partir de um desejo ou requisito do usuário. Para que seja definida com precisão, tanto os dados de consumo do edifício, como o pré-dimensionamento da geração devem ser feitos. Contudo, a área disponível para incorporação, em muitos casos, é o caminho crítico para alcançar uma estratégia de balanço, principalmente quando a geração é igual ou superior ao consumo.

No caso de casas unifamiliares, por exemplo, onde a área de cobertura é próxima ou parecida às áreas das fachadas, atingir estratégias com geração de energia igual ou maior ao consumo pode ser mais fácil, uma vez que planos voltados ao zênite são expostos a níveis maiores de radiação direta, permitindo maior geração. Prédios de apartamento ou comerciais, por outro lado, têm maior superfície de fachada e fatores de radiação menores, como visto nos ábacos do terceiro capítulo, e as possibilidades de sombreamento são maiores. Nesses casos, atingir balanços iguais ou superiores ao consumo exige preocupação redobrada com o consumo do edifício, eficiência dos módulos e aumento do PR, procurando maximizar o rendimento dos módulos, entre outros aspectos.

5.2.1.2 Localização:

A localização é o que diferencia a produção de edifícios de outros produtos industrializados como carros, aviões, barcos. O local de implantação apresenta particularidades dependentes da latitude e da irradiação global incidente sobre a superfície horizontal. Os atributos de Localização interagem diretamente com os de Orientação.

Como já visto, o Brasil tem altos índices de incidência de radiação solar ao longo do território, principalmente nos estados ao Centro e Norte do país, como apresentado no terceiro capítulo. Isso permite aos projetistas uma flexibilidade relativamente alta na variação de orientação e inclinação do plano de geração, comparativamente aos mais favoráveis, ou seja, inclinação igual à latitude e orientação a Norte (no caso do hemisfério Sul).

Características relacionadas ao contexto urbano da edificação, principalmente pela possibilidade de sombreamento por edificações vizinhas, ou qualquer outro elemento, também devem ser levadas em conta.

5.2.1.3 Orientação:

A orientação do plano de geração é importante para o rendimento de um sistema fotovoltaico. Esse atributo tem relação também com a localização da edificação e sua latitude. Os ábacos, previamente expostos no terceiro capítulo, auxiliam na escolha da orientação e inclinação do plano de geração, fornecendo a porcentagem de radiação solar incidente em determinado plano. Outra possibilidade é a utilização de simulações computacionais mais precisas.

A incorporação fotovoltaica em edifícios pode acontecer na cobertura, na fachada ou em ambos, como já explicitado no terceiro capítulo (Figura III.5 e Figura III.6). A escolha entre essas duas faces é uma decisão de projeto, que tem influência do tipo de edificação - térrea ou verticalizada, como exposto na seção 5.2.1.1. A orientação do plano de geração, por outro lado, pode flexibilizar ou restringir a inclinação da cobertura ou fachada, no caso de planos fixos. No caso de planos de geração móveis, a flexibilidade com relação à orientação é, evidentemente, maior.

5.2.1.4 Tecnologia Fotovoltaica:

A escolha da tecnologia fotovoltaica tem fundamental importância no rendimento energético do sistema. Nesse sentido, a principal característica da tecnologia, como apresentada no segundo capítulo, é a eficiência do módulo (seção 2.3.1). Contudo, outras como a variação no desempenho da tecnologia, de acordo com o tipo de radiação incidente (seção 2.3.6), seu desempenho em relação ao aumento de temperatura (seção 2.3.4), ao sombreamento (seção 2.3.5), ou as dimensões dos módulos são também importantes e devem estar relacionadas com atributos, como a estratégia de balanço e localização do plano de geração na envoltória e área.

A relação dos fotovoltaicos com outras estratégias, como as de conforto térmico ou de proteção contra intempéries, por exemplo, também devem ser observadas e levadas em consideração na escolha da tecnologia. Isso porque, dentre os diferentes tipos de módulos disponíveis no mercado, alguns são mais facilmente adaptáveis ou completamente adaptados a essas estratégias.

Características físicas, como tipo de moldura, quantidade e tipo de células, substrato e vedação, que serão apresentadas no subgrupo Estéticas (item 5.2.2), podem também nortear a escolha da tecnologia, uma vez que necessidades estéticas - sejam para destacar os módulos, para adequar a linguagem de outros elementos do edifício, ou para imitar elementos tradicionais da arquitetura, também são fatores que devem ser levados em consideração.

O custo, disponibilidade no mercado e garantia também influenciam na escolha da tecnologia.

5.2.1.5 Área:

Como já comentado, a área do plano de geração é uma característica importante dos projetos com módulos fotovoltaicos, com implicação direta na geração de energia. Por este motivo, há que relacioná-la com outras características, relativas à estratégia de balanço, ao

local de aplicação na envoltória, à quantidade de radiação incidente sobre esse plano e à tecnologia. Um projeto com área de aplicação restrita, por exemplo, pode apontar para o uso de módulos fotovoltaicos mais eficientes, buscando atingir um balanço energético maior.

Nesse sentido, a Tabela V.1 facilita a estimativa da área, considerando a área média necessária para gerar 1kW por tecnologia em CPT. O cálculo aproximado da área, disponível no terceiro capítulo, é um aspecto a ser considerado na fase inicial do projeto.

O avanço das tecnologias fotovoltaicas e o crescente aumento na eficiência das células e módulos, o aparecimento de novas tecnologias, como as de terceira geração, e a melhor eficiência dos sistemas de iluminação artificial, condicionamento de ar, eletrodomésticos, entre outros, tendem a diminuir a implicação ou a importância da área para alcançar balanços energéticos anuais superiores ou equivalentes ao consumo das edificações.

5.2.1.6 Tipo de Incorporação - construtibilidade:

O tipo de incorporação dos fotovoltaicos na envoltória da edificação quanto à construtibilidade, apresentada previamente no terceiro capítulo (seção 3.3.1), é tratada sob três tipos de análise: adição, substituição e integração. A relação desses tipos de incorporação com o rendimento energético está mais intrinsecamente relacionada com a capacidade de circulação de ar na face posterior do módulo, minimizando seu aquecimento.

A escolha construtiva terá impactos sobre a estrutura de suporte e fixação dos módulos. Na adição e substituição, por exemplo, os módulos mais comercializados podem ser utilizados mais facilmente. A integração já demanda tecnologias um pouco mais sofisticadas, como os BIPV.

Outro ponto que pode determinar a escolha entre os diferentes tipos de incorporação é se a edificação já está construída ou não. No caso de edifícios existentes, por exemplo, a integração se torna mais difícil. O fato de o sistema ter outra função na edificação, como proteção solar contra intempéries, ou mesmo estética, pode ajudar na tomada de decisão entre um dos três tipos de incorporação

5.2.1.7 Indicador de Eficiência do Sistema:

O indicador de eficiência do sistema, conhecido como PR, calcula as perdas ocorridas no sistema. Como visto anteriormente, vários fatores podem influenciar o desempenho do sistema: temperatura dos módulos, radiação solar incidente, sombreamento por elementos externos ou material particulado depositado na superfície, perdas nos cabos e inversores, tipo da tecnologia fotovoltaica aplicada, entre outros.

Sistemas bem projetados podem chegar a eficiências em torno de 96% em países Europeus (LELOUX; NARVARTE; TRESBOSC, 2011), enquanto a média aceitável é 80% (FARKAS, 2012). O que reforça o cuidado durante o processo de projeto e a necessidade de uma visão ampla sobre os atributos envolvidos, procurando minimizar ao máximo as perdas do sistema.

O aquecimento dos módulos é um fator chave no Brasil, uma vez que as temperaturas são mais elevadas do que a maioria dos países líderes na incorporação de fotovoltaicos. A utilização de estratégias de resfriamento e de tecnologias que sejam menos afetadas pelo aumento da temperatura são pontos importantes a serem levados em consideração.

5.2.1.8 Cálculo do Rendimento Anual:

O cálculo do rendimento anual, como já foi visto, pode ser feito com simulações computacionais ou manualmente por meio de equações, como apresentadas no terceiro capítulo (Equação III.3). O rendimento anual pode ser calculado de forma aproximada, com uma relação entre a quantidade média de radiação incidente sobre um plano, sua área e três coeficientes de minoração: o PR, a eficiência do módulo e o fator orientação.

É importante que o projetista utilize o cálculo do rendimento para balizar suas decisões ao longo do projeto. Mudanças de orientação e inclinação do plano de geração, por exemplo, podem alterar significativamente o rendimento anual do sistema. Com a equação para o cálculo aproximado do rendimento anual, é possível a construção de uma série de cenários para a incorporação em determinado edifício, seja colocando os fotovoltaicos na cobertura, na fachada, nos dois, em uma orientação, em outra, com inclinações distintas, de forma a aumentar o campo de possibilidades da integração.

5.2.1.9 Sombreamento:

O sombreamento tem um grande impacto sobre o rendimento de um sistema fotovoltaico, podendo inclusive danificar os módulos, como visto no segundo capítulo. Um plano de geração pode ser sombreado por elementos externos ao lote, como edificações vizinhas; internos ao lote, como árvores ou postes de iluminação, e por elementos da própria edificação, como chaminés, caixas d'água e assim por diante. A sujeira é outro fator de sombreamento dos módulos.

No caso do posicionamento de módulos fotovoltaicos nas fachadas, o risco de sombreamento é maior do que na cobertura, por exemplo. Assim, a própria escolha de uma tecnologia que seja menos afetada pelo sombreamento pode ser uma solução interessante, mesmo que sua eficiência seja menor.

Na implantação de edifícios com fotovoltaicos no perímetro urbano, principalmente nas cidades Brasileiras, onde o Planejamento não consegue responder a todos os anseios e mudanças das cidades, a questão do sombreamento toma contornos ainda mais importantes. O exercício de pensar no futuro (em um período de 20 a 30 anos, que é a garantia da maioria dos módulos), em como determinado bairro ou vizinhança deve crescer, procurando responder a esses anseios na implantação do edifício e na escolha da face que receberá os fotovoltaicos, pode evitar ou minimizar problemas futuros de sombreamento por edificações vizinhas, por exemplo.

5.2.2 Estética

O atributo *estética* foi subdividido em cinco outros atributos. O primeiro se relaciona com o conceito estético (*abordagens*) e os outros com a estética do módulo fotovoltaico (*vedação*, *substrato*, *moldura* e *aparência da célula*), como pode ser visto na Figura V.5.

Figura V.5 – Subgrupo de Atributo de Projeto, a Estética. Suas cinco subdivisões (Abordagem, Vedação, Substrato, Moldura, Aparência das Células) e os respectivos desdobramentos.

5.2.2.1 Abordagens:

As abordagens de projeto apresentadas anteriormente na secção 3.3, do terceiro capítulo, podem influenciar as decisões nas fases iniciais do projeto e podem estar vinculadas, de certa maneira, aos requisitos do usuário. Em última instância, as abordagens influenciam o próprio conceito da aplicação, com reflexos na estética, como será explicitado a seguir:

Subjugado: Quando o tipo de instalação é feito sem que haja preocupação com integração aos demais sistemas da edificação.

Dominante: Quando a tecnologia fotovoltaica tem um papel decisivo no desenho do prédio novo, sua orientação, volume e configuração do envelope.

Integrado: Quando a instalação fotovoltaica está em harmonia com a edificação. A tecnologia solar, a estrutura e a arquitetura estão em simbiose, de forma quase inseparável.

Subordinado: Quando o sistema de captação de energia solar é dificilmente reconhecido ou observável, em razão do formato, das dimensões, posição do observador ou cor.

Imitação: Quando o sistema solar tenta reproduzir formas ou materiais tradicionais de construção.

5.2.2.2 Substrato:

A cor do substrato influencia na estética da integração, no caso de módulos dispostos em locais visíveis. Os mais comuns são os substratos branco e preto, como visto no segundo capítulo, embora existam empresas que fabriquem módulos com substratos coloridos ou incolores. Fatores como o custo e eficiência dos módulos devem ser levados em consideração, uma vez que produtos fora dos padrões da produção costumam apresentar

preços mais elevados e mudanças nas configurações convencionais dos módulos podem afetar seu rendimento.

5.2.2.3 Moldura:

O fato de o módulo ter ou não moldura afetará o acoplamento na estrutura de suporte, a resistência, a estética da integração - quando os módulos são visíveis, tanto pela diferença na falta ou presença e a moldura, pelas possibilidades diferentes de cor. O uso de módulos com molduras facilita a fixação nas estruturas de suporte por meio de ligações comuns (travas ou parafusos, por exemplo). Módulos sem moldura requer formas alternativas de fixação, o que, via de regra, aumenta o custo de montagem. A falta de moldura pode dispensar o aterramento dos módulos.

5.2.2.4 Célula:

O tipo de célula, contato, cor, tamanho e disposição no módulo afetam não só a estética, mas a eficiência, custo e potência, como foi visto no segundo capítulo. Podem impactar no próprio uso dos fotovoltaicos, no caso de células transparentes.

5.2.3 – Estrutura de Suporte

As características relacionadas à estrutura de suporte do sistema fotovoltaico restringem-se às interfaces da tecnologia fotovoltaica com a estrutura de suporte e, dessa estrutura, com a estrutura da edificação (Figura V.6).

Figura V.6 – Subdivisão do atributo referente à Estrutura de Suporte do sistema fotovoltaico e seus desdobramentos.

Tem relação direta com outros atributos de projeto, como rendimento anual e estética. No caso do rendimento anual, destacam-se as relações com localização dos fotovoltaicos na envoltória, se estes estão fixos ou têm movimentação, o tipo de incorporação quanto à construtibilidade e quanto à área de aplicação destinada aos fotovoltaicos. Do ponto de vista estético, características relacionadas aos módulos são importantes, principalmente as com molduras e seus substratos, se são rígidos ou flexíveis.

A estrutura de suporte também se relaciona com atributos restritivos, uma vez que devem atender a atributos de segurança e estabilidade estrutural quando submetidas, por exemplo, a cargas de vento ou carregamentos próprios do uso, operação e manutenção, ergonomia - na relação do homem com a estrutura, economia, e atender às exigências das normas e leis vigentes.

Outros relacionamentos importantes ocorrem com os atributos da incorporação fotovoltaica ao Longo do Ciclo de Vida. Definição de fabricação, montagem, reciclabilidade e descarte, por exemplo, também devem ser levados em conta durante o projeto executivo final.

5.2.4 – Controle

Este atributo considera os componentes e elementos como fiação, eletrodutos, caixas de passagem, conexões elétricas, equipamentos, estação meteorológica, computadores para salvar dados de geração, inversores, incluindo as conexões e definições dos arranjos. Trata-se de um conjunto de componentes e elementos que permitem o controle do sistema fotovoltaico, incluindo a transmissão de sinais e a garantia de estabilidade do sistema.

As decisões do arquiteto influenciam o controle do sistema, uma vez que definem os espaços para alojamento dos eletrodutos e fiação, o dimensionamento dos espaços, os detalhes construtivos, o condicionamento climático e o acesso aos diversos ambientes e sistemas da edificação (cobertura, fachadas, área de instalação dos equipamentos), podendo influenciar positiva ou negativamente no desempenho desses controles.

Figura V.7–Atributo de controle e subdivisão em sinais, estabilidade dos sistemas, controle dos sistemas e os respectivos desdobramentos.

Sinais contempla as informações sobre produção, operação e comunicação, que dependem de itens como conduítes, fiação, caixas de passagem, formação de arranjos e assim por diante. É importante nesse caso atentar para a passagem desses elementos e sua relação com outros, como os estruturais, ou de proteção contra intempéries, como telhas e calhas. A correta especificação de conduítes para aumentar a proteção da fiação, garantindo proteção contra raios UV, por exemplo, também é importante.

Estabilidade do sistema reúne características relacionadas com a proteção do sistema. Nesse caso, equipamentos para proteção contra descargas atmosféricas, tanto na parte externa ao sistema, como para-raios, como sistemas de aterramento, que costumam ser integrados aos inversores, têm destaque e devem levar em conta as normas vigentes. Disjuntores, diodos de proteção e outros equipamentos de proteção da rede e dos módulos também pertencem a esse grupo de atributos.

Os principais equipamentos de controle do sistema são os inversores, que fornecem informações como geração de energia diária, ou em momentos determinados. A maioria dos inversores pode ser conectada a computadores, possibilitando o armazenamento dessas

informações e sua visualização. Alguns outros sistemas de controle podem ajudar o usuário na utilização do sistema de geração de energia, armazenando dados climáticos, índices de incidência de radiação, ajudando-o no monitoramento do sistema e na previsão de manutenções, como a limpeza dos módulos.

Atributos restritivos como segurança, confiabilidade e ergonomia, e outros relacionados com o ciclo de vida, como manutenção, são importantes e sua relação com os de controle deve ser balizada pelo arquiteto/projetista para que o sistema mantenha níveis satisfatórios de desempenho, salvaguardando montadores, operadores e usuários.

5.2.5 – Inovação

A utilização de fotovoltaicos em edificações é relativamente nova e, apesar de existirem muitos exemplos dessa incorporação ao redor do mundo, há diversas possibilidades de inovação. A rápida evolução da tecnologia fotovoltaica, por exemplo, pode abrir novos campos de exploração. O destaque ao atributo inovação se dá colocando-a nas fases preliminares do projeto, indicando que para que aconteça, a intenção de inovar tem de permear as primeiras discussões e problemáticas relativas à incorporação.

A utilização de fotovoltaicos em edificações é relativamente nova e, apesar de existirem muitos exemplos dessa incorporação ao redor do mundo, há diversas possibilidades de inovação. A rápida evolução da tecnologia fotovoltaica, por exemplo, pode abrir novos campos de exploração. O destaque ao atributo inovação nas fases preliminares do projeto indica que, para que aconteça, a intenção de inovar deve permear as primeiras discussões e problemáticas relativas à incorporação.

O desenvolvimento e aprimoramento das tecnologias de terceira geração prometem uma revolução no setor, inclusive com tintas fotovoltaicas. Outras linhas de pesquisa que procuram aprimorar o armazenamento da energia, com baterias mais duráveis e eficientes, podem ter impactos consideráveis sobre a utilização da tecnologia em lugares onde hoje são utilizados geradores, por exemplo. É importante, nesse sentido, que a arquitetura assuma seu papel de protagonista, contribuindo e empurrando o desenvolvimento de novas tecnologias ou no aprimoramento das existentes.

O atributo de inovação imprime na equipe de projeto uma perseguição ao conhecimento, não a deixando acomodar-se no que já conhece. Os processos de projeto e os aspectos gerenciais contam na experiência do projetista. Porém, há de se atentar também para o que está acontecendo ao redor do mundo em relação à Tecnologia, ao Material, às Formas, ao Software e à Comunicação, que estão e estarão em mudança e atualização constantes, o que pode alterar a dinâmica de projeto e os resultados da incorporação fotovoltaica, por exemplo.

5.3 - ATRIBUTOS RESTRITIVOS

Os atributos restritivos têm relação direta com os atributos de projeto. Como observado nos outros atributos, também a melhor consideração deste atributo ocorre em projetos integrados e multidisciplinares, dado que um só projetista terá dificuldades de dominar a

complexidade de todos os atributos. Como pode ser visto na Figura V.8, os atributos restritivos são: segurança, confiabilidade, ergonomia, economia, leis e normas.

Figura V.8– Atributos restritivos e suas subdivisões em: segurança, confiabilidade, ergonomia, economia, leis e normas.

5.3.1.1 Segurança:

Atributos relacionados à estabilidade e segurança estrutural dos sistemas de suporte dos módulos fotovoltaicos e à segurança contra incêndio são tratados por profissionais das respectivas áreas. Mas a segurança durante a montagem, instalação, uso, funcionamento e manutenção dos sistemas fotovoltaicos são atributos influenciados pelas decisões do arquiteto. Os atributos relacionados à segurança estão voltados, em primeira instância, à garantia da integridade física e da saúde dos usuários e também à salvaguarda do patrimônio físico, ou seja, da edificação e seus sistemas.

Por esse motivo, a preocupação com segurança deve permear todas as etapas dos projetos e é um dos atributos restritivos mais importantes. Um exemplo vivido durante a competição, que demonstra a influência do projeto sobre questões relacionadas à segurança, aconteceu durante o processo de montagem da cobertura. No caso da Ekó House, a proteção dos trabalhadores acontecia pelo uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI), como o cinto para trabalho em altura e um guarda-corpo posicionado no perímetro do Corpo da Residência, para minimizar ao máximo os riscos de cerca de 4 pessoas, que trabalhavam simultaneamente na cobertura.

No caso da Ekó House, EPIs como o cinto para trabalho em altura e um guarda-corpo posicionado no perímetro do Corpo da Residência, protegeram os quatro trabalhadores que trabalhavam simultaneamente na cobertura. A solução de uma das equipes alemãs foi diferente: partiu do princípio de que a forma mais segura para evitar quedas na cobertura é não subir na cobertura. Dessa forma, o projeto foi pensado para que minimizasse ou evitasse a subida de trabalhadores na cobertura, cuja estrutura era montada no chão e depois acoplada sobre o protótipo com a ajuda de um guindaste. Este exemplo deixa claro o impacto que medidas para aumentar a segurança têm sobre o projeto, se incorporadas nas fases iniciais.

5.3.1.2 Confiabilidade:

Visa minimizar falhas e aumentar a eficiência no uso e funcionamento do sistema fotovoltaico. O posicionamento e o dimensionamento dos ambientes onde são instalados os equipamentos e controles do sistema são atribuições do arquiteto e interferem na eficiência do sistema. Incorporar ao projeto arquitetônico recomendações dos fabricantes quanto ao espaçamento entre equipamentos, condições de ventilação, entre outros cuidados, evitam intercorrências que podem afetar negativamente o funcionamento do sistema (É importante conhecer a ficha técnica dos equipamentos utilizados no sistema fotovoltaico, a fim de aumentar sua confiabilidade).

Estratégias de resfriamento do módulo, como o afastamento do plano de geração da estrutura do edifício, e a preocupação em evitar o sombreamento, como já foi comentado, podem contribuir para a confiabilidade do sistema. Equipamentos de mercado e as tecnologias mais utilizadas, como de silício e filmes fino, tendem a ter maior robustez, garantias maiores e maior facilidade para encontrar mão-de-obra habilitada para instalação e manutenção, o que melhora a confiabilidade em comparação a outras ainda pouco utilizadas ou em estágio de teste.

5.3.1.3 Ergonomia:

Ergonomia trata das relações do usuário, operador e montador com o sistema fotovoltaico e edificação, a partir das características e limitações do Homem. Facilita o acesso para possíveis manutenções, limpeza e assim por diante. A relação homem / máquina influencia o projeto de sistemas fotovoltaicos de diversas formas, como, por exemplo, na escolha dos módulos e suas dimensões. Módulos muito grandes, mesmo que com peso menor que 30kg, podendo na teoria ser carregado por somente uma pessoa, traz dificuldades de movimentação, tanto no canteiro, quanto no seu posicionamento na cobertura.

Os acessos para montagem/desmontagem, operação e manutenção são os caminhos críticos mais importantes a serem observados em projetos quanto à ergonomia. É interessante, nesse sentido, manter um contato estreito com as equipes que farão esses trabalhos, a fim de entender os processos de trabalho e as ferramentas utilizadas. Se houver necessidade de furadeiras ou parafusadeiras elétricas, por exemplo, há de prever espaço para seu uso, o que terá reflexos sobre o detalhamento das peças.

5.3.1.4 Economia:

É um atributo importante que influi na decisão de utilizar ou não sistemas fotovoltaicos, e está vinculado aos custos de projeto, componentes, instalação, manutenção, licenças, financiamento, juros e amortização.

Em sistemas fotovoltaicos, quando o empreendimento é privado, a economia é um dos atributos mais preocupantes – se não o mais, dado que pode restringir o investimento do projeto fotovoltaico de muitas formas. Por isso, estratégias que melhorem o rendimento do sistema devem caminhar em benefício da economia, uma vez que podem extrair o melhor da tecnologia utilizada. Ter um sistema com módulos muito eficientes e um inversor pouco eficiente, ou instalado em local inadequado, por exemplo, prejudica a geração de energia.

Terá um custo elevado (módulos mais eficientes tendem a ser mais caros) para uma geração de energia menor.

Estratégias que visem aumentar o PR, que, como já foi observado, pode chegar a 96%, é um encaminhamento fundamental para os projetistas e pressupõe uma visão ampla do projeto. PRs ainda são considerados aceitáveis, se ficarem na faixa de 75% ou 80%.

5.3.1.5 Legal:

O atributo legal trata dos aspectos relacionados à legislação onde o projeto será implantado. Leis relacionadas ao uso, segurança, distribuição, comercialização, meio ambiente, entre outras, devem ser sempre consideradas. O desvio dos aspectos legais tem um efeito restritivo muito significativo, porque pode levar à inabilitação da edificação para o uso que foi projetado. Tais restrições, principalmente quando tem implicações na segurança e meio ambiente, são demandadas na última fase da edificação, por ocasião do habite-se. E nesse ponto do ciclo de vida da implantação do projeto, todo investimento financeiro já foi feito. Logo, os custos relativos a atraso ou impedimentos devido aos aspectos legais são altamente prejudiciais ao investimento.

5.3.1.6 Normas:

Normas referem-se aos procedimentos de cálculo, dimensionamento, instalação e montagem dos sistemas e a seus componentes, como segurança no uso e manutenção, acessibilidade etc. O atributo de normas está dentro do atributo legal. Tem, no entanto, uma abordagem mais específica por estar mais fortemente relacionada com os aspectos técnicos, tanto dos sistemas fotovoltaicos quanto da edificação.

5.4 - Atributo de Análise

O atributo de análise é composto pelo impacto ambiental, que pode ser desde a análise de emissões de GEE, até a inserção de forma transversal nos atributos de aplicação fotovoltaica ao longo do ciclo de vida, influenciando na análise de cada atividade em relação ao meio ambiente, passando pela produção, uso e descarte.

É um atributo de análise, por considerar que todas as ações do homem representam, em maior ou menor escala, um impacto no meio ambiente. Logo, cabe ao projetista analisar os fatores envolvidos em determinado ato de projeto, desde a produção do insumo, transporte, impacto social, econômico, enfim, todas as etapas que envolvem o ciclo de vida, pesando se o benefício será suficientemente bom, podendo em determinados casos restringir ou inviabilizar o projeto. Essa análise não é somente uma atribuição do arquiteto e requer, dependendo da escala do projeto, o envolvimento de especialistas da área.

Aspectos diversos podem fazer parte de um processo de análise, mesmo restrito ao contexto ambiental. Por exemplo: se a incorporação de sistemas fotovoltaico a edificações for uma política definida em uma comunidade, cidade ou região, o processo de análise relativo ao meio ambiente ganhará importância significativa, que vai desde a estética do espaço urbano onde as incorporações são feitas, até a preparação desse espaço para conviver com o descarte, ao final do ciclo de vida, resultante da incorporação desses sistemas técnicos.

5.5 - ATRIBUTOS DA APLICAÇÃO FOTOVOLTAICA AO LONGO DO CICLO DE VIDA

A análise do ciclo de vida, neste trabalho, aproxima-se mais do conceito usado no campo do design de objetos; não está necessariamente vinculado à análise do consumo de recursos, energia, água e à emissão de poluentes no ar, contaminação da água e do solo, o que deve ser feito na interação entre estes e o atributo de análise.

Os atributos da aplicação fotovoltaica ao longo do ciclo de vida seguem os apresentados por Fonseca (2000) e compreendem: fabricabilidade, montabilidade, embalabilidade, transportabilidade, armazenabilidade, da função, usabilidade, manutenibilidade, descartabilidade e reciclabilidade, conforme a Figura V.9.

Figura V.9– Atributos da incorporação fotovoltaica ao longo do ciclo de vida.

O entendimento do projeto, na perspectiva do ciclo de vida, influencia de diversas maneiras a aplicação dos fotovoltaicos em envoltórias de residências, principalmente, na etapa do projeto executivo final. Teoricamente, a incorporação em si não deveria ter impacto direto sobre o desempenho do sistema, dado que tudo já foi definido no projeto. Mas o processo de execução para a incorporação poderá prejudicar decisões de projeto, se as mesmas não forem feitas de acordo com o projeto. O *as built* nem sempre contempla o projetado e às vezes, por dificuldade de execução do que foi projetado, limitação de mão de obra ou ferramental inadequado, proporciona um desempenho do sistema menor do que o teoricamente estabelecido. Ainda impacta o *as built* o ciclo de vida do sistema fotovoltaico, a logística (armazenamento, transporte), o processo de produção (material utilizado, limpeza, controle de qualidade, embalagens) e o reaproveitamento ou descarte, o que pode influenciar o custo do sistema e o custo de reposição de componentes.

Fabricabilidade e Montabilidade, por estarem relacionados com o processo industrial, podem não ter muitas implicações, no projeto em si, para módulos fotovoltaicos comerciais;

contudo, a estrutura de sustentação é afetada, dado o inter-relacionamento com a estrutura arquitetônica. Esses detalhes podem impactar a forma como a estrutura é acoplada na envoltória do edifício. Abstrair, conhecer e considerar as necessidades demandadas pela fabricação, montagem e transporte, por exemplo, durante as fases iniciais do projeto, contribui para o sucesso da aplicação.

Atributos restritivos como os de segurança, manutenção, ergonomia e de análise, sob a ótica do impacto ambiental, devem ser levados em conta durante os processos de fabricação, funcionalidade, uso e descarte do sistema, como já foi pontuado anteriormente.

A reciclabilidade e a descartabilidade são atributos cada vez mais importantes no processo de projeto, inclusive com restrições relativas à legislação de cada cidade. Os módulos fotovoltaicos, como pontua Weller (2010), são quase totalmente recicláveis.

5.6 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO

Gerar energia é função primeira da aplicação dos fotovoltaicos, repercutindo sobre o desenho do edifício de diversas formas. À medida que o projeto atende, ou interage com outros elementos do edifício, como janela, cobertura ou outros atributos, como estética e proteção solar, o entendimento do projeto sob uma ótica mais abrangente é fundamental. Contudo, mesmo que a função seja somente gerar energia, esse ponto de vista amplo sobre o projeto pode contribuir para melhorar o desempenho como um todo, ou mesmo para facilitar os processos de fabricação, montagem e transporte, que acabam refletindo sobre o projeto de incorporação.

A intenção deste capítulo foi expor esse panorama abrangente e multidisciplinar que envolve a maioria dos projetos de um edifício. No caso dos fotovoltaicos, por se tratar da envoltória e da relação consumo vs geração, as implicações sobre outros atributos e sistemas dos edifícios é inevitável, o que pode dificultar a gestão do projeto pelo arquiteto. Quando a abordagem abrangente acontece nas fases iniciais do projeto, o impacto sobre sua qualidade, tendo em vista que responde a uma gama maior de atributos e requisitos, é ainda maior.

O estudo desenvolvido foi motivado pelo desafio de ampliar a função de uma edificação, como apresentado nos capítulos 1 e 4. Além de consumir energia, a edificação também deveria gerar energia, de preferência para o próprio uso e, se possível, distribuir o excedente. Nesse contexto, isso amplia de forma significativa o campo de conhecimento requerido para o projeto de uma edificação. Amplia conhecimento sobre os materiais, as funções, as tecnologias e os serviços requeridos para garantir o funcionamento ao longo do ciclo de vida.

A compreensão é de que há um significativo aumento no nível de complexidade, diversidade e profundidade de conhecimento para incorporar sistemas fotovoltaicos a edificações. Por isso, entende-se ser importante dispor de sistemáticas que organizem as ações de projeto, de forma a permitir um trabalho integrado, multidisciplinar e simultâneo. Foi este o foco imprimido no desenvolvimento deste capítulo e na definição e organização dos atributos. A expectativa é que este tipo de abordagem facilite o trabalho em equipe,

proporcione uma visão integrada e abrangente de cada um dos participantes e motive todos a caminharem para o mesmo objetivo: produzir e consumir a própria energia, com vista a uma melhor integração com o meio ambiente.

Além disso, assumindo o papel de protagonista no projeto de sistemas fotovoltaicos integrados a edifícios, o arquiteto pode tomar partido dessa tecnologia, melhorando a qualidade de edifícios e cidades, uma vez que o impacto da geração e uso da energia elétrica é sentido por todos.

VI. CAPÍTULO

CONCLUSÕES

Durante o processo de finalização deste trabalho, ficou claro que disseminar a utilização de fotovoltaicos está relacionada à nossa capacidade de inseri-lo no espaço construído. É atualmente a tecnologia de geração de energia que tem mais possibilidades de integração à envoltória do edifício e aos espaços das cidades, pelas diversas possibilidades de tamanho, transparência, coloração, flexibilidade, eficiência, aparência da célula, disposição da célula no módulo, aplicação sobre diferentes substratos e assim por diante, o que abre um enorme campo de possibilidades aos profissionais envolvidos com o tema.

Para aplicá-los em edifícios sob essa ótica, torna-se importante entender as diferentes esferas envolvidas nesse desafio, sejam elas no âmbito da região, do município, dos bairros, do poder público, dos edifícios, da sua relação com o entorno, dos diferentes sistemas que envolvem os edifícios e seus usuários (cidadãos). Embora o recorte seja importante, pois a complexidade dessa rede seria muito para um só trabalho, acredito que a visão global da discussão contribua para a propagação e qualidade dos projetos com fotovoltaicos incorporados à envoltória de edifícios.

Paralelamente a essas questões, a experiência prática de projetar, fabricar, montar, operar e desmontar uma casa de energia zero, em um período que compreendeu parte da graduação e o mestrado, foi um privilégio que despertou a vontade de apresentar este processo aos arquitetos, com uma linguagem mais próxima do nosso cotidiano, o mais visual possível, destacando o entendimento de que a incorporação de fotovoltaicos em edifícios é uma reflexão sobre as cidades e a forma como consumimos nossos recursos, mas também configura-se em um desafio criativo que deve instigar arquitetos e urbanistas.

Existe um campo grande de possibilidades arquitetônicas, construtivas e energéticas. Desta forma, é importante conhecer as tecnologias de geração disponíveis e mais comercializadas atualmente. No segundo capítulo foi apresentado um panorama das tecnologias fotovoltaicas, com o foco nas mais utilizadas em edifícios. Características como eficiência, desempenho com aumento de temperatura, com os diferentes tipos de radiação, com o sombreamento, outras como as possibilidades de cor, moldura, transparência, tipo de contato, de célula, foram abordados para que o arquiteto se inteire das possibilidades e restrições.

No terceiro capítulo, o cálculo aproximado para o rendimento energético foi uma maneira de expor a importância de determinados atributos para a geração de energia de um sistema fotovoltaico. Nele foi possível perceber, por exemplo, a relativa flexibilidade de inclinação e orientação dos planos de cobertura, mantendo níveis consideráveis de radiação incidente. As formas de incorporação da tecnologia fotovoltaica na envoltória dos edifícios, apresentada de forma gráfica, visual, procurou mostrar a pluralidade de possibilidades,

aproximando da linguagem comum aos arquitetos para acelerar a leitura, facilitar as discussões ao longo do processo de projeto e, consequentemente, a tomada de decisão. Esses projetos podem ter diferentes abordagens, refletindo de certa forma os requisitos do cliente, funcionando como ponto de partida para incorporação e influenciando os encaminhamentos seguintes.

O quarto capítulo serviu como transição entre o conhecimento da tecnologia e suas possibilidades e o modelo de projeto, apresentado no capítulo 5. Por meio do processo de projeto, discussões e reflexões sobre suas diferentes fases, desde a montagem da casa no Brasil até a desmontagem na Espanha, ao final da competição, deu-se a síntese e a compreensão da importância de um envolvimento que vá além da tecnologia, procurando entender processos referentes à produção, à segurança, à manutenção, ao funcionamento, ao domínio dos dados de geração e funcionamento pelo usuário, da interação com outras estratégias e sistemas da residência, entre outros.

O capítulo 5 procurou sistematizar essas informações, na fusão do conhecimento já difundido sobre as tecnologias fotovoltaicas, presente na bibliografia, e o prático, vivenciado na troca com os diferentes profissionais, nos erros e acertos cometidos na operação da casa em Madri, nas conversas com os membros de outras equipes. O modelo apresentado procurou refletir os atributos envolvidos, sem direcionar decisões, entendendo que as peças fundamentais são os projetistas envolvidos. Na tomada de decisão, portanto, devem ser pesadas as peculiaridades e diferenças intrínsecas em projetos de arquitetura, com suas diferentes localizações, usos, contexto urbano, meio de produção, disponibilidade financeira e assim por diante. O modelo servirá como um mapa de possibilidades, que pretende clarear aos projetistas as inter-relações entre as diferentes fases de projeto e o reflexo de determinada decisão sobre outros atributos, focando na parte conceitual sobre a envoltória, que norteará os processos subsequentes.

Durante o desenvolvimento do projeto, do final de 2008 até o início deste ano (2014), ficou claro que dificilmente haverá uma fórmula perfeita, que abarque as problemáticas de cada projeto. Sendo assim, a preocupação foi deixar um campo de possibilidades em aberto. Novas tecnologias de geração e armazenamento da energia estão em desenvolvimento e outras virão, manuais tendem a ficar obsoletos neste universo. Todavia, o que costura as necessidades presentes e as evoluções futuras é o interesse das tecnologias em servir e melhorar a vida do homem. Vida que está ligada ao nosso desenvolvimento coletivo, às cidades e à nossa capacidade de transformar e utilizar ao máximo os recursos disponíveis.

Este exercício coletivo não foi fácil. A multidisciplinariedade é trabalhosa, gerir interesses e comprometimentos distintos é um processo que demanda paciência e compreensão, o que nem sempre é simples quando os resultados têm de ser apresentados. Com a Ekó House não foi diferente e, ao longo do caminho, muitas discussões foram travadas. Contudo, o resultado só pode ser apresentado pelo trabalho coletivo, como fruto de um interesse comum e de pessoas que se comprometeram e acreditaram na proposta.

Dentro deste universo e de uma gestão compartilhada entre duas universidades, a UFSC e a USP, foi construída a primeira participação de uma equipe do hemisfério sul no evento Solar Decathlon Europe. Os resultados apresentados durante a competição, cuja participação é o maior prêmio, são apenas a ponta do *iceberg*. Os trabalhos, entre mestrado e doutorado, já apresentados na UFSC, relacionados à eficiência energética, automação, fotovoltaicos e comunicação e os feitos na USP, com temas como sistemas de aquecimento de água, segurança, produção digital, estrutura de madeira, redução de GEE, o exposto neste trabalho, além do impacto sobre todos os participantes do projeto, é o resultado mais importante e significativo desta experiência rica e bem sucedida. Esperamos que, com a apresentação dos trabalhos e resultados, mais experiências como esta possam acontecer, a fim de alcançar uma gama maior de pessoas.

6.1- SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do trabalho apresentado observaram-se possibilidades para trabalhos futuros, que poderiam enriquecer ainda mais as discussões a respeito do tema:

- Trabalhos que se debruçassem sobre os outros atributos apontados neste trabalho, não aprofundados da mesma forma que os atributos de projeto, como os atributos restritivos, atributos de análise e atributos da incorporação fotovoltaica ao longo do ciclo de vida.

- A partir deste aprofundamento a relação entre os atributos, por meio da espiral do desenvolvimento, pode ficar mais clara. Um trabalho que aprofunde a relação entre os atributos, facilitaria, ainda mais, a leitura do projeto e seus encaminhamentos.

VII. BIBLIOGRAFIA

ALCOA. CATÁLOGO DE PERFIS STANDARD, **Perfis Extrudados de Alumínio**. 2013. 55p. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/45682621/Catalogo-Standard-Extrudados-ALCOA>. Acesso em: 24 fev. de 2014.

ALMEIDA, Marcelo Pinho. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. 2012. 171p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo. São Paulo, p.41,50,70,71, 2012.

ANTONIO, F.; OLIVEIRA, C.T.A.; UDAETA, E.M.; ANDRADE, E.M. Energetic and environmental analysis of a solar-house contribution to the sustainable development - greenhouse gases emission reduction. EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION, 28th, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2008a. 52p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR15575-5**: edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho - Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas. Rio de Janeiro, 2008b. 53p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR15329**: Ligas de alumínio para uso estrutural na arquitetura e na construção civil – Especificação. Rio de Janeiro, 2006. 6p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM87**: Aços carbono e ligados para construção mecânica - Designação e composição química. Rio de Janeiro, 2000. 19p.

BARATELLA, Paula Roberta de Moraes. **Análise do desenvolvimento de indicadores para a avaliação de sustentabilidade de edifícios brasileiros**. Campinas (SP), 2011. 218f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Construção) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas (SP), 2011.

BENEDITO, Ricardo da Silva. **Caracterização da geração distribuída de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnicos, econômicos e regulatórios**. São Paulo, 2009. Dissertação (Mestrado em Energia) – Escola Politécnica, Faculdade de Economia e Administração, Instituto de Eletrotécnica e Energia e Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, p.15-75, 2009.

BRASIL, Medida provisória nº 579, de 11 de setembro de 2012. Dispõe sobre as concessões de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, sobre a redução dos encargos setoriais, sobre a modicidade tarifária, e dá outras providências. **Diário Oficial [da]**

República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 11 set. 2012a. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-014/2012/mpv/579.htm>. Acesso em: 30 nov. 2012.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Balanço Energético Nacional 2013**: Ano base 2012. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2013. 284p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Balanço Energético Nacional 2012 – Ano base 2011: Síntese do Relatório Final**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2012b. Disponível em: http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/2 - BEN - Ano Base/12 -Sxntese do Relatxrio Final BEN_2012.pdf. Acesso em: 14 nov. 2012.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Nota Técnica Empresa de Pesquisa Energética: Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro: EPE, p. 17, 2012c.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Plano decenal de expansão de energia 2008/2017**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2009. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PDEE/20091119_1.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME), Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2020**. Brasília: EPE, 2011a.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior: Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial-INMETRO. Portaria n. 004, de 04 de janeiro de 2011b. Disponível em: <<http://lsf.iece.usp.br/lsf/index.php/ensaios-para-o-inmetro>>. Acesso em 24 de fevereiro de 2014.

BUNDESMINISRERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU). **Renewable energies: Electricity from renewable energy sources. What does it cost us?** Berlin, Alemanha, 2009.

CHIVELET, Nuria Martín; SOLLA, Ignacio Fernández. **Técnicas de vedação fotovoltaica na arquitetura**. Porto Alegre: Bookman, 2010.

CINCINELLI, Lorenzo; MOSA, Walter; PIAZZESI, Mauro. Panel maximizer and microinverter: performances optimization and addition features for maintenance purpose. *In*: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION, 26th, 2011. p.3690-3693.

CRESESB – Centro de Referência para Energia solar e Eólica Sergio de Salvo Brito/CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **SunData**. - p. 17 cap. 3. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/sundata/>>. Acesso em: 24 fev. 2014.

CVM – COMISSÃO DE VALORES MOBILIÁRIOS. Prospecto preliminar de oferta pública primária de certificados de depósito de ações (“units”) de emissão da Alupar. São Paulo,

2007. Disponível em: <http://www.cvm.gov.br/dados/ofeanal/RJ-2007-14165/20080808_PROSPECTO_PRELIMINAR.PDF.pdf>. Acesso em: 4 agosto 2010.

DÁVI, Giovani Almeida. Avaliação do comportamento energético de um edifício residencial à energia neto positiva com sistema solar fotovoltaico conectado à rede (SFVCR). Florianópolis, 2013. 174f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

DIRECTINDUSTRY: the online industrial exhibition, 2014. Disponível em: <<http://www.directindustry.com/prod/duPont-apollo/dual-layer-microcrystalline-amorphous-silicon-solar-panels-99483-900528.html>>. Acesso em: 27 jan. 2014.

EGLER, Matthias. Impact of global irradiation data with different characteristics on the performance ratio and the expected energy output of photovoltaic power stations. *In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION*, 27th, 2012. p. 4500- 4504.

ENERGIA Fotovoltaica. Manual sobre tecnologias, projecto e instalação. Jan/2004. 368p. Disponível em: < <http://paginas.fe.up.pt/~ee03097/ficheiros/manual-fotovoltaico.pdf>>. Acesso em: 24 fev. 2014.

ERTEX-SOLAR VSG - **Design_Celulas Coloridas**. 2013. Disponível em: <www.ertex-solar.at/pdf>. Acesso em: 24 fev. 2014.

FARKAS, K. *et al.* **T.41.A.2: Solar Energy Systems in Architecture: Integration Criteria and Guidelines**. Solar Heating and Cooling Programme, International Energy Agency, Task 41 Solar energy & architecture. September 2012. 228p. Disponível em: <<http://task41.iea-shc.org/publications>>. Acesso em: 24 fev. 2014.

FEIRESS L., **Building up responsibility in critical times**. Architecture of Change 2, Die Gestalten Verlag, Berlin (DE), 2008.

FINIS, Gernot; PLATTMANN, Carsten; SIEKER, Torsten. Safety and performance related design of string connection boxes for photovoltaic systems. *In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION*, 27th, 2012. p. 3652-3654.

FIRST Solar, **First Solar Series 3 Black Module**, 2014. Disponível em: <<http://www.firstsolar.com/en/Technologies-Capabilities/PVModules/Series-3-Black>>. Acesso em: 27 jan. 2014.

FONSECA, A.J.H. **Sistematização do processo de obtenção das especificações de projeto de produtos industriais e sua implementação computacional**. Florianópolis, 2000. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

GALERIA de SDEurope. Solar DecathlonEurope 2012 / I+D+Art. Fliker do Yahoo, Yahoo, 2012. Disponível em: <<http://www.flickr.com/photos/sdeurope/sets/>>. Acesso em: 29 nov. 2012.

GLOBO, economia. Globo comunicação e participação S.A., 2012. Disponível em: <<http://g1.globo.com/economia/noticia/2012/09/preco-da-energia-para-o-consumidor-vai-cair-162-em-2013-anuncia-dilma.html>>. Acesso em: 30 nov. 2012.

GMBH, Heindl Server. Solar Server, online Portal to Solar Energy, 2010. Disponível em: <http://www.solarserver.com/solarmagazin/solar-report_0708_e.html>. Acesso em: 27 jan. 2014.

GNOATTO, Estor *et al.* Performance of panel fotovoltaico in an isolated system. *In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL*, 5, 2004, Campinas. **Anais online**. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000100043&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 25 nov. 2012.

IABSP - Instituto de Arquitetos do Brasil Departamento São Paulo, 2013. Disponível em: <http://iabsp.org.br/index.php/arquitetura-e-cidade/>. Acesso em 27 de jan. 2014.

IEA – International Energy Agency. Photovoltaic Power Systems Programme. **Annual Report**. China, November, 2012. 118p.

IEA – International Energy Agency. SHC. **Photovoltaics in buildings: A design handbook for architects and engineers**. Task16-photovoltaics_in_buildings. 2003. p.71-166.

IEA – International Energy Agency. SHC. T.41.B.3. **Solar design of buildings for architects**: Review of solar design tools Subtask B: Methods and Tools for Solar Design. 2012. 117p.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA tudo o que acontece na fronteira do conhecimento, 2012. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=celula-solar-organica-recarregar-bateria-sem-sol&id=010115121029>>. Acesso em: 30 nov. 2012.

LABORATÓRIO de energia Solar. GESTE-PROMEC. **Desenvolvimento de Softwares – SOLARCAD**. Escola de Engenharia da UFRGS, Porto Alegre. Cap. 3. Disponível em: <<http://www.solar.ufrgs.br/#softwares>>. Acesso em: 24 fev. 2014.

LAMBERTS, Roberto *et al.* **Casa eficiente: consumo e geração de energia**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010. v.2, 78 p.

LELOUX, Jonathan; NARVARTE, Luis; TREBOSC, David. Performance analysis of 10,000 residential PV systems in France and Belgium. *In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION*, 26th, 2011. p.3939-3946.

LIMA, Bruno; WILMER Fontes. **Geração distribuída aplicada a edificações: edifícios de energia zero e o caso do laboratório de ensino da FEC-Unicamp**. Campinas (SP), 2012. 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica, Planejamento de Sistemas

Energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica.. Universidade Estadual de Campinas. 2012.

LUND, H. *et al.* **Solar Cells**, 2008. Disponível em: <<http://org.ntnu.no/solarcells/pages/generations.php>>. Acesso em 27 jan. 2014.

MATURI, L. *et al.* BiPV FAÇADE SYSTEMS: Effectiveness of a passive strategy to improve the PV performance. *In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION*, 27th, 2012. p.4204-4206.

MCDONALD, Alan. Nuclear power and sustainable development. international atomic energy agency. **Information Series Division of Public Information** 02-01574 / FS Series 3/01/E/Rev.1 Wagramer Strasse 5, P.O. Box 100 A-1400 Vienna, Austria. 4p.

MESSINGER, Roger A.; VENTRE, Jerry. **Photovoltaic systems engeneering**. 2.ed. Florida: CRC Press, 2004.

MOREIRA, Daniel de Carvalho. **Os princípios da síntese da forma e a análise de projetos arquitetônicos**. Campinas (SP), 2007. 375f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil, Arquitetura e Construção) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2007.

MUNRO, D. Lessons learnt from photovoltaics in urban areas. *In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION*, 23th, Valencia, Spain. September 2008. p. 3743-3748.

NEVES, Letícia de Oliveira. **Chaminé solar como elemento indutor de ventilação natural em edificações**. Campinas (SP) 2012. 158f. Tese (Doutorado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2012.

NITROMIDIA. Kyocera Solar do Brasil, Módulos Solares, 2012. Disponível em: <<http://www.kyocerasolar.com.br/modulos-solares.html>>. Acesso em: 27 jan. 2014.

ODOOPROJECT, 2012. Passive Energy Efficiency. Designed by Hidden Characters coded by Gábor Németh. Disponível em <http://www.odooproject.com/en/house/>. Acesso em 25 fev. 2014.

ORTIZ, Lúcia Schild (Org.). **Fontes alternativas de energia e eficiência energética**: opção para uma política energética sustentável no Brasil. Campo Grande: Fundação Heirich Boll/Coalizão Rios Vivos, 2002.

PALZ, Wolfgang. **Energia solar e fontes alternativas**. Curitiba: Hemus, 2002.

PANASONIC Corporation of North America. **Eco Construction Solution**: HIT Power Series, 2013. Disponível em: <<http://www.panasonic.com/business/pesna/eco-construction-solutions/products/solar/hit-power-s-series.aspx>>. Acesso em: 27 jan. 2014.

PEREIRA, Enio Bueno *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. il. 60p.

PISTOCHINI, Patrizia *et al.* Knowledge, skill and competence in PV installations. *In*: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE, 24th. Hamburg, Germany. September 2009. p. 4546-4552.

POLIÃO, Marco Vitruvius. **Da arquitetura**. Trad.: Marco Aurélio Lagonegro. São Paulo: Hucitec/Annablume, 2002.

RENEWBL: Renewable Energy News. **Sanyo starting up a new HIT solar cel production line**, 2009. Disponível em: <<http://www.renewbl.com/2009/06/23/sanyo-starting-up-a-new-hit-solar-cell-production-line.html>>. Acesso em: 26 jan. 2014.

RIXINSOLAR, **BIPV Glass: High transparent amorphous silicon BIPV module**. 2014. Disponível em: <http://rixinsolarpanel.com/details_p.asp?id=18&cid=356>. Acesso em: 27 jan. 2014.

ROGERS, Richard; GUMUCHDJIAN, Philip. **Cidades para um pequeno planeta**. Barcelona: Gustavo Gili, 2008.

ROGNER, Hans-Holger; KHAN, Arshad. Comparing energy options: the inter-agency decades project. **International Atomic Energy Agency Bulletin**, 1998. 5p.

RUTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos: O potencial da geração solar fotovoltaica interligada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: LABSOLAR, 2004. p.11.

RUTHER, Ricardo. **Potencial da energia solar fotovoltaica no Brasil e projetos- vitrine: estádios solares e aeroportos solares**. Palestra apresentada na Comissão de Meio Ambiente do Senado, 2010. Disponível em: <http://www.senado.gov.br/comissoes/cma/ap/AP20100316_UFSC_Ruther.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2012.

SANTOS, Ísis Portolan dos. **Desenvolvimento de ferramenta de apoio à decisão em projetos de integração solar fotovoltaica à Arquitetura**. Florianópolis, 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

SCOGNAMIGLIO, A. *et al.* Forms of energy: the way architects envision solar energy. EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION, 26th, 2011. p.3958-3966.

SCOGNAMIGLIO, A., RØSTVIK, H. N. Photovoltaics and nearly zero energy buildings: a new opportunity and challenge for architecture. *In*: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION, 27th, 2012. p.3848- 3858.

SELLERINK: a cor está em nosso DNA. Wordpress Lighword Theme by Andrei Luca, 2012. Disponível em: <<http://sellerink.com.br/blog/tag/isaac-newton/>> Acesso em: 30 nov. 2012.

SOLAR Decathlon Europe. **What is SDE?** 2014. Disponível em: <<http://www.sdeurope.org/about/?lang=en>>. Acesso em: 24 fev. 2014.

SOLAR Decathlon Europe. **Rules. V.4.0.** Espanha: March 2012. 147p

SOLARFEEDS, News Network, 2014. Disponível em: <<http://www.solarfeeds.com/tag/nanosolar/>>. Acesso em: 27 jan. 2014.

SOLIKER, **Vidro laminado fotovoltaico**, 2011. Disponível em: <<http://www.soliker.com/vidrio-laminado-laminated-glass.html>>. Acesso em: 26 jan. 2014.

SUNWAYS AG, Photovoltaic Technology. Solar Cells. **Transparent Design Cells Multi 156**, 2012. Disponível em <http://www.sunways.eu/static/sites/default/downloads/en/products/solar-cells/transparent/Datenblatt_Multi_156_TAB_1112_EN.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2014.

SUPSI/ISAAC: **Building Integrated Photovoltaics**. Scola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, 2013a. Disponível em: <<http://www.bipv.ch/index.php/en/>>. Acesso em: 26 jan. 2014.

SUPSI/ISAAC: **Building Integrated Photovoltaics**. Scola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, 2013b. Disponível em: <<http://www.bipv.ch/index.php/en/requirements/ventilation>>. Acesso em: 26 jan. 2014.

SUPSI/ISAAC: **Building Integrated Photovoltaics**. Scola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, 2013c. Disponível em: <<http://www.bipv.ch/index.php/en/visual-aspects>>. Acesso em: 26 jan. 2014.

SUPSI/ISAAC: **Building Integrated Photovoltaics**. Scola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, 2013d. Disponível em: <<http://www.bipv.ch/index.php/en/requirements>>. Acesso em: 26 jan. 2014.

SUPSI/ISAAC: **Building Integrated Photovoltaics**. Scola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, 2013e. Disponível em: <<http://www.bipv.ch/index.php/en/visual-aspects/patterns-dimensions-and-grids>>. Acesso em: 26 jan. 2014.

SUPSI/ISAAC: **Building Integrated Photovoltaics**. Scola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, 2013f. Disponível em: <<http://www.bipv.ch/index.php/en/visual-aspects/cells-color>>. Acesso em: 26 jan. 2014.

SUPSI/ISAAC: **Building Integrated Photovoltaics**. Scola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, 2013g. Disponível em: <<http://www.bipv.ch/index.php/en/visual-aspects/background-color>>. Acesso em: 26 jan. 2014.

TEAM BRASIL. Project Drawings (PD) – relatório interno. São Paulo: Projeto Ekó House, 2012a. Disponível em: <<http://www.sdeurope.org/downloads/sde2012/?lang=en>>. Acesso em: 24 fev. 2014.

TEAM BRASIL. Project Manual (PM) – relatório interno. São Paulo: Projeto Ekó House, 2012b. Disponível em: <<http://www.sdeurope.org/downloads/sde2012/?lang=en>>. Acesso em: 24 fev. 2014.

WELLER, Bernhard *et al.* **Photovoltaics:** Technology, Architecture, Installation. Munich: edition DETAIL, p. 8,11,12,15,16,22,26,27, 2010.

ZEDFACTORY and HiminZED. ZedRoof, 2011. Disponível em: <<http://www.zedfactory.com/zed/?q=node/150>>. Acesso em: 27 jan. 2014.

Apêndice A

Exemplo III capítulo

O projeto de um sistema fotovoltaico para uma residência situada na cidade de São Paulo (lat. 23,5) pretende instalar 10kWp, utilizando módulos monocristalinos com uma eficiência de 18%. Para definição do projeto básico, recomenda-se obter o rendimento energético anual, a área necessária e local de implantação para este sistema em três cenários:

Cenário 1: só com módulos na cobertura;

Cenário 2: só com módulos nas fachadas e

Cenário 3: com módulos na cobertura e fachada:

Da Tabela III.1 obtém-se a Irradiação Global é de 5,067 kWh/m²d. Considera-se a incorporação com boa ventilação na parte posterior dos módulos (no mínimo 15cm) e que o sistema tenha um desempenho geral de 80%.

Utilizando a Equação-III.2 obtém-se a área necessária, que neste caso será de aproximadamente:

$$A [m^2] = P_{FV} [kWp] / \text{Eff} \Rightarrow A = 10 [kWp] / 0,18 \Rightarrow A = 55,55m^2$$

Cenário 1: Buscando o maior rendimento energético, a cobertura pode ser inclinada entre 5° e 30°, com orientação entre 45° Leste ou Oeste para fatores de orientação máximos (95%), como visto na Secção 3.2.1. Da Equação III.3 obtém-se o rendimento energético:

$$\text{Rendimento Energético (RE)} = 5,067 \text{ kWh/m}^2\text{d} \cdot 0,95 \cdot 55,55m^2 \cdot 0,18 \cdot 0,8$$

$$\text{RE} = 38,50 \text{ kWh.d}$$

Cenário 2: aplicando os módulos somente nas fachadas, deve-se, como visto anteriormente nas Figura III.12 e Figura III.13, priorizar as direções do quadrante Norte com desvios azimutais entre 50° Leste / Oeste, para potencial máximo de 50%. Então, aplicando na Equação III.3:

$$\text{RE} = 5,067 \text{ kWh/m}^2\text{d} \cdot 0,50 \cdot 55,55m^2 \cdot 0,18 \cdot 0,8$$

$$\text{RE} = 20,27 \text{ kWh.d}$$

O resultado a aplicação no Cenário 2 é 18,23 kWh.d menor que no Cenário 1, com a orientação mais favorável. Mas qual a área de módulos necessário na fachada para gerar 38,50 kWh.d, igual a melhor orientação? Para responder a questão, utilizou-se a eq. III.3:

$$38,50 \text{ kWh.d} = 5,067 \text{ kWh/m}^2\text{d} \cdot 0,50 \cdot A \cdot 0,18 \cdot 0,8$$

$$A = 38,50 \text{ kWh.d} / 0,37 \text{ kWh/m}^2\text{d}$$

$$A = 104,05\text{m}^2$$

É necessário quase o dobro da área utilizada na melhor orientação da cobertura (Cenário 1), para que a melhor orientação da fachada (Cenário 2) gere o mesmo Rendimento Energético. Este resultado já era esperado, tendo em vista que o fator orientação das fachadas é praticamente a metade do da cobertura.

Cenário 3: Supondo que houvesse uma limitação na aplicação dos módulos na melhor orientação da cobertura, com espaço para instalação de apenas 40m². Qual a área necessária na fachada para complementar o rendimento de 38,50 kWh.d?

Seguindo os mesmos procedimentos e equações, obtém-se:

$$RE \text{ (melhor orientação)} = 5,067 \text{ kWh/m}^2\text{d} \cdot 0,95 \cdot 40\text{m}^2 \cdot 0,18 \cdot 0,8$$

$$RE \text{ (melhor orientação)} = 27,73 \text{ kWh.d}$$

$$RE \text{ (fachada)} = RE \text{ (esperado)} - RE \text{ (melhor orientação)}$$

$$RE \text{ (fachada)} = 38,50 \text{ kWh.d} - 27,73 \text{ kWh.d}$$

$$RE \text{ (fachada)} = 10,77 \text{ kWh.d}$$

Área de fotovoltaicos necessária na melhor orientação da fachada:

$$10,77 \text{ kWh.d} = 5,067 \text{ kWh/m}^2\text{d} \cdot 0,50 \cdot A(\text{fachada}) \cdot 0,18 \cdot 0,8$$

$$A(\text{fachada}) = 29,5\text{m}^2$$