

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS**

CARLA TORTELLI

**O EFEITO DO SOMBREAMENTO NA EFICIÊNCIA DO SISTEMA
FOTOVOLTAICO DO ESCRITÓRIO VERDE DA UTFPR**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

**CURITIBA
2016**

CARLA TORTELLI

**O EFEITO DO SOMBREAMENTO NA EFICIÊNCIA DO SISTEMA
FOTOVOLTAICO DO ESCRITÓRIO VERDE DA UTFPR**

Monografia apresentada para obtenção do título de Especialista no Curso de Pós-Graduação em Construções Sustentáveis, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR.
Orientador: Prof. Dr. Jair Urbanetz Jr.

**CURITIBA
2016**

CARLA TORTELLI

O EFEITO DO SOMBREAMENTO NA EFICIÊNCIA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO DO ESCRITÓRIO VERDE DA UTFPR

Monografia aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Construções Sustentáveis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, pela comissão formada pelos professores:

Orientador:

Prof. Dr. Jair Urbanetz Júnior
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, UTFPR – Câmpus Curitiba.

Banca:

Prof. Dr. Arthur Medeiros
Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR – Câmpus Curitiba.

Prof. Dra. Celimar Azambuja Teixeira
Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR – Câmpus Curitiba.

Curitiba
2016

“O termo de aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso”

RESUMO

Este trabalho aborda a temática do sombreamento sobre sistemas fotovoltaicos. O Brasil possui grande índice da radiação solar em seu território, por isso o uso da energia fotovoltaica tem grande potencial de se tornar uma fonte importante na matriz energética brasileira. Sistemas geradores de energia podem ser instalados no topo de casa e edifícios, formando sistemas descentralizados de energia, nos quais a energia é produzida perto de onde é consumida, evitando o desperdício nas etapas de transmissão e distribuição. Porém, quando esses sistemas fotovoltaicos estão integrados em coberturas ou fachadas de edificações inseridas em meios urbanos adensados, eles tendem a receber sombreamentos parciais de seu entorno, o que é bastante prejudicial para o seu desempenho de geração de energia. Um projeto para um sistema FV, quando projetado junto ao edifício desde o início, por um arquiteto e uma equipe multidisciplinar, deve possuir uma análise aprofundada das condicionantes do local onde o mesmo será instalado para evitar possíveis prejuízos ao sistema e ainda agregar beleza à sua funcionalidade. O presente trabalho traz um estudo sobre o sombreamento do sistema fotovoltaico conectado à rede do Escritório Verde da UTFPR e quais são suas consequências no rendimento da produção energética do sistema. Para se chegar ao resultado, foi feita uma maquete 3D da edificação e seu entorno no *software* Sketchup, junto com análises do *software* RADIASOL e leituras do inversor instalado no sistema existente.

Palavras-chave: arquitetura, construções sustentáveis, painéis fotovoltaicos, sombreamento.

ABSTRACT

This study addresses the issue of shading on photovoltaic systems. Brazil has great content of solar radiation in its territory, so the use of photovoltaic energy has great potential to become an important source in the Brazilian energy matrix. Photovoltaic systems can be installed on top of houses and buildings, forming decentralized energy systems, in which energy is produced close to where it is consumed, avoiding waste in the stages of transmission and distribution. But when these photovoltaic systems are integrated into roofs or facades of buildings placed in dense urban areas, they tend to receive partial shading of its surroundings, which is quite detrimental to its power generation performance. A project for a PV system, when designed with the building from the start by an architect and a multidisciplinary team should have a deep analysis of local conditions where it will be installed to prevent possible losses to the system, and also add beauty to its functionality. This paper presents a study on the shading on the grid connected photovoltaic system of Escritório Verde of UTFPR, and what are its consequences on the yield of energy production system. To get the result, a 3D model was made of the building and its surroundings in Sketchup software, along with analyzes of RADIASOL software and readings of the inverter installed in the existing system.

Key-words: architecture, sustainable constructions, photovoltaic panels, shading.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Escritório Verde - Objeto de estudo	15
Figura 2: Componentes da radiação solar global.....	17
Figura 3: Mapa da média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro.	18
Figura 4: Esquema dos componentes de encapsulamento de um módulo FV com células de silício cristalino.	20
Figura 5: Tipos de aplicações de Sistemas FV	21
Figura 6: Diagrama simplificado de um SFI domiciliar	22
Figura 7: Diagrama simplificado de um SFVCR	23
Figura 8: Exemplo de BAPV – Fachada fotovoltaica aplicada do edifício MNACTEC (Tarrasa, Espanha).	25
Figura 9: Exemplo de BIPV - Sede da NeoSolar, Taiwan. Projeto de J.J. Pan & Partners (2009).	26
Figura 10: Sombreamento de uma célula FV dentro de um módulo FV.	28
Figura 11: Esquema do funcionamento do diodo de <i>by-pass</i>	28
Figura 12: Formas de disposição de módulos FV em um arranjo	29
Figura 13: Imagens dos tipos de sombreamento.	31
Figura 14: Estádio de Kaohsiung, Taiwan.	33
Figura 15: Arquiteto como coordenador de uma equipe multidisciplinar.	34
Figura 16: Imagens do Escritório Verde - Vista aérea (esq.) e vista frontal (dir.).	35
Figura 17: Instalação do SFVCR no telhado do Escritório Verde	36
Figura 18: Implantação Escritório Verde.....	37
Figura 19: Procedimentos para estudo do sombreamento parcial a partir do software Sketchup.	38
Figura 20: Sombreamento gradual sobre módulo do SFVCR do EV.....	40
Figura 21: Arranjo do SFVCR sombreado parcialmente.....	40
Figura 22: Sombreamento no telhado do EV - Equinócio de Outono.....	41
Figura 23: Sombreamento no telhado do EV - Solstício de Inverno.....	42
Figura 24: Sombreamento no telhado do EV - Equinócio de Primavera	42
Figura 25: Sombreamento no telhado do EV - Solstício de Verão.	43
Figura 26: Foto do SFVCR do Escritório Verde tirada em 27/10/2016.	44
Figura 27: Diagrama de sombreamento para o dia 27/10/2016.....	44

Figura 28: Gráfico de horários de irradiação solar e sombreamento.....	45
Figura 29: Gráfico quantidade de horas de sol / sombreamento	46
Figura 30: Procedimentos para obtenção dos valores de radiação perdida	47
Figura 31: Leitura do inversor para potência produzida pelo SFVCR do EV para o dia 21/05/2016.....	50
Figura 32: Leitura do inversor para potência produzida pelo SFVCR do EV para o dia 21/06/2016.....	50
Figura 33: Leitura do inversor para potência produzida pelo SFVCR do EV para o dia 21/07/2016.....	51
Figura 34: Leitura do inversor para potência produzida pelo SFVCR do EV para o dia 21/08/2016.....	51
Figura 35: Leitura do inversor para potência produzida pelo SFVCR do EV para o dia 21/09/2016.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Potencial para fontes de energia renováveis	11
Tabela 2: Radiação direta perdida durante período de sombreamento do SFVCR do EV	48
Tabela 3: Performance Ratio - SFVCR do EV	49

LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica;
BAPV	<i>Building Applied Photovoltaics</i> ;
BIPV	<i>Building Integrated Photovoltaics</i> ;
EPE	Empresa de Pesquisa Energética;
EV	Escritório Verde;
FV	Fotovoltaico;
GD	Geração Distribuída;
PR	<i>Performance Ratio</i> ;
SFI	Sistema Fotovoltaico Isolado;
SFV	Sistema Fotovoltaico;
SFVCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede;
T & D	Transmissão e Distribuição;
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA DO ESTUDO	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
1.3	DELIMITAÇÃO DO TEMA	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	RADIAÇÃO SOLAR	16
2.1.1	Energia Solar Fotovoltaica	19
2.1.2	Tecnologias de células fotovoltaicas	19
2.1.3	Sistemas fotovoltaicos	20
2.2	SISTEMAS FV INTEGRADOS E APLICADOS A EDIFICAÇÕES EM CENTROS URBANOS	23
2.2.1	O efeito do sombreamento em sistemas Fotovoltaicos.....	27
2.2.2	Tipos de sombreamento	30
2.3	O PAPEL DA ARQUITETURA NA APLICAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS A EDIFICAÇÕES	32
3	METODOLOGIA	35
3.1	ANÁLISE DA RADIAÇÃO SOLAR NO EDIFÍCIO EM ESTUDO	38
3.1.1	Modelo 3D através do <i>software</i> Sketchup	38
3.1.2	Análise de dados no <i>software</i> RADIASOL	46
3.2	ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SISTEMA EXISTENTE	48
3.2.1	Análise da taxa de desempenho (<i>Performance Ratio – PR</i>).....	49
3.2.2	Análise de dados de geração de energia FV	49
4	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda de energia elétrica para suprir as necessidades de um mundo cada vez mais tecnológico impulsiona a encontrar novas fontes de matrizes energéticas. E com uma preocupação com as questões ambientais e o esgotamento de fontes de combustíveis fósseis. Esta busca se direciona a pesquisas e incentivos para o uso de fontes alternativas de energia, que sejam viáveis econômica e socialmente, além de renováveis do ponto de vista ambiental, visando menores impactos para o meio ambiente e consequentemente para gerações futuras.

As fontes de energia renováveis permitem uma geração energética com baixas emissões de gases poluentes e menor impacto ambiental na sua extração, pois nestes casos a matéria prima para a geração de energia é constantemente renovável e disponível em abundância na natureza, como o Sol, os ventos e a água, por exemplo (SANTOS, 2013). Segundo estudo feito pelo GREENPEACE (2010), no Brasil o potencial de energia que poderia ser aproveitada com fontes renováveis usando das tecnologias atuais é 26,4 vezes a demanda nacional.

Tabela 1: Potencial para fontes de energia renováveis

Sol	20 vezes
Vento	3 vezes
Energia hídrica	3 vezes
Biomassa	0,2 vez
Energia oceânica	0,15 vez

Fonte: (GREENPEACE, 2010)

Como apresentado na Tabela 1, a fonte solar tem um grande potencial para ser explorado como matriz energética no Brasil. Uma das grandes vantagens do uso da energia fotovoltaica é a sua versatilidade na instalação, que acaba por ser uma forma de democratizar a energia.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser isolados, com baterias que podem armazenar a carga energética produzida durante o dia para ser utilizada em horários em que não há a radiação solar, possibilitando instalações em áreas afastadas, onde não há rede de distribuição pública.

E por outro lado, é possível também instalar sistemas em áreas adensadas e altamente urbanizadas. São os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica e está sendo amplamente utilizado em países desenvolvidos. O uso desta tecnologia em centros urbanos representa uma solução muito vantajosa, por trazer a fonte geradora de energia para perto do ponto de consumo, utilizando a rede elétrica existente e minimizando gastos de transmissão e distribuição de energia. Além de utilizar áreas de telhados ou fachadas das próprias edificações como base para instalar os sistemas, não sendo necessário demandar de grandes áreas para a geração de energia.

A tecnologia de sistemas fotovoltaicos já vem sendo utilizada em países desenvolvidos há décadas, e encontra-se em constantes avanços e com frequentes pesquisas de usos e materiais para aumentar a aplicabilidade, como grandes usinas geradoras de energia, ou em sistemas menores que se agregam a arquitetura, com novos materiais que podem ser usados como elementos arquitetônicos ou para a própria vedação de edifícios, evidenciando mais uma vez a sua versatilidade de adaptação para variadas situações.

No Brasil, para que se possa buscar alcançar o potencial da energia fotovoltaica, é necessário pensar em edifícios inteligentes, que sejam planejados desde o início com os princípios de sustentabilidade, que são também princípios básicos de arquitetura que muitas vezes são esquecidos, onde a relação do edifício com seu entorno e sua situação são fundamentais para a resolução de um bom projeto. A localização e orientação do terreno devem sempre ser respeitadas, a fim de propor um projeto de arquitetura eficiente como um todo, respeitando o clima e adversidades locais.

No caso dos sistemas fotovoltaicos, é de extrema importância saber previamente quais as condições do local, para que arquiteto e engenheiro possam trabalhar juntos, cada um na sua especialidade, para dimensionar a capacidade de geração de energia do sistema e decidir qual será a melhor maneira de instalá-lo no edifício (se será na cobertura ou fachada), qual a tecnologia mais adequada para se utilizar e qual será o posicionamento do sistema no edifício (orientação e inclinação do arranjo). Tudo isso buscando as condições para aperfeiçoar a geração de energia elétrica especificamente para cada caso.

A geração da energia fotovoltaica depende diretamente da irradiação solar, portanto não há geração durante à noite, sofre uma redução significativa durante dias chuvosos ou nublados (SANTOS, 2013). Por isso, o cálculo da potência a ser instalada de um sistema de energia fotovoltaica deve ser feito a partir de uma média anual da irradiação solar, levando em consideração as diferentes estações do ano e o sombreamento de edifícios do entorno. O estudo prévio das condicionantes do local onde deverá ser instalado o sistema fotovoltaico

é fundamental para a tomada de decisões técnicas do sistema. Desde a posição e orientação do arranjo, até mesmo o dimensionamento do sistema, a fim de evitar desperdícios econômicos.

O papel do arquiteto como divulgador desta tecnologia é fundamental e a aceitação será cada vez maior se esses edifícios funcionarem de fato e ao mesmo tempo apresentarem uma estética que satisfaça seus usuários. Mas para isso, o arquiteto também precisa conhecer melhor sobre a tecnologia. Ao inserir desde o início nos projetos um sistema de geração de energia, o arquiteto evita que façam intervenções e adaptações posteriores, garantindo a integridade do seu projeto e a divulgação adequada da tecnologia fotovoltaica.

1.1 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

Quando instalado, um sistema de geração de energia fotovoltaica sofre muitas influências externas, que podem causar uma redução do seu desempenho da potência máxima instalada, como por exemplo: a existência ou não de sombreamentos parciais, a temperatura dos módulos, o descasamento de corrente entre módulos de uma mesma série, as resistências dos condutores e até o estado de limpeza dos módulos (ZOMER, 2010).

No caso do Escritório Verde da UTFPR, notou-se que durante o ano todo, ao fim da tarde, a edificação vizinha projeta sua sombra sobre o sistema fotovoltaico instalado. Com este trabalho, através de estudos feitos em um modelo 3D, juntamente com dados coletados durante os anos em funcionamento, será possível atribuir um valor para a interferência do sombreamento sobre o sistema.

Segundo ZOMER (2010), existe uma série de vantagens de se considerar o fator sombreamento previamente a um projeto de um sistema fotovoltaico:

- Conhecendo a interferência do sombreamento que uma superfície sofre durante o ano, o projetista pode escolher a melhor área para instalação do sistema fotovoltaico, reduzindo perdas da irradiação direta sobre o gerador;
- De acordo com o formato da sombra sobre a área de interesse e da direção de onde ela incide, é possível buscar soluções diferentes para a configuração elétrica do sistema que minimizem as perdas causadas pelo sombreamento;
- Com o estudo prévio das perdas energéticas decorrentes do sombreamento, o cálculo da estimativa de geração da energia fotovoltaica fica mais próximo à realidade, evitando que o sistema seja super ou subdimensionado.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo visando determinar o coeficiente da perda de desempenho do sistema fotovoltaico do Escritório Verde da UTFPR atribuído ao sombreamento, que possa ser utilizado também em outros casos a fim de melhorar o desempenho de sistemas fotovoltaicos instalados em edificações em meios urbanos adensados.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Fazer um levantamento dos dados solares do edifício de estudo, durante o ano todo através do *software* de modelagem 3D SketchUp, considerando as edificações vizinhas;
- Fazer uma análise no *software* RADIASOL da perda da radiação pelo fator sombreamento;
- Analisar dados de desempenho do sistema fotovoltaico instalado no edifício de estudo para encontrar um índice que atribua qual a porcentagem da redução da potência instalada é atribuída ao sombreamento parcial da edificação;
- Analisar se o sistema está instalado de maneira a ter o melhor desempenho possível, dentro das condicionantes.

1.3 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O Escritório Verde foi desenvolvido pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná com o propósito de servir como modelo de escritório comercial sustentável. Suas dependências contam com cerca de 150 m² e foi construído com tecnologia de construção a seco em madeira, painéis de madeira pinus tratada, manta para isolamento térmico em PET reciclado e manta para conforto acústico de pneus reciclados. Para executar o projeto idealizado, contou com a parceria de mais de 40 empresas que forneceram produtos, materiais e tecnologias sob o perfil sustentável da obra (Escritório Verde, 2016).

A sede Escritório Verde da UTFPR está localizada na região central da cidade de Curitiba, Paraná. A edificação conta com um sistema gerador de energia fotovoltaica, conectado à rede elétrica em sua cobertura. O SFVCR foi aplicado ao EV após a sua construção, adaptando-se às condicionantes que lhe foram impostas para a sua instalação para a posição e orientação de seus módulos. Essa condição não lhe confere desempenho ideal e o submete ao sombreamento da edificação vizinha, que será objeto de estudo no presente trabalho.

Figura 1: Escritório Verde - Objeto de estudo



Fonte: Escritório Verde

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

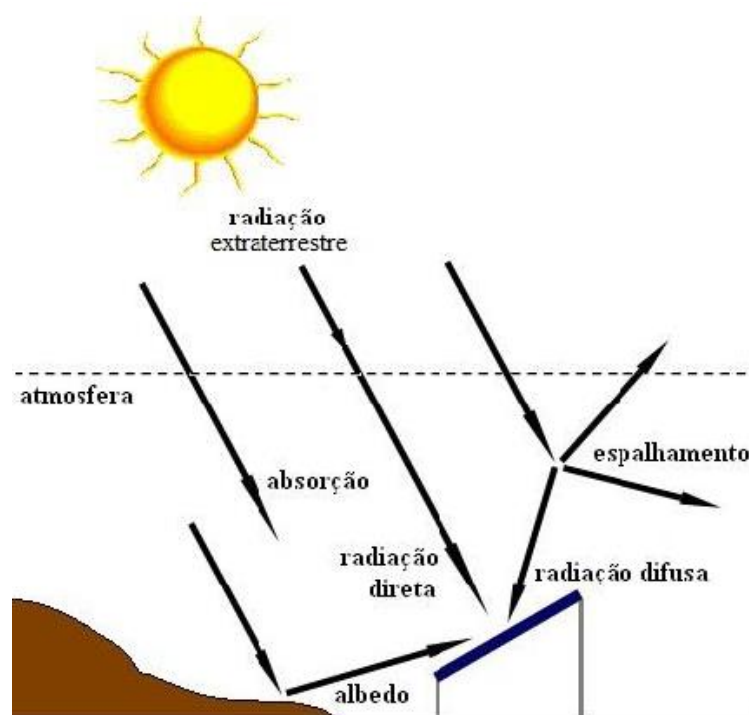
2.1 RADIAÇÃO SOLAR

O Sol exerce um papel vital para todas as formas de vida e diariamente irradia mais energia do que a demanda total de todos os habitantes de nosso planeta em todo um ano. Portanto, além de garantir a sobrevivência dos seres vivos, o Sol é também uma fonte de energia inesgotável e com diversos tipos de aplicações. Dentre elas, a energia fotovoltaica, onde ocorre a transformação da energia da luz solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Células solares convertem diretamente a energia do sol em energia elétrica de forma estática, silenciosa, não poluente e renovável (RUTHER, 2004).

A radiação solar que chega à superfície da Terra pode ser decomposta de diferentes formas. Para o aproveitamento de geração de energia fotovoltaica, a parte que mais interessa é a Irradiação Global Horizontal, que é composta de Irradiação Difusa Horizontal e Irradiação Normal Direta (EPE, 2012). A radiação direta é aquela que provém diretamente da direção do Sol, atingindo o solo sem reflexões e prevalece em dias claros produzindo sombras nítidas. Já a radiação difusa é recebida pela superfície de forma dispersa, proveniente de todas as direções e atenuada por reflexões em nuvens, poeira, vapor d'água e outros elementos em suspensão na atmosfera. Mesmo em um dia totalmente ensolarado, a radiação difusa terá uma parcela de pelo menos 20% da radiação total. Já em dias nublados a radiação será 100% difusa, não havendo radiação direta (EPE, 2012; PINHO e GALDINO, 2014).

Há ainda um terceiro componente da radiação global quando a superfície estiver inclinada em relação à horizontal. É o coeficiente de reflexão do ambiente do entorno (solo, vegetação, obstáculos, etc.) e é denominado “albedo”. Uma ilustração da radiação global, apresentada na Figura 2, sobre uma superfície receptora dividida em seus três componentes: a radiação solar direta e difusa, e a devida ao albedo - quando a superfície está inclinada (PINHO e GALDINO, 2014).

Figura 2: Componentes da radiação solar global

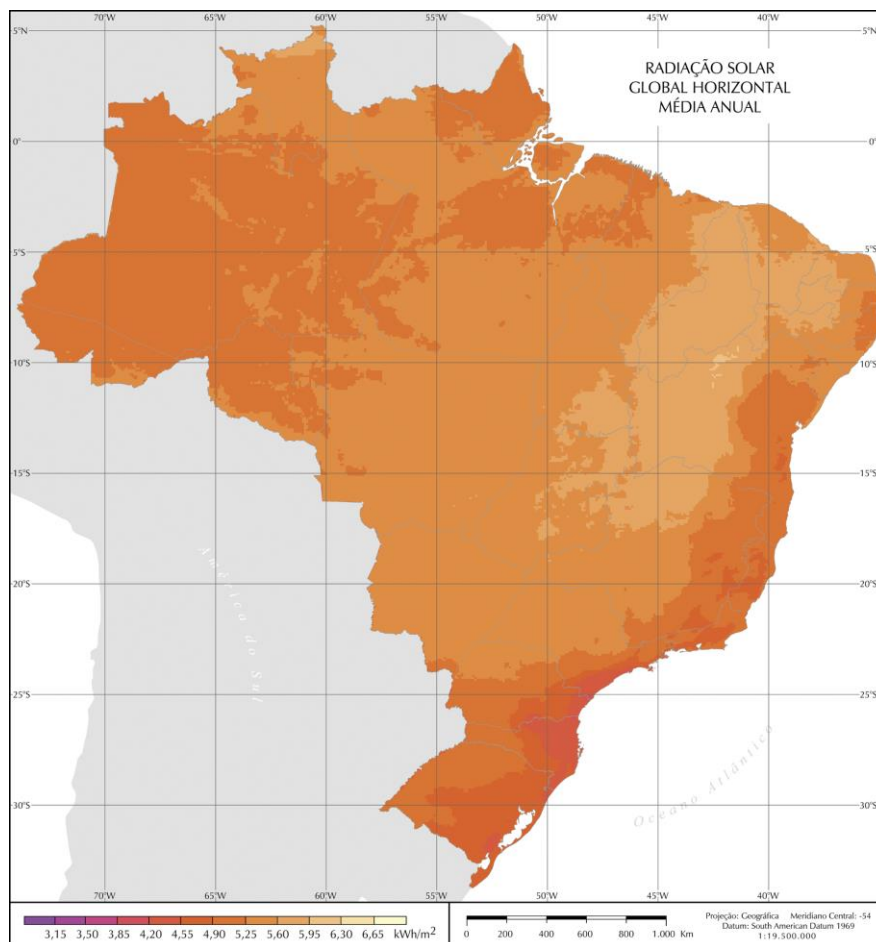


Fonte: PINHO e GALDINO, (2014).

Geograficamente o território brasileiro se encontra em condições bastante favoráveis em termos de radiação solar, o que contribui para que uma maior quantidade de energia possa ser aproveitada em sistemas fotovoltaicos. O mapa na Figura 3 mostra a média anual do total diário de irradiação solar global que incide em todo o Brasil.

Apesar das diferentes características climáticas observadas no país com diferentes níveis de precipitações ao longo do ano, pode-se observar que a média anual de irradiação global apresenta boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em todo país, principalmente quando comparados a outros países onde projetos para o aproveitamento de recursos solares são amplamente difundidos, contando com fortes incentivos governamentais. Os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro ($1.500-2.500 \text{ kWh/m}^2$) são superiores aos da maioria dos países da União Européia, como Alemanha ($900-1.250 \text{ kWh/m}^2$), França ($900-1.650 \text{ kWh/m}^2$) e Espanha ($1.200-1.850 \text{ kWh/m}^2$). (PEREIRA *et al.*, 2006).

Figura 3: Mapa da média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro.



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar

Mesmo com um grande potencial de irradiação solar a ser explorado, a principal fonte para geração de eletricidade no Brasil ainda é a energia hidráulica, uma das fontes de geração de mais baixo custo, mas de impactos ambientais consideráveis, devido à necessidade da formação de grandes reservatórios de água para movimentar as turbinas dos geradores (URBANETZ, 2010).

Na busca de novas fontes energéticas renováveis e de menores impactos para o meio ambiente, a energia eólica é a que vem recebendo maior volume de investimentos por conta do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA – <http://www.mme.gov.br/>), coordenado pelo Ministério de Minas e Energia. No entanto, segundo dados do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, boa parte do território do país não apresenta condições de ventos favoráveis para geração de eletricidade (PEREIRA *et al.*, 2006).

Por outro lado, como observado anteriormente na Tabela 1 e na Figura 3, o Brasil possui grande potencial para aproveitamento de energia solar durante todo ano. No entanto, apesar do enorme potencial, hoje em dia essa energia ainda tem uma participação incipiente na matriz energética brasileira - apenas a energia solar térmica para aquecimento de água tem despertado interesse no mercado nacional (PEREIRA *et al.*, 2006).

2.1.1 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico). Esse processo de conversão faz uso de células fotovoltaicas, que são elementos semicondutores fotossensíveis que convertem a radiação em energia. Um conjunto de células fotovoltaicas forma um módulo, que por sua vez quando unido a outros módulos compõe um arranjo ou painel fotovoltaico, que pode ser instalado em uma edificação ou sobre o solo (RÜTHER, 2004; SANTOS, 2013).

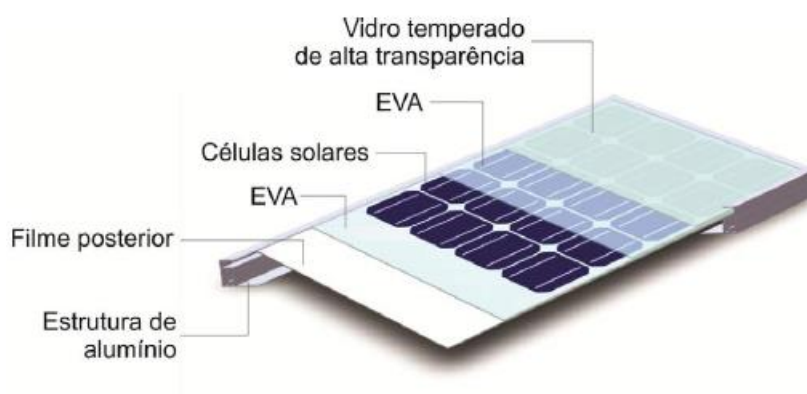
2.1.2 Tecnologias de células fotovoltaicas

A tecnologia fotovoltaica pode ser dividida em três gerações de módulos e cada uma delas possuem características diferentes: a primeira geração, com os módulos feitos de fatias de silício, é a que atualmente domina o mercado. A segunda geração, composta por módulos de filmes finos, que possui menor eficiência, porém maior flexibilidade na instalação, e a terceira geração, composta pelas células orgânicas e de corantes sensibilizados, ainda não disponíveis comercialmente para a construção civil (SANTOS, 2013; ZOMER, 2014).

A utilização do silício cristalino na fabricação de células fotovoltaicas se divide em dois grupos, os monocristalinos (m-Si) e os policristalinos (p-Si). Os monocristalinos são assim chamados por possuir uma estrutura homogênea em toda sua extensão. Para a fabricação de uma célula FV de m-Si é necessário que o silício (Si) tenha 99,9999% de grau de pureza, o que lhe confere maior eficiência na geração de energia, porém encarece o custo final do módulo. As técnicas de fabricação de células policristalinas são basicamente as mesmas de fabricação das células monocristalinas. É requerido, porém, menor gasto de energia e também menor rigor no controle do processo de fabricação (EPE, 2016).

A utilização do silício cristalino nas edificações é feita normalmente em módulos rígidos e retangulares e podem inclusive servir de revestimento de fachadas ou coberturas. Um módulo fotovoltaico pode ser constituído por um conjunto de 36 a 216 células fotovoltaicas associadas eletricamente em série e/ou paralelo. Essas células são soldadas e encapsuladas, a fim de proporcionar resistência mecânica ao módulo, além de vedar e protegê-lo de intempéries, conforme a Figura 4 (PEREIRA *et al.*, 2006; SANTOS, 2013).

Figura 4: Esquema dos componentes de encapsulamento de um módulo FV com células de silício cristalino.



Fonte: Pereira *et al.*, (2006).

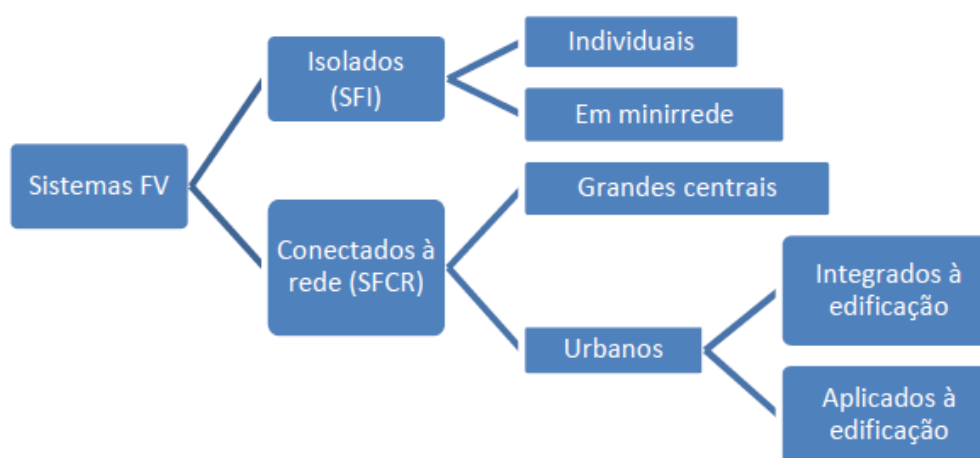
2.1.3 Sistemas fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos podem ser eletricamente interligados de modo a aumentar a potência elétrica final e prover apenas uma única saída de corrente elétrica, constituindo um arranjo fotovoltaico. Para formar um sistema FV, esse arranjo ou painel fotovoltaico pode incluir dispositivos para controle, condicionamento, supervisão, proteção e armazenamento da energia elétrica - quando necessário (BRAUN-GRABOLLE, 2010).

A aplicação dos sistemas fotovoltaicos pode ser categorizada conforme a Figura 5. O sistema pode ser classificado como isolado ou autônomo (SFI), ou conectado à rede elétrica (SFVCR). O sistema isolado é aquele onde a energia elétrica pode ser consumida simultaneamente à sua geração, ou pode ser armazenada por bancos de baterias para uso futuro, como durante a noite, quando houver a ausência do sol, ou quando o consumo for superior à geração. Os elementos fundamentais que constituem um sistema fotovoltaico isolado são os módulos fotovoltaicos, bateria, controlador de carga e inversor de corrente

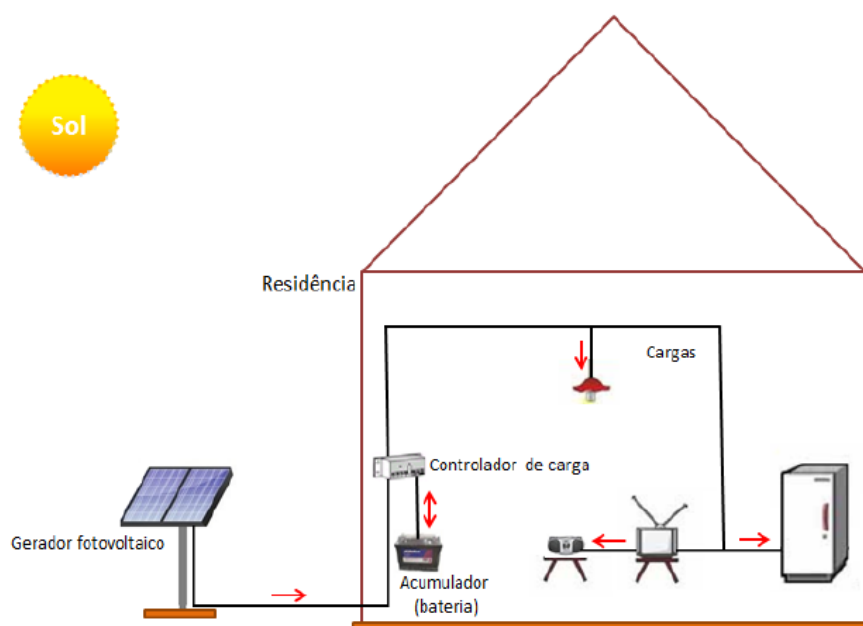
elétrica, conforme a Figura 6. Esses sistemas geralmente são viabilizados em locais distantes ou isolados dos centros urbanos, onde não existem linhas de transmissão e distribuição (T&D) e a disseminação de sistemas fotovoltaicos autônomos deve ser priorizada em comunidades que ainda não tenham acesso à energia elétrica, pois é de fundamental importância o uso comum da eletricidade para o desenvolvimento do país (JARDIM, 2007; VARELLA, 2009).

Figura 5: Tipos de aplicações de Sistemas FV



Fonte: URBANETZ JR, (2010).

Figura 6: Diagrama simplificado de um SFI domiciliar

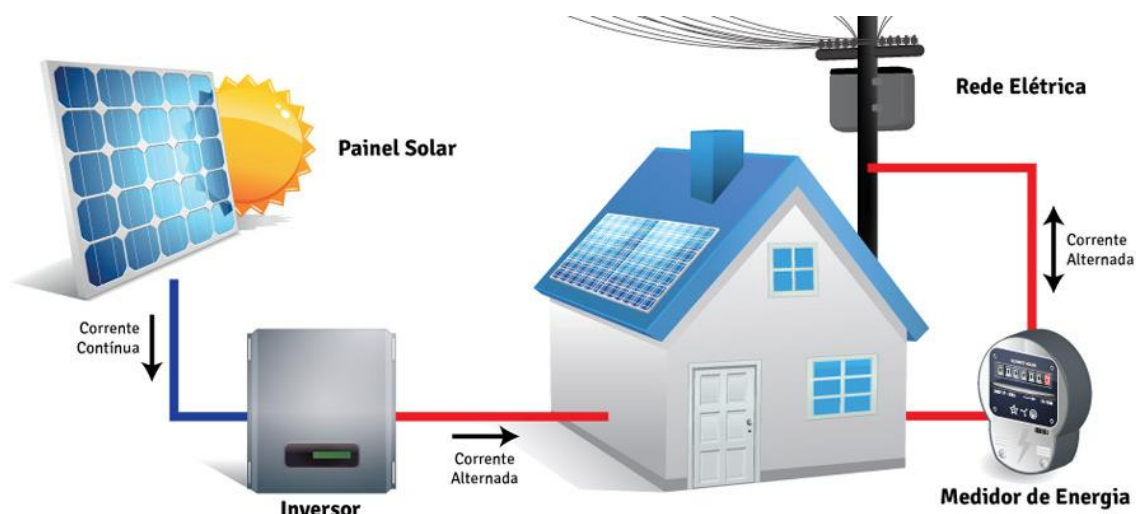


Fonte: Pereira *et al*, 2006.

Já nos sistemas conectados à rede (SFVCR), a sua característica fundamental é que dispensam os bancos de baterias e os seus elevados custos de manutenção envolvidos, pois a própria rede elétrica é vista como um elemento armazenador da produção excedente de energia, pois toda a energia gerada é colocada em paralelo com a energia da rede (ZOMER, 2014).

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede são vistos como uma forma de geração distribuída (GD) ao longo dos alimentadores da rede elétrica de distribuição, em baixa ou média tensão e contribuem para disponibilizar a energia próxima ao ponto de consumo. A Figura 7 mostra a composição de um SFVCR. O sistema é basicamente composto de um painel fotovoltaico, que converte a energia do sol em energia elétrica em corrente contínua e um inversor, que converte a corrente contínua em corrente alternada, com tensão e frequência compatíveis com a rede elétrica da concessionária ao qual o sistema está interligado. As principais vantagens desse tipo de sistema são: elevada produtividade, ausência de banco de baterias e o desligamento automático no caso de falta de energia da rede, evitando o fenômeno de ilhamento (URBANETZ JR, 2010).

Figura 7: Diagrama simplificado de um SFVCR



Fonte: Google imagens

Na configuração mais comum, estes sistemas são instalados de tal maneira que quando o gerador solar fornece mais energia do que a necessária para o atendimento da instalação consumidora, o excesso é injetado na rede elétrica pública, a qual funcionará como uma bateria, armazenando esse excedente até o momento em que a unidade consumidora necessite de energia proveniente da distribuidora (o sistema é denominado *net metering*). Dessa forma, a energia elétrica gerada por essas unidades consumidoras é cedida à distribuidora local, sendo posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica dessa mesma unidade consumidora, quando o sistema solar gerar menos energia do que a demandada pela instalação consumidora. Este sistema de medição e compensação de energia é utilizado em países como Japão e Estados Unidos e foi recentemente aprovado e regulamentado no Brasil (ANEEL, 2012; ZOMER, 2014).

2.2 SISTEMAS FV INTEGRADOS E APLICADOS A EDIFICAÇÕES EM CENTROS URBANOS

O Brasil possui condições bastante favoráveis para a implantação em larga escala de sistemas de geração de energia fotovoltaica, promovendo uma maior democratização da energia elétrica. Através de sistemas isolados pode-se levar a energia a pontos mais remotos do país para aqueles que não têm acesso à eletricidade, sem ter os gastos de obras de linhas de

transmissão. Nas cidades, onde já existe a infraestrutura de rede elétrica, é possível integrar os sistemas fotovoltaicos a rede pública de distribuição de energia (GREENPEACE, 2010).

A maior demanda de energia está justamente nos grandes centros urbanos, onde se encontram a grande maioria de edifícios comerciais e residenciais. Segundo a Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), em 2011, do total do consumo de energia elétrica no Brasil, as edificações dos setores residencial, comercial e público somam aproximadamente 47%. Por isso, é bastante pertinente a inserção de sistemas fotovoltaicos em meios urbanos, integrados a essas edificações, diminuindo a distância da geração e utilização da energia, maximizando o potencial e diminuindo as perdas de transmissão e distribuição (EPE, 2016).

Segundo RÜTHER, (2004), das vantagens da distribuição descentralizada de energia para o sistema elétrico, muitas estão atribuídas a custos evitados, como por exemplo: perdas energéticas na transmissão e distribuição de energia; redução nos investimentos em linhas de transmissão e distribuição; redução de área física dedicada ao SFV, uma vez que a área necessária já é ocupada pela própria edificação. Os geradores FV quando distribuídos estrategicamente apresentam mínima capacidade ociosa. Isso ocorre principalmente nas áreas comerciais onde geralmente existe uma coincidência entre pico de geração FV e pico de demanda energética, como no caso de demanda por ar-condicionado. A utilização da energia FV nesses centros poderia auxiliar na redução do pico de demanda, diminuindo a sobrecarga da rede (JARDIM, 2007; RÜTHER, 2004).

Há duas maneiras de se inserir sistemas fotovoltaicos a edificações. Eles podem ser adicionados posteriormente a uma edificação já existente, que são os chamados *BAPV* (*Building applied photovoltaics*). Nesta situação, geralmente as possibilidades de instalação são mais restritas, pois se deve adaptar o sistema a condicionantes que nem sempre são consideradas ideias para a captação máxima da irradiação solar, além de na maioria das vezes ser uma decisão unicamente técnica e funcional, deixando de lado aspectos formais da edificação.

Figura 8: Exemplo de BAPV – Fachada fotovoltaica aplicada do edifício MNACTEC (Tarrasa, Espanha).



Fonte: Google imagens

A outra maneira de instalação é quando o sistema fotovoltaico já está inserido na própria edificação, que são os *BIPV (Building integrated photovoltaics)*. Neste segundo caso se faz muito mais eficiente, pois tudo é planejado de maneira única e os coletores solares fazem parte do envoltório do edifício e além de gerar energia podem substituir materiais de vedação (DGS, 2008). Além disso, quando a decisão de se utilizar um sistema de geração de energia fotovoltaica é levada em conta ainda em fase de projeto arquitetônico, o arquiteto junto a uma equipe multidisciplinar pode pensar no projeto de maneira que aperfeiçoe o rendimento do sistema. A orientação, a geometria e o estudo do entorno fazem com que se aproveite melhor a radiação do local onde será inserido o novo edifício, evitando ao máximo o sombreamento de edificações vizinhas no sistema.

Figura 9: Exemplo de BIPV - Sede da NeoSolar, Taiwan. Projeto de J.J. Pan & Partners (2009).



Fonte: Google imagens

O modelo de geração de energia fotovoltaica descentralizada em meios urbanos prevê mais unidades geradoras em menor escala, instaladas mais próximas aos locais de maior demanda energética. As próprias construções podem servir de base para a instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede e os envoltórios dos edifícios podem se tornar geradores de energia. Esta é considerada a solução mais adequada para a instalação de sistemas fotovoltaicos, pois a geração energética já acontece junto ao ponto de consumo, minimizando perdas por transmissão e distribuição, comuns em sistemas centralizados e afastados (RÜTHER, 2004; ZOMMER, 2014).

Porém, a utilização desses sistemas nas grandes cidades possuem algumas condicionantes que devem ser levados em consideração. Por se tratar de centros urbanos adensados, compreende-se que em algumas horas do dia o sistema fotovoltaico pode sofrer um sombreamento parcial de edificações vizinhas, ou da sua própria geometria e em casos onde o sistema é aplicado sobre um edifício existente, nem sempre os módulos estarão com orientações e inclinações ótimas para um rendimento máximo. O ideal é que os possíveis sombreamentos sejam quantificados e avaliados ainda em fase de projeto, para minimizar possíveis perdas energéticas do sistema (ZOMMER, 2014).

2.2.1 O efeito do sombreamento em sistemas Fotovoltaicos

O rendimento de um gerador fotovoltaico pode sofrer influencia de vários fatores externos, que podem afetar de maneira negativa seu rendimento. O principal deles é o parâmetro radiação solar, que depende fundamentalmente da localização geográfica da instalação, bem como de sua inclinação e orientação. A temperatura dos painéis, o sombreamento parcial, o descasamento entre painéis de um mesmo *string*, as resistências dos condutores e o estado de limpeza dos painéis também influenciam a performance do sistema gerador fotovoltaico (RÜTHER, 2004).

O sombreamento é uma questão crítica. Como o desempenho de um gerador FV depende diretamente da radiação solar, sua performance é ótima quando iluminado homoganeamente em toda a sua superfície. Um sombreamento parcial, causado por uma antena ou uma árvore, por exemplo, pode reduzir acentuadamente o rendimento de todo o sistema. Isto ocorre porque a célula com menor iluminação é que irá determinar a corrente e a potência de operação de todas as células que estiverem na mesma série que ela em um mesmo conjunto (SANTOS, 2013).

As perdas na produção de energia devido ao sombreamento podem ser minimizadas utilizando módulos que possuem diodos de *by-pass* integrados às células. Este dispositivo fornece um caminho alternativo à corrente, permitindo que a mesma mantenha os níveis das outras células corretamente iluminadas. Utilizando mais inversores de menor capacidade e até mesmo configurando as séries de acordo com os períodos de sombreamento a fim de evitar a conexão na mesma série de módulos sombreados e não sombreados, também são ações que podem minimizar o efeito do sombreamento (ZOMER, 2014).

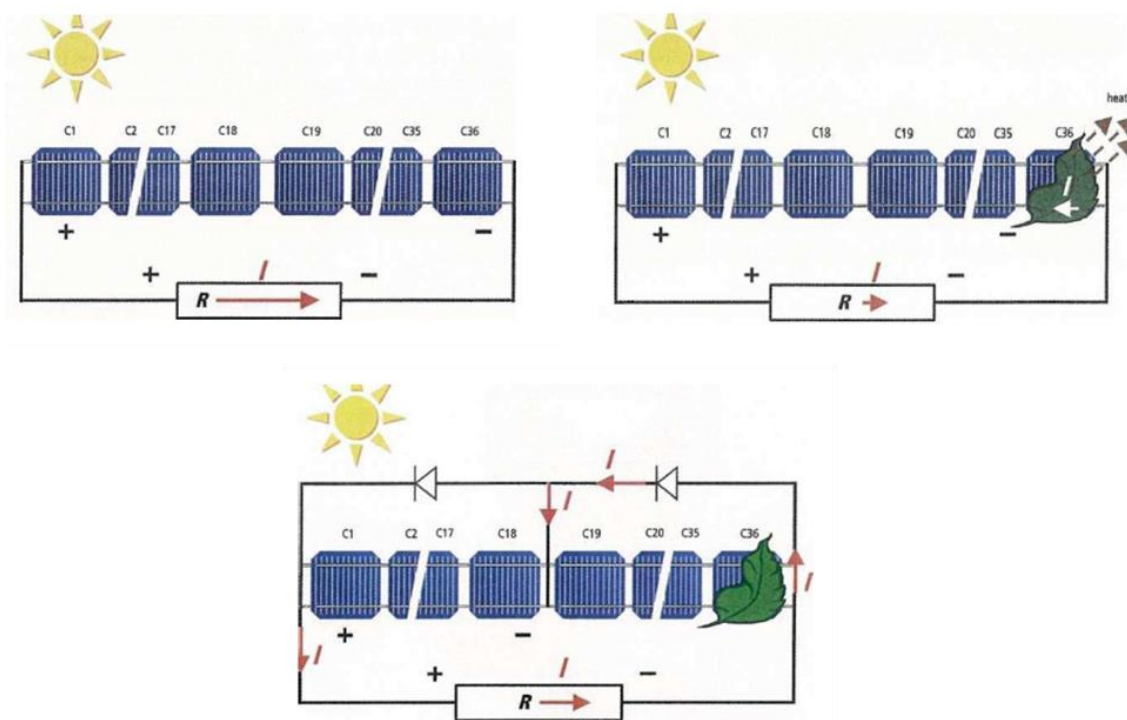
A Figura 10 ilustra um módulo composto por 36 células e dois diodos de *by-pass*, um a cada duas colunas de nove células. Neste caso de um sombreamento parcial de um elemento externo, mesmo atingindo a somente uma célula, faz com que o módulo passe a atuar com metade de sua potência, pois o diodo desvia a corrente para que o módulo não deixe de funcionar por inteiro. A Figura 11 mostra um esquema de como funciona este desvio de corrente feito pelo diodo de *by-pass* (DGS, 2008).

Figura 10: Sombreamento de uma célula FV dentro de um módulo FV.



Fonte: DGS, (2008).

Figura 11: Esquema do funcionamento do diodo de *by-pass*

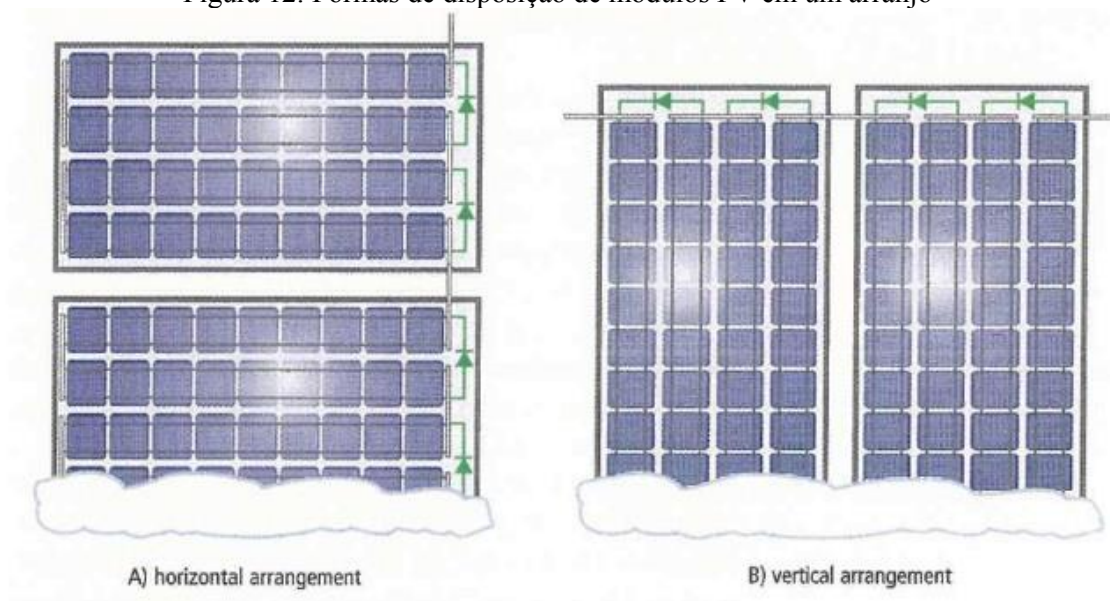


Fonte: DGS, (2008).

O mesmo efeito pode ocorrer em um arranjo fotovoltaico quando há um módulo sombreado na instalação; assim, este módulo com menor geração também irá condicionar a corrente dos outros módulos ligados em série. Deste modo, é fundamental que a integração arquitetônica projete a localização dos módulos em local idealmente livre de qualquer tipo de sombreamento, principalmente nas horas em que há maior irradiação solar disponível

(SANTOS, 2013). A Figura 12 mostra que mesmo o módulo possuindo os diodos de *by-pass*, a forma que um arranjo é instalado também podem influenciar no desempenho do sistema. A direção do sombreamento deve ser analisada antes da decisão de dispor os módulos no arranjo, que podem estar na horizontal ou na vertical.

Figura 12: Formas de disposição de módulos FV em um arranjo



Fonte: DGS, 2008

No caso da Figura 12, módulos de mesmas características estão sofrendo um mesmo sombreamento parcial temporário, causado pela neve, mas apresentam efeitos completamente diferentes. Neste caso retratado, no arranjo horizontal (A) o sombreamento está comprometendo metade do sistema, e já no vertical (B), ele já está completamente comprometido, pois a sombra atinge a primeira célula de todas as colunas, e a função do diodo de *by-pass* é anulada.

2.2.2 Tipos de sombreamento

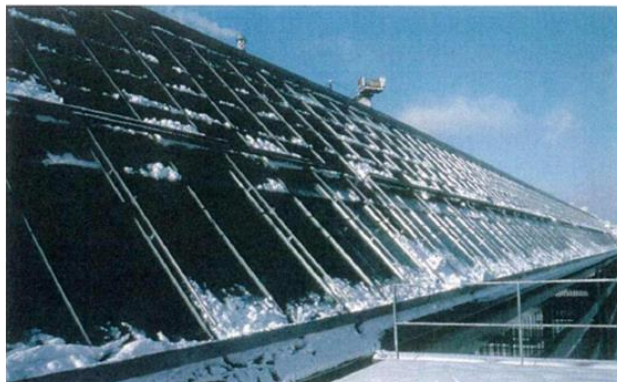
A redução da radiação causada pelo sombreamento parcial sobre um módulo FV afeta consideravelmente o seu funcionamento e ele sempre deverá ser evitado. O ideal é que um SFV seja instalado em uma área livre de interferências externas, porém, quando se trata de sistemas fotovoltaicos conectados a rede elétrica em centros urbanos a fator sombreamento muitas vezes é inevitável.

Seja para edifícios que se enquadram nas categorias BAPV ou BIPV, o entorno da área de instalação de um SFVCR deve ser analisado previamente a fim de evitar ou minimizar os efeitos causados pelos diversos tipos de sombreamento, que podem ser classificados como (DGS, 2008):

- Sombreamento temporário: é aquele causado por queda de folhas, excrementos de pássaros, poluição e em caso de alguns países, neve. Se um SFV estiver sendo muito afetado por esses fatores, a limpeza dos módulos deverá ser feita com maior frequência. Na maior parte dos casos, a perda de radiação pelo sombreamento temporário é aceitável;
- Sombreamento atribuído à localização: é aquele atribuído às edificações e vegetações no entorno de um SFV. Deve-se levar em conta que as árvores e vegetações tendem a crescer durante os anos, podendo causar sombras no futuro. Até mesmo edifícios mais afastados podem gerar um escurecimento do horizonte, afetando o sistema. Sistemas de cabeamento da rede elétrica também apresentam um efeito negativo, pois são pequenas sombras que se movem de acordo com o percurso solar ao longo do dia;
- Sombreamento do próprio edifício: a própria geometria do edifício, ou seus elementos arquitetônicos podem sombrear diretamente um SFV, causando efeitos negativos em seu desempenho. Em alguns casos, o sombreamento pode ser evitado ao escolher a melhor localização para a instalação do sistema. Se não for possível, os efeitos podem ser minimizados na escolha do tipo de módulos e interligações elétricas entre os mesmos;
- Sombreamento do próprio sistema: é aquele quando a sombra de um módulo se sobrepõe a outro módulo. Ocorrem muitas vezes em sistemas FV mal planejados, com módulos inclinados e estruturas independentes. Existem recomendações de espaçamentos entre os módulos para evitar este tipo de sombreamento;

- Sombreamento direto: quanto mais próxima a fonte do sombreamento estiver do SFV, mais escura será a sua sombra, reduzindo a radiação direta sobre a célula, e por consequência o desempenho do sistema.

Figura 13: Imagens dos tipos de sombreamento.



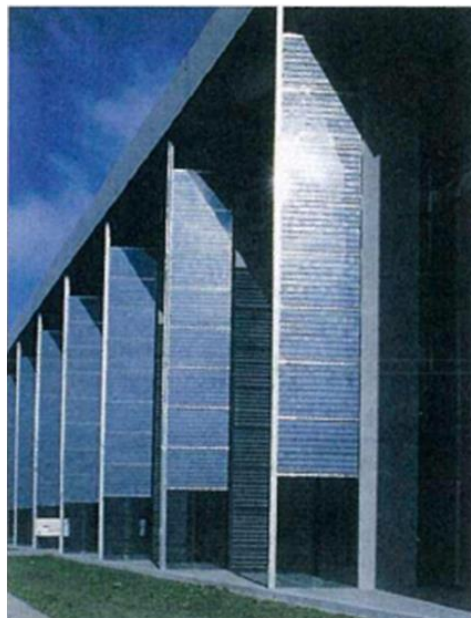
Sombreamento temporário



Sombreamento pelo próprio sistema



Sombreamento direto



Sombreamento pelo próprio edifício



Sombreamento pela localização

2.3 O PAPEL DA ARQUITETURA NA APLICAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS A EDIFICAÇÕES

Um gerador fotovoltaico comprometido com sua forma e sua função é capaz de gerar energia elétrica baseada em uma fonte limpa, agregar beleza à edificação a que está integrado. A inserção dos sistemas fotovoltaicos ainda em fase de projeto tem grande relevância para minimizar fatores de perda energética, mas principalmente para que possa ser usado como elemento formal e não só funcional, a fim de se tornar exemplo positivo de divulgação da tecnologia fotovoltaica, e atrair a atenção de arquitetos e projetistas para que façam uso em suas obras desses sistemas (ZOMER *et al.*, 2012).

Com a crescente aceitação dos arquitetos e projetistas em inserir em suas obras elementos fotovoltaicos, a tendência é que novas formas de integração comecem a surgir. Isto porque integrações de qualidade podem contribuir para aumento do uso da tecnologia, enquanto que integrações desagradáveis podem resultar em aversão e diminuição do seu uso. Os módulos podem estar integrados nas coberturas, nas fachadas ou podem substituir elementos de sombreamento. Existem diversos modelos e tecnologias de módulos fotovoltaicos que permitem um amplo número de opções para os arquitetos e projetistas, que podem usar a criatividade para agregar valor formal a edificação e ao mesmo tempo solucionar a produção energética. O sistema fotovoltaico pode ser considerado um elemento de destaque em uma edificação; pode estar integrado de forma sutil, sem que seja percebido; ou ainda pode comprometer negativamente todo o conjunto, quando estiver mal empregado (ZOMER, 2014).

A Figura 14 é um exemplo de como o sistema fotovoltaico pode estar associado a uma arquitetura contemporânea e única. O estádio de Kaohsiung em Taiwan carrega o título de primeiro do mundo 100% movido à energia solar.

Figura 14: Estádio de Kaohsiung, Taiwan.



Fonte: Google Imagens

A integração arquitetônica da tecnologia FV em uma edificação acarreta em novas necessidades que devem ser consideradas ainda em fase de projeto para que seja possível o melhor desempenho dos sistemas. As principais considerações que devem ser respeitadas são: os módulos necessitam receber a maior irradiação solar possível; a instalação FV necessita de um projeto elétrico específico e deve contar com outros equipamentos como inversores e controladores; e principalmente de que a instalação seja visível e, portanto, deve ser esteticamente agradável. Devido a essas condicionantes, a instalação FV irá influenciar na orientação do edifício, nas fachadas e formas da edificação, na composição com outros elementos e também na execução da obra. O domínio das destas questões geram consequências – ora concomitantes, ora conflitantes – devido às decisões de projeto em relação à forma e à função de SFV integrados a edificações, é assunto de interesse econômico, técnico e, sobretudo, fundamental para o desenvolvimento de conhecimento científico neste setor no Brasil (SANTOS, 2013, ZOMER *et al.*, 2012).

Uma forma de incentivar e disseminar o uso da tecnologia fotovoltaica no país é através da integração de módulos fotovoltaicos em edificações com grande importância e visibilidade. Porém, para que a divulgação seja positiva, a integração fotovoltaica tem que estar em harmonia com a arquitetura, fazendo parte da mesma. Além disso, projetos que demonstram a utilização de sistemas fotovoltaicos como elementos de composição arquitetônica são muito importantes para que os custos da eletricidade fotovoltaica continuem caindo e as pesquisas de novos materiais e tipos de aplicações aumentem cada vez mais (ZOMER *et al.*, 2012).

Está equivocada a ideia de associar o trabalho do arquiteto apenas ao projeto arquitetônico, passando para outros profissionais a responsabilidade dos projetos complementares. As decisões de projeto devem ser definidas em equipes multidisciplinares, para que as respostas arquitetônicas das diversas questões do projeto produza um resultado integrado com o todo e não soluções sobrepostas, como está ilustrado na Figura 15. O arquiteto deve ter um conhecimento básico sobre conceitos que envolvem o desempenho e bom funcionamento de um edificação, para que ele possa agir como coordenador de todo o processo e tomar as melhores decisões referentes ao projeto a fim de torná-lo mais eficiente (LAMBERTS *et. al*, 2013).

Figura 15: Arquiteto como coordenador de uma equipe multidisciplinar.



Fonte: LAMBERTS *et. al*, (2013).

3 METODOLOGIA

O caso de estudo deste trabalho é o Escritório Verde (EV) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), localizado em Curitiba, Paraná. O EV foi inaugurado em dezembro de 2011, como uma proposta inovadora de edificação com diversas estratégias sustentáveis. A construção de 150 m², em parceria com mais de quarenta empresas, busca a máxima eficiência energética, visando reduzir o impacto ambiental das atividades acadêmicas e também servir de referência a outras instituições de ensino e empresas (Escritório Verde).

Figura 16: Imagens do Escritório Verde - Vista aérea (esq.) e vista frontal (dir.).



Fonte: Google Earth e Google imagens

Dentre as soluções sustentáveis adotadas pela UTFPR está a geração da própria energia através de um sistema fotovoltaico conectado à rede. O SFVCR do Escritório Verde possui uma potência instalada de 2,1kWp (10 módulos KYOCERA de tecnologia de silício policristalino, modelo KD210GX-LP ligados em série) e um inversor monofásico em 220V de 2kW de potência nominal (PVPOWERED modelo PVP2000), o qual entrou em operação em 14 de dezembro de 2011. A área ocupada na cobertura da edificação para esse painel é de 15 m² (URBANETZ *et al.*, 2016).

O Escritório Verde é considerado um BAPV – onde o sistema FV é aplicado posteriormente ao edifício, e por isso o painel fotovoltaico foi instalado conforme as condicionantes da superfície disponível, com 15° de inclinação e com orientação de -22° em relação ao norte (desvio azimutal), acompanhando as características do telhado da edificação - o que não lhe confere o máximo desempenho.

Figura 17: Instalação do SFVCR no telhado do Escritório Verde



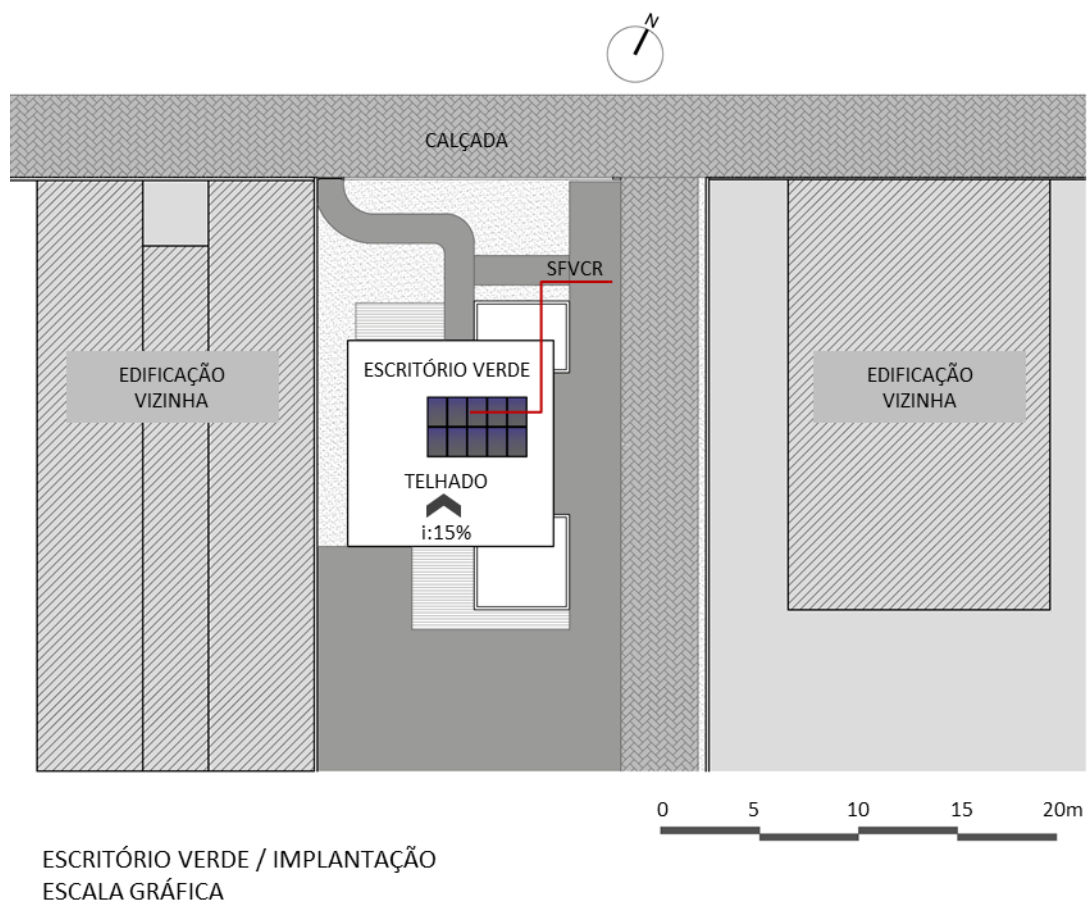
Fonte: Escritório Verde

Através da leitura dos dados de energia gerada nos anos de operação do sistema fotovoltaico, percebe-se que a sua taxa de desempenho possui limitações. Esta redução no desempenho pode ser atribuída a fatores como, por exemplo: a temperatura dos módulos, o descasamento de corrente entre módulos de uma mesma série, as resistências dos condutores e o sombreamento, que foi analisado neste trabalho.

Este estudo apresenta uma simulação de como se comporta o sombreamento da edificação vizinha sobre o sistema fotovoltaico do Escritório Verde da UTFPR, através do *software* de modelagem 3D Sketchup. A partir dos dados gerados da maquete tridimensional, foi utilizado o programa RADIASOL para encontrar valores de radiação perdidos pelo sombreamento, para comparar com dados de desempenho do sistema obtidos pelos leitores através dos anos de funcionamento do SFVCR, com a finalidade de atribuir um valor para a perda da eficiência pelo fator do sombreamento.

A Figura 18 representa a implantação do Escritório Verde em relação às edificações vizinhas, e o sistema fotovoltaico instalado em sua cobertura. Este levantamento foi feito a partir do projeto disponibilizado pelo Escritório Verde e medições feitas no local, servindo como base para a maquete 3D do EV e seu entorno.

Figura 18: Implantação Escritório Verde



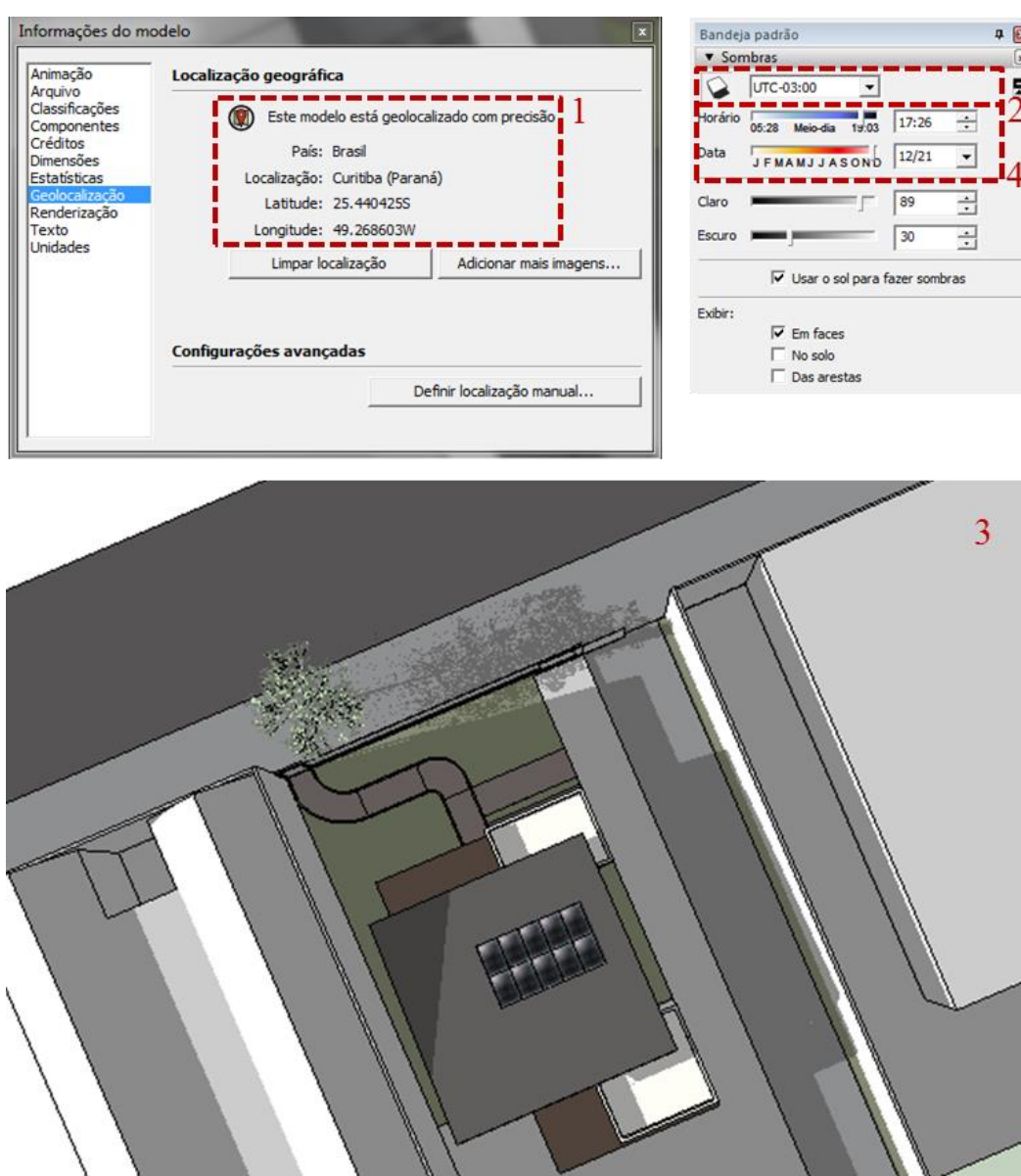
Fonte: Autoria própria

3.1 ANÁLISE DA RADIAÇÃO SOLAR NO EDIFÍCIO EM ESTUDO

3.1.1 Modelo 3D através do Software Sketchup

A Figura 19 apresenta o passo a passo que foi utilizado para encontrar o momento do dia em que a edificação vizinha projeta sua sombra sobre os módulos fotovoltaicos do Escritório Verde, no software de modelagem 3D Sketchup.

Figura 19: Procedimentos para estudo do sombreamento parcial a partir do software Sketchup.



Fonte: Autoria própria

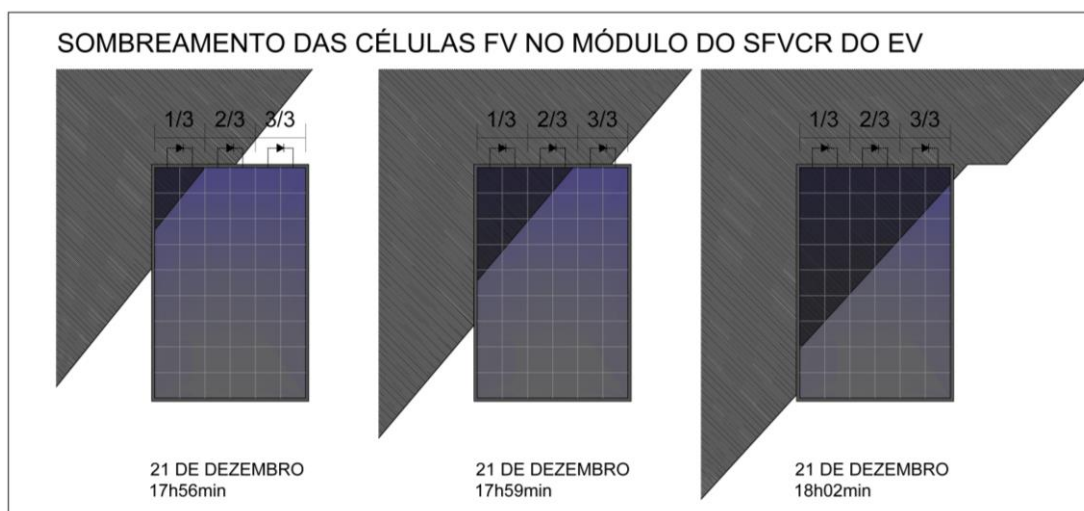
- 1 – Inserir latitude e longitude para determinar o local exato de estudo – o software Sketchup utiliza dados do Google Earth para a localização e orientação;
- 2 – Com base no projeto e levantamento feito no local, fazer a modelagem 3D do edifício de estudo, assim como das edificações vizinhas para a verificação de possíveis interferências de sombreamento na área de interesse;
- 3 – A partir da localização determinada no item 1, o Sketchup determina automaticamente em que Zona Horária o local de estudo está situado – UTC-3 (do inglês *Universal Time Coordinated*);
- 4 – Para analisar o comportamento da sombra, determinar uma data de interesse – na Figura 19 está sendo usado como referência o dia 21 de dezembro – e buscar, através de tentativas, a faixa de horário em que ocorre o sombreamento parcial do sistema fotovoltaico.

Este procedimento foi repetido para o dia 21 de cada mês, para se obter uma projeção média de como o sombreamento dos edifícios vizinhos se comporta ao longo do ano. Para a análise foram observados quatro momentos do dia considerados relevantes: os horários do nascer e pôr do sol, o horário em que a sombra começa a incidir sobre o sistema FV e o horário em que a sombra atinge o primeiro módulo, desabilitando-o por inteiro e, conseqüentemente, afetando todo o sistema, pois todos os módulos estão ligados em série.

Para definir os horários de interesse para o estudo, foi observada a geometria da sombra que incide sobre a cobertura ao longo do ano e os componentes do sistema. Pela orientação do Escritório Verde em relação ao norte, a sombra do edifício vizinho se projeta de forma inclinada quando observada de cima. E o efeito do sombreamento sobre o sistema fotovoltaico já pode ser sentido nos primeiros minutos a partir do momento em que a sombra começa a atingir as primeiras células do primeiro módulo. Isso ocorre por que a ligação entre os módulos foi feita em série.

O modelo de módulo instalado no Escritório Verde possui 54 células fotovoltaicas (9 fileiras x 6 colunas) e a cada duas colunas possui um diodo de *by-pass*, que serve de proteção ao sistema quando há uma redução da produção energética causada pelo sombreamento de parte das células FV dentro do módulo.

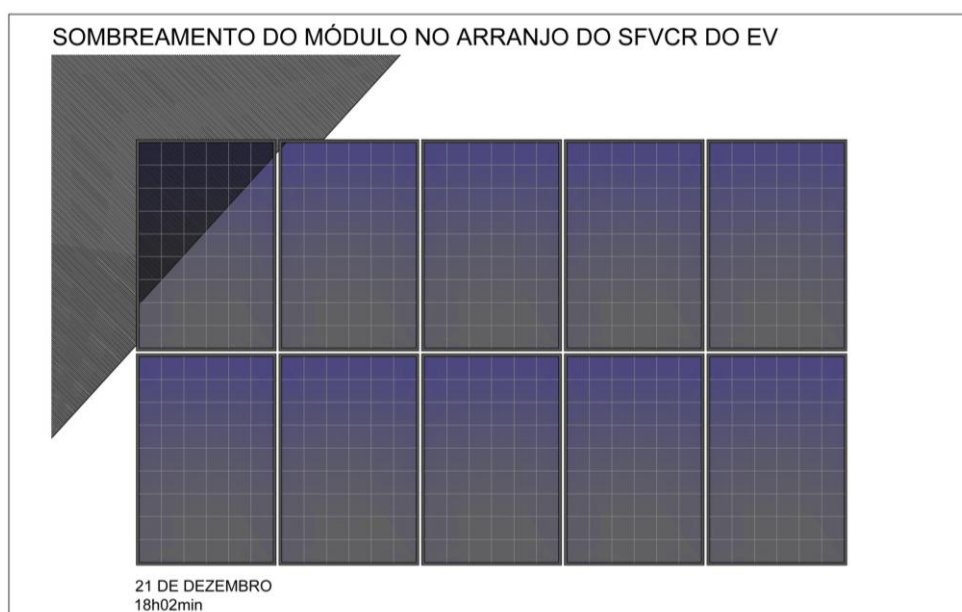
Figura 20: Sombreamento gradual sobre módulo do SFVCR do EV



Fonte: Autoria própria

Na Figura 20 pode-se observar o primeiro módulo recebendo a sombra cobrindo pouco a pouco as colunas de células fotovoltaicas. Quando a sombra atinge o primeiro terço de colunas, mesmo que parcialmente, o diodo de *by-pass* desvia a corrente, fazendo o sistema operar com $2/3$ da sua potência. O mesmo acontece quando a sombra atinge a segunda terça parte, fazendo o sistema inteiro operar com apenas $1/3$ da potência, até que a sombra atinja a terceira parte das colunas, quando o sistema é desabilitado por inteiro.

Figura 21: Arranjo do SFVCR sombreado parcialmente.

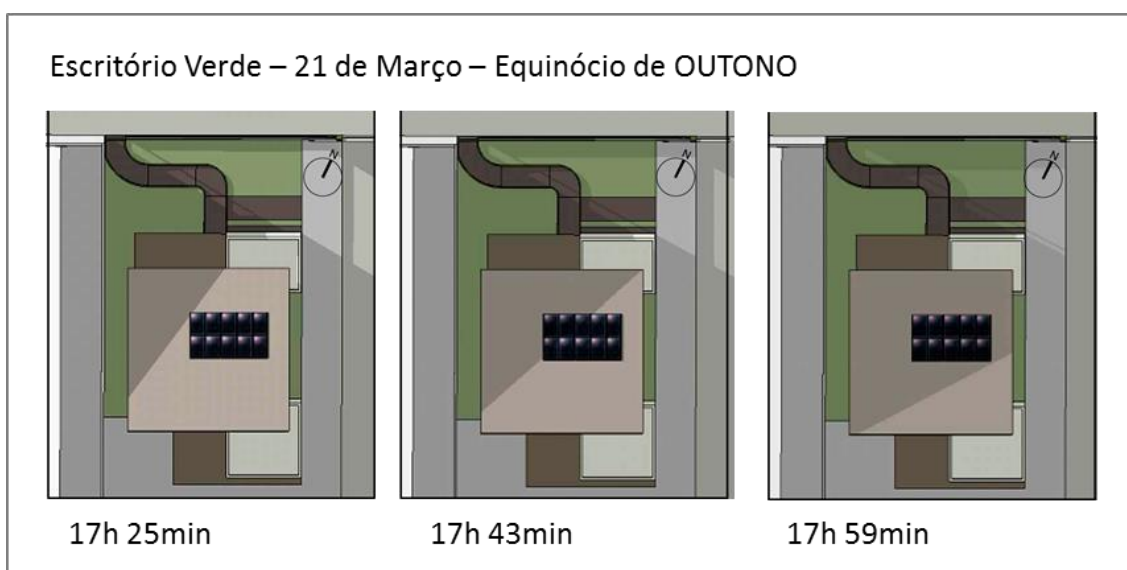


Fonte: Autoria própria

A Figura 21 mostra o momento em que todo o painel de módulos do sistema fotovoltaico reduz seu desempenho como se estivesse sombreado por inteiro, mesmo estando recebendo a radiação direta em quase todo o restante da sua área. Isso ocorre por que os módulos estão interligados em série e a produção do sistema é determinada pelo módulo sob a menor irradiação, que é quem determina a corrente de operação de todos os componentes de um arranjo (RÜTHER, 2004).

Tendo em vista as características do sistema e os horários determinados como mais relevantes para a análise, foi feito um diagrama do sombreamento para cada mês. A Figura 22, Figura 23, Figura 24 e Figura 25 mostram como o a sombra se comporta de maneira diferente ao decorrer do ano, usando como exemplo as mudanças de estações – solstícios e equinócios.

Figura 22: Sombreamento no telhado do EV - Equinócio de Outono



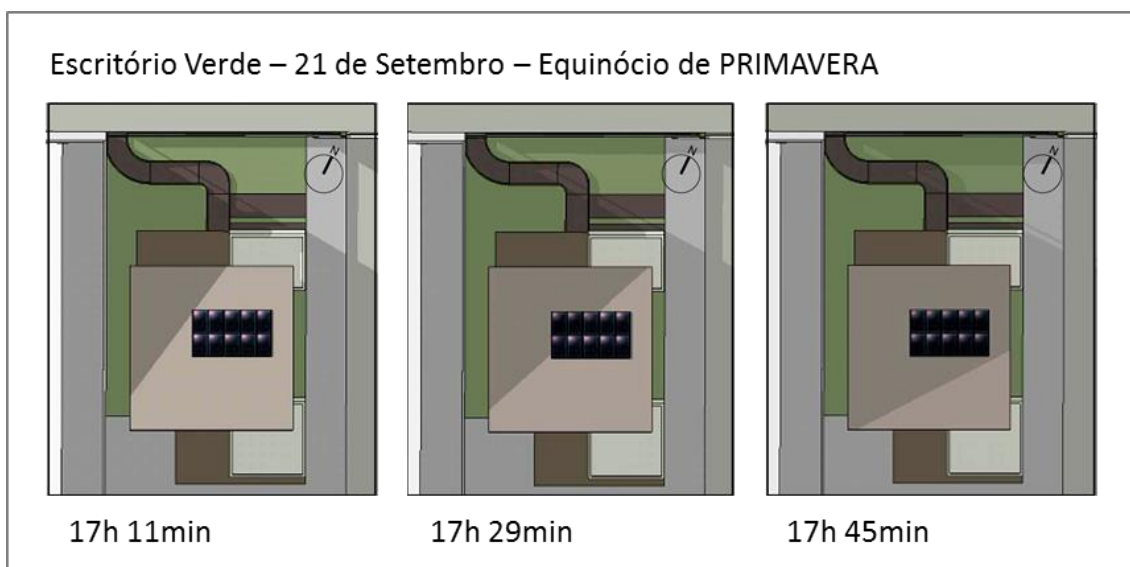
Fonte: Autoria própria

Figura 23: Sombreamento no telhado do EV - Solstício de Inverno.



Fonte: Autoria própria

Figura 24: Sombreamento no telhado do EV - Equinócio de Primavera



Fonte: Autoria própria

Figura 25: Sombreamento no telhado do EV - Solstício de Verão.



Fonte: Autoria própria

Com os dados dos diagramas mensais do sombreamento parcial coletados no modelo 3D, foi possível comparar o período sem a radiação direta com o período de horas de sol do dia. Nos meses de outono e inverno o sistema começa a ser sombreado mais cedo, porém os dias são mais curtos e por isso a duração do sombreamento também é mais curta. O oposto acontece nos dias mais longos, que ocorrem nos meses de primavera e verão, onde a sombra atinge o painel mais tarde, porém o período de sombreamento se estende por mais tempo. Os dados dos diagramas de sombras deram origem aos gráficos apresentados na Figura 28 e Figura 29.

A fotografia da Figura 26 mostra o sistema fotovoltaico aplicado no telhado do Escritório Verde no momento em que o prédio vizinho começa a sombrear os módulos. A foto foi tirada no dia 27 de outubro de 2016 às 18h28min, porém para a leitura do inversor é considerado o horário de 17h28min, devido ao horário de verão. Quando comparada com o diagrama de sombreamento retirado do software SketchUp na Figura 27, percebe-se a grande semelhança entre o estudo com a realidade.

Figura 26: Foto do SFVCR do Escritório Verde tirada em 27/10/2016.



Fonte: ARAÚJO et al., 2016

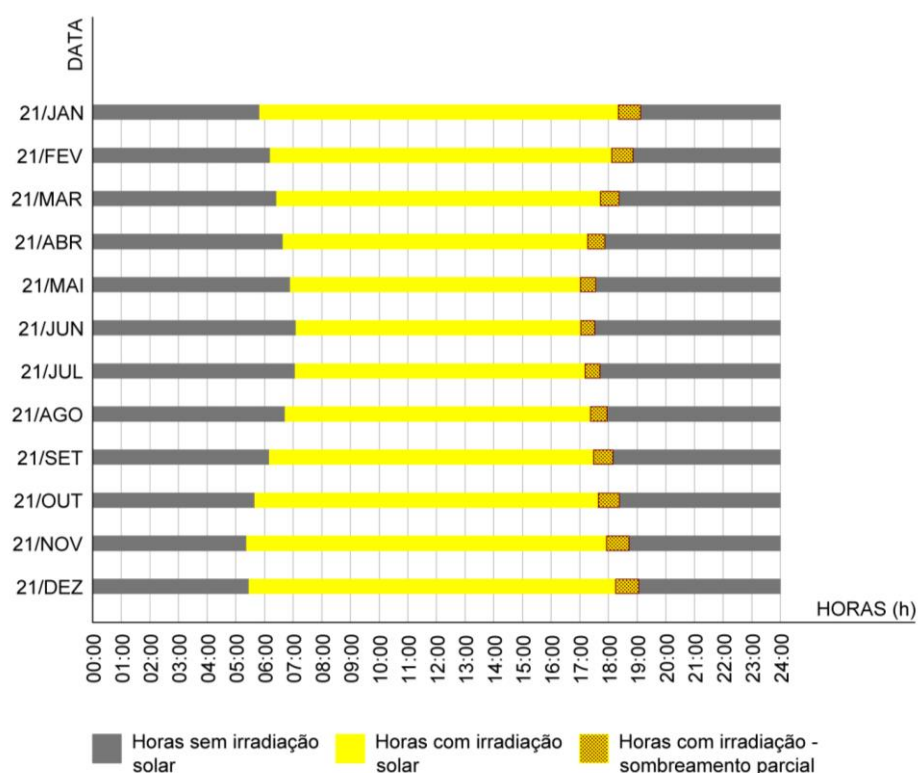
Figura 27: Diagrama de sombreamento para o dia 27/10/2016.



Fonte: Autoria própria

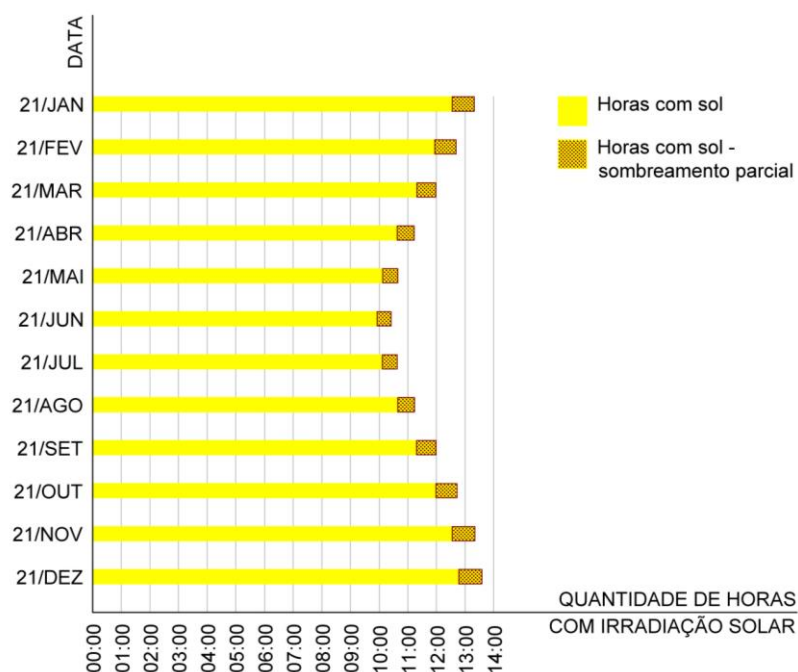
Foi verificado que há um sombreamento nos módulos do conjunto em todos os dias analisados, sempre no fim do dia. O gráfico da Figura 28 mostra a irradiação sobre o painel desde o nascer ao pôr do sol, considerando dias ensolarados, ou seja, sem considerar a nebulosidade. O gráfico da Figura 29 possui os mesmos dados, porém exclui as horas sem sol, permitindo uma melhor visualização da comparação da duração dos dias ao longo dos meses e do período sem a irradiação direta.

Figura 28: Gráfico de horários de irradiação solar e sombreamento.



Fonte: Autoria própria

Figura 29: Gráfico quantidade de horas de sol / sombreamento



Fonte: Autoria própria

3.1.2 Análise de dados no Software RADIASOL

A partir dos dados obtidos no Sketchup, foi feita uma análise no *software* RADIASOL, para encontrar um valor para a radiação direta perdida durante o período em que o sistema FV sofre o sombreamento parcial. O *software* RADIASOL é disponibilizado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, 2012), e permite, a partir da inserção dos valores de irradiação no plano horizontal, identificar os valores de radiação para qualquer plano, com diferentes inclinações e desvio azimutal em relação ao norte (URBANETZ *et al.*, 2016).

A Figura 30 apresenta o passo a passo que foi utilizado para encontrar o valor da radiação direta perdida durante o período de sombreamento parcial dos módulos fotovoltaicos do Escritório Verde, no programa RADIASOL:

Figura 30: Procedimentos para obtenção dos valores de radiação perdida

The figure consists of three screenshots of the RADIASOL software interface:

- Top-left:** Main menu with language options (Portuguese, Spanish, English) and a logo for 'Radiación Solar' and 'LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR DA UFRGS'.
- Top-right:** Selection screen for 'País' (Brazil) and 'Estação' (EV). Below is a table of monthly radiation values in kWh/m².
- Bottom:** Configuration screen for 'Angulo de Inclinação' (15) and 'Desvio Azimutal do Norte' (-22). It also shows solar times and a detailed hourly radiation table for December 21st.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Radiação em kWh/m²	5,67	5,47	5,05	4,12	3,29	3,08	3,28	4,21	4,30	5,02	5,97	5,92

	DEZ	Direta	Dfusa	Albedo	cos(0)	cos(0z)
7:30	276	45	231	1	0,339	0,4878
8:30	426	105	319	2	0,553	0,6752
9:30	566	182	382	2	0,7346	0,8281
10:30	678	257	419	2	0,8716	0,9363
11:30	744	305	436	3	0,9545	0,9923
12:30	752	313	437	3	0,9777	0,9923
13:30	702	277	423	2	0,9397	0,9363
14:30	599	209	388	2	0,843	0,8281
15:30	460	132	326	2	0,6942	0,6752
16:30	306	66	238	1	0,5034	0,4878
17:30	157	23	133	1	0,2838	0,2788
18:30	30	2	28	0	0,0501	0,0625
19:30	0	0	0	0	0	0
20:30	0	0	0	0	0	0
TOTAL	5859	1925	3913	22	3623	3506

Fonte: RADIASOL

- 1 - Na página inicial do programa inserir latitude e longitude para determinar o local exato de estudo;
- 2 - Configurar a orientação e inclinação do sistema fotovoltaico instalado no telhado da edificação – no caso do Escritório Verde, os módulos estão instalados com um desvio de 22° a oeste, em relação ao norte geográfico, e com uma inclinação de 15°, acompanhando o telhado existente;
- 3 - Determinar a data de interesse – neste caso está sendo usado como referência o dia 21 de dezembro;
- 4 - Encontrar os valores de radiação do dia 21 de dezembro, para que se possa subtrair os valores da radiação direta no período em que o sistema está sombreado parcialmente – para esta data está sendo considerado a partir das 17h30min.

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos a partir do RADIASOL para o dia 21 de cada mês. O valor que está sendo analisado neste trabalho é o da radiação direta, que é a radiação afetada pelo sombreamento do edifício vizinho no sistema FV. A partir do horário em que o primeiro módulo é atingido por inteiro (Figura 20), os valores da radiação direta são subtraídos para que se possa encontrar um percentual para a perda de radiação direta atribuída à sombra no painel. O valor médio de radiação direta perdida dos dias analisados é de 2,20%,

Tabela 2: Radiação direta perdida durante período de sombreamento do SFVCR do EV

DATA	RADIAÇÃO DIÁRIA TOTAL (kWh)	RADIAÇÃO DIÁRIA DIRETA (kWh)	RADIAÇÃO DIRETA PERDIDA (kWh)	%
21/jan	5650	1748	20	1,14
21/fev	5548	2019	18	0,89
21/mar	5291	2297	79	3,44
21/abr	4473	2001	57	2,85
21/mai	3671	1557	31	1,99
21/jun	3526	1637	31	1,89
21/jul	3687	1650	33	2,00
21/ago	4618	2349	69	2,94
21/set	4483	1335	41	3,07
21/out	5097	1509	56	3,71
21/nov	5935	2212	27	1,22
21/dez	5859	1925	25	1,30
	MÉDIA		40,58	2,20

Fonte: Autoria própria

3.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SISTEMA EXISTENTE

A análise do desempenho do sistema fotovoltaico do EV utiliza os valores de energia gerada, o período de operação e os valores de irradiação incidentes nos painéis FV. A partir da energia gerada e da irradiação incidente, calculam-se os índices de mérito do SFVCR, que são: *yield* (produtividade); *performance ratio* (taxa de desempenho) e fator de capacidade (URBANETZ *et al.*, 2016).

3.2.1 Análise da taxa de desempenho (*Performance Ratio* – PR)

Para este trabalho, o dado mais relevante é a taxa de desempenho ou *Performance Ratio* (PR). A PR é a relação entre a produtividade real do sistema FV sobre o desempenho máximo possível (kWh/kWp) e a quantidade de horas de sol a 1.000W/m² incidentes no painel FV, normalmente vinculada a um ano de operação (*performance ratio* anual), porém, pode ser também considerada a *performance ratio* mensal. Esta grandeza é expressa em porcentagem e a taxa de referência considerada satisfatória é quando alcança valores de 70 a 80% (para projetos de sistemas fotovoltaicos usa-se o referencial de 75%). A Tabela 3 apresenta a *Performance Ratio* (PR) no período de 2012 a 2015 do SFV do Escritório Verde da UTFPR (URBANETZ JR, 2016).

Tabela 3: Performance Ratio - SFVCR do EV

ANO	PR (%)
2012	71,3
2013	68,2
2014	69,7
2015	70
MÉDIA 2012 / 2015	69,80

Fonte: URBANETZ JR *et al*, 2016

3.2.2 Análise de dados de geração de energia FV

Os gráficos das figuras Figura 31,

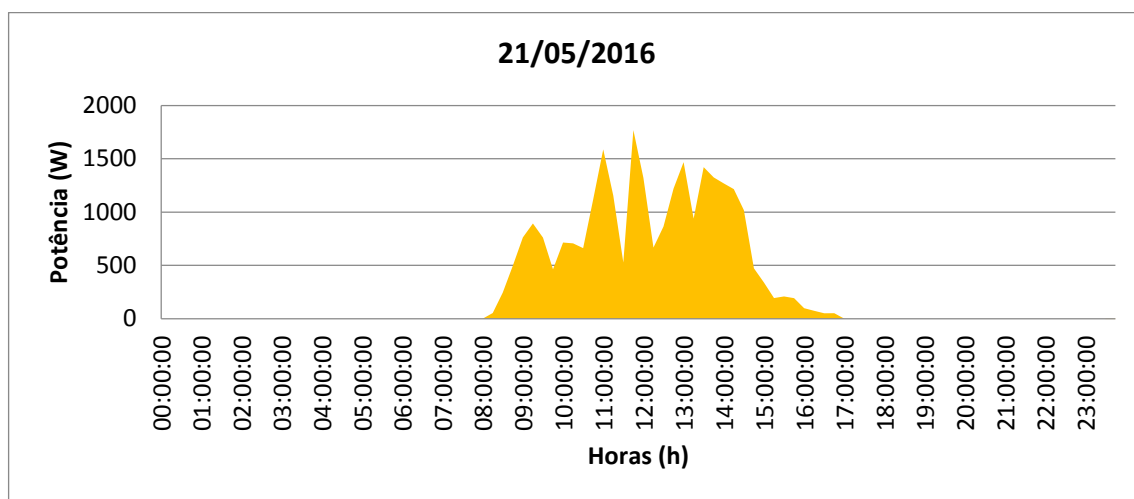
Figura 32,

Figura 33, Figura 34 e Figura 35 mostram valores reais de leitura do inversor do sistema fotovoltaico do Escritório Verde. São dados coletados a cada dia 21 dos meses de maio a setembro de 2016 e mostram a energia produzida pelo sistema durante todo o dia, com registros gerados de 15 em 15 minutos. Por se tratar de dados coletados em dias reais, o sistema sofre com a ação meteorológica de chuvas e nebulosidades, por isso radiação possui

um comportamento diferente do observado no estudo do modelo 3D, onde foi considerado um dia todo ensolarado.

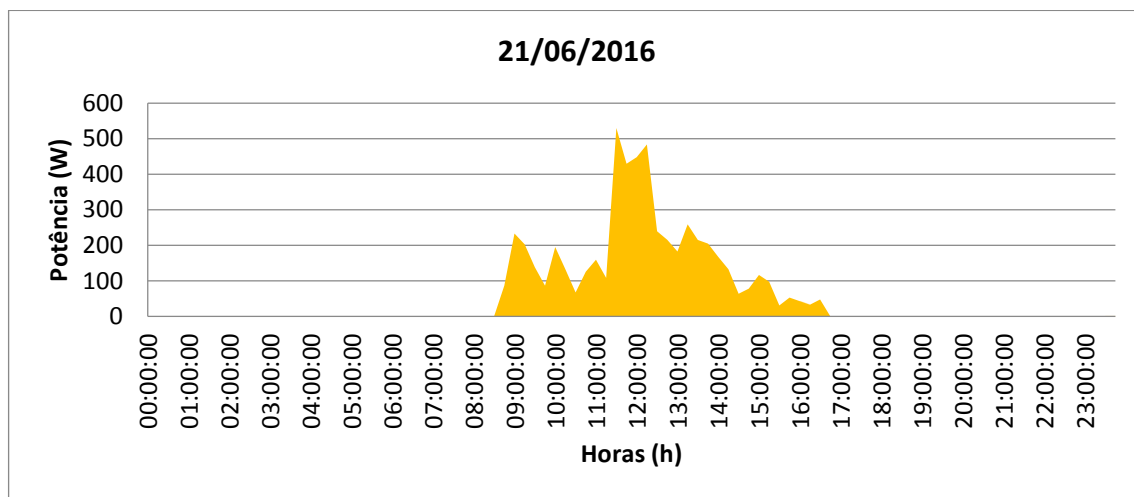
Mesmo com essas limitações da metodologia, é possível comparar os gráficos da leitura do inversor com os dados obtidos do estudo. Ao observar os gráficos, verifica-se uma queda brusca de potência ao final de cada dia, levando a entender que se não houvesse o sombreamento dos módulos neste momento, esta redução da potencia se daria de forma mais gradual.

Figura 31: Leitura do inversor para potência produzida pelo SFVCR do EV para o dia 21/05/2016



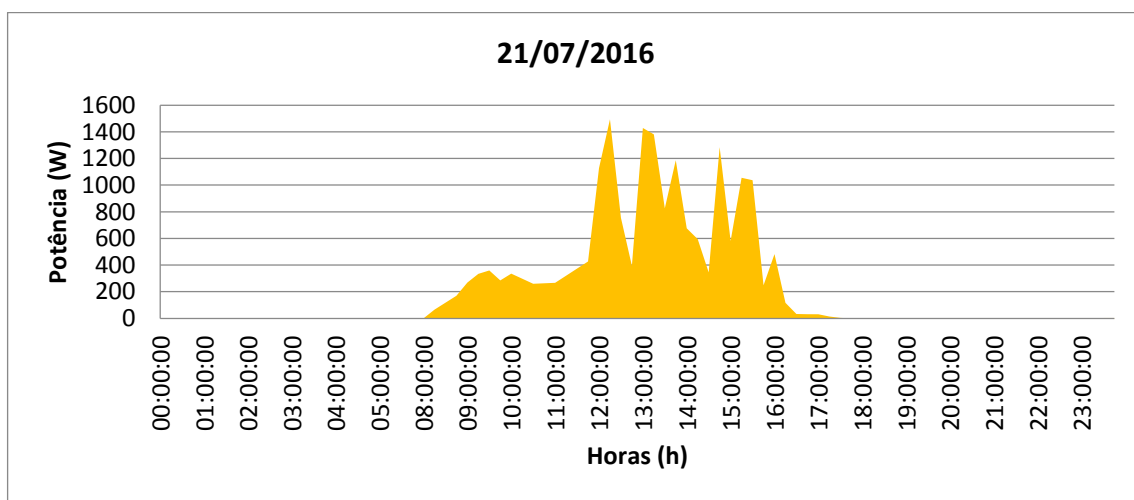
Fonte: Autoria própria

Figura 32: Leitura do inversor para potência produzida pelo SFVCR do EV para o dia 21/06/2016



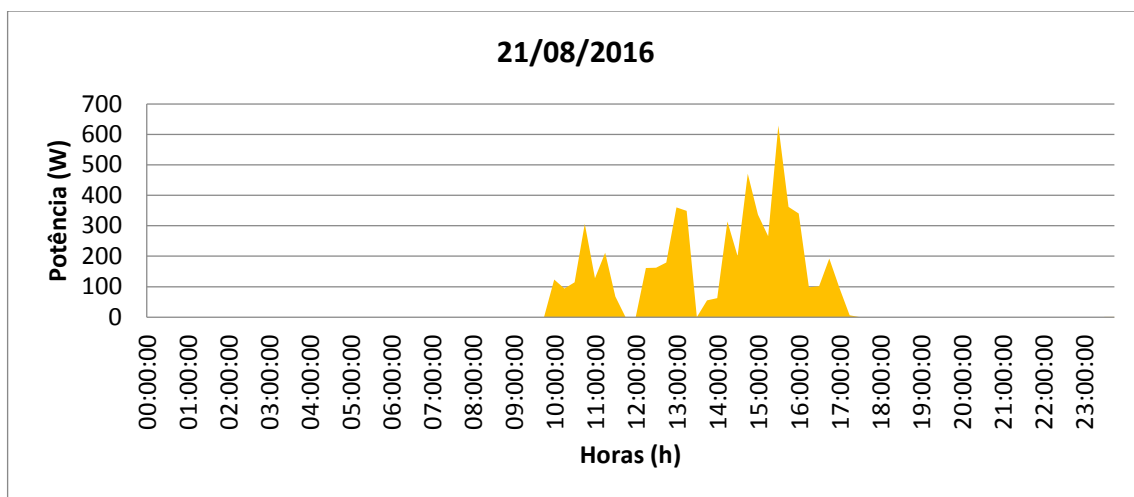
Fonte: Autoria própria

Figura 33: Leitura do inversor para potência produzida pelo SFVCR do EV para o dia 21/07/2016



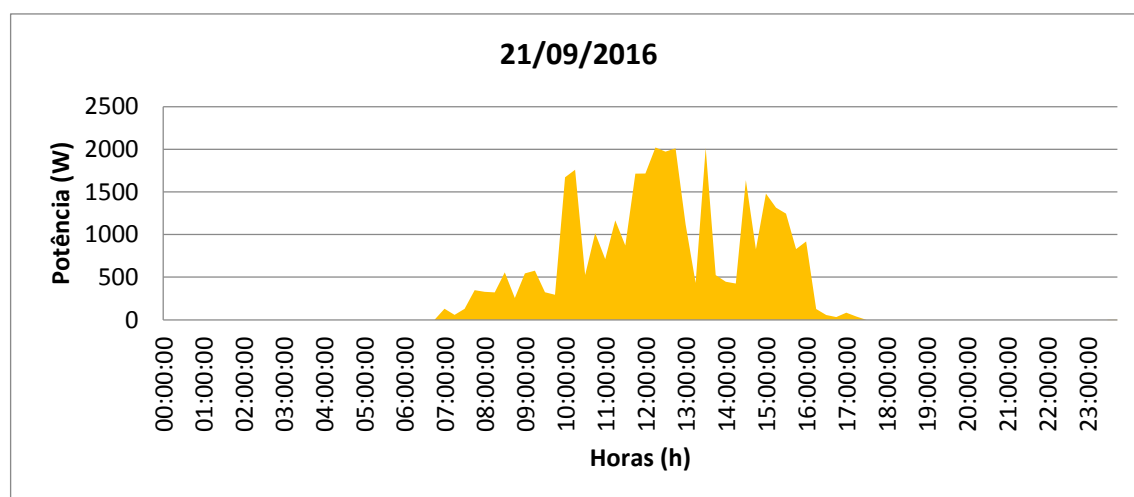
Fonte: Autoria própria

Figura 34: Leitura do inversor para potência produzida pelo SFVCR do EV para o dia 21/08/2016



Fonte: Autoria própria

Figura 35: Leitura do inversor para potência produzida pelo SFVCR do EV para o dia 21/09/2016



Fonte: Autoria própria

Os ensaios realizados e apresentados neste capítulo permitiram observar as características do sombreamento que atinge o SFVCR do EV ao longo do ano e qual a perda da radiação direta sobre o sistema e, conseqüentemente a perda de desempenho na geração de energia.

Os estudos foram realizados a partir da maquete eletrônica do edifício existente e seu entorno, e esta, por sua vez, foi feita a partir do projeto arquitetônico disponibilizado pelo EV, e medições feitas no local.

Os resultados obtidos nas simulações foram confrontados com dados de leitura do inversor instalado no EV e apesar de algumas limitações na metodologia, foi possível atribuir um valor da perda na taxa de desempenho ao sombreamento do sistema.

O capítulo de conclusões e considerações finais, a seguir, irá abordar esses assuntos detalhadamente.

4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 Conclusão

O estudo apresentado foi realizado nas dependências do Escritório Verde da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, com o intuito de investigar o desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede em relação ao efeito do sombreamento sobre o mesmo.

O Escritório Verde da UTFPR possui um conceito diferenciado e inovador para a época em que foi concebido na cidade de Curitiba-PR. Desde sua fase de projeto e construção até sua operação, o EV busca ser referência em soluções consideradas mais ecológicas e eficientes, a fim de divulgar uma prática mais sustentável na construção civil.

Dentre as soluções adotadas para a operação do escritório está a geração de energia através de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. O SFVCR do Escritório Verde é um BAPV (*Building Applied PhotoVoltaics*), ou seja, foi instalado após a construção do escritório, seguindo as condicionantes de inclinação e orientação solar da área disponível de telhado. Estas condicionantes consideradas não ideais representam algumas limitações quanto ao desempenho da produção de energia do sistema e uma delas é o sombreamento do edifício vizinho.

Neste trabalho foi feita uma análise para verificar o comportamento da sombra que o edifício vizinho projeta sobre o SFVCR do EV durante o ano, usando como base um modelo tridimensional da construção e seu entorno, realizado no *software* Sketchup e dados de radiação solar extraídos do *software* RADIASOL. Através da comparação dos dados obtidos no estudo com dados reais de leitura do inversor do SFVCR, buscou-se quantificar o efeito do sombreamento na produção de energia.

Ressalta-se que os módulos do sistema FV possuem diodos de *by-pass* com o intuito de minimizar perdas por sombreamento. E isto também foi analisado ao verificar o avanço da sombra minuto a minuto sobre os módulos do painel FV, o que foi considerado para avaliar a redução da potência disponibilizada.

Outro fator que interfere no resultado final é a interligação elétrica feita em série entre os módulos. Este tipo de ligação afeta significativamente o desempenho total no painel quando analisado em relação ao sombreamento, pois uma vez que a sombra atinge o primeiro módulo, o seu efeito impacta em todo o conjunto. No estudo foram apresentados gráficos de geração de energia elétrica colhidos no sistema, onde fica evidente esta redução da produção energética ao fim do dia – período de sombreamento do sistema.

Para este trabalho foi considerado o sombreamento no dia 21 de cada mês. Esta amostra deve ser considerada como uma média do comportamento da sombra durante o ano todo, mostrando a mudança da projeção da sombra e duração dos dias durante o ano todo. Para identificar as componentes da radiação total, foi utilizado o *software* RADIASOL, que segrega os valores da radiação direta e da difusa, considerando dados de um dia típico.

De posse dos valores da radiação e dos horários da projeção da sombra sobre o sistema (que foram extraídos da modelagem tridimensional do Sketchup), foram subtraídos os valores referentes à radiação direta, que é justamente o fator afetado pelo sombreamento do arranjo. A redução dos valores de radiação direta resultou em uma perda da irradiação total média de 2,2% nos dias analisados, o que impacta diretamente na taxa de desempenho do referido sistema (*Performance Ratio – PR*). Logo, conclui-se que caso não houvesse a sombra da edificação vizinha, a PR observada do SFVCR do Escritório Verde, que nos últimos anos se mostrou em cerca de 70%, poderia ser elevado para aproximadamente 72,2%, levando em direção ao valor típico de 75%.

Mesmo o valor percentual da perda diária na irradiação sendo considerado pequeno, é importante identificar e quantificar as variáveis que interferem no desempenho de um SFVCR, a fim de minimizá-los. Este estudo mostra ainda como é impactante sobre o painel FV o sombreamento de um módulo, ainda que parcial.

O sombreamento em um sistema fotovoltaico afeta diretamente o seu desempenho, e deve ser sempre evitado. Ele pode se dar de muitas maneiras, algumas delas temporárias e impossíveis de se prever. As condicionantes do entorno do local de inserção ou da própria arquitetura da edificação sempre devem ser analisadas, para que se possa minimizar o efeito sobre o sistema.

É de grande importância um estudo aprofundado do local onde será instalado um sistema fotovoltaico e a previsão do sombreamento auxilia nas decisões de arquitetos e projetistas, desde o posicionamento do sistema, até nos seus componentes e interligações elétricas. Se quantificado previamente o impacto deste sombreamento, o dimensionamento do sistema também será mais preciso e otimizado.

4.2 Sugestões

Como sugestão de trabalhos futuros, seguindo esta mesma ideia, mas buscando resultados ainda mais precisos, pode ser feita uma análise completa de todos os dias do ano, ampliando o banco de dados e possibilitando chegar a um resultado final com valores mais próximos à realidade. E em vez de usar o *software* RADIASOL, que usa dados de irradiância de um dia típico, fazer medições de irradiância ao longo dos dias, identificando com maior clareza a quantidade de energia solar que efetivamente chega à superfície do telhado do Escritório Verde.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Resolução Normativa nº 482. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2012. Brasil, 12p.

ARAÚJO, A. J. N.; RANK, N. I.; BUENO, T. B. A. **Análise dos fatores de perdas nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em Curitiba.** TCC de Engenharia Elétrica; UTFPR; 2016

BRAUN-GRABOLLE, P. **A integração de sistemas solares fotovoltaicos em larga escala no sistema elétrico de distribuição urbana.** (Tese de Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2010.

DGS. **PLANNING AND INSTALLING PHOTOVOLTAIC SYSTEMS. A guide for installers, architects and engineers.** Londres, 402 p. 2008.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2016: Relatório síntese – ano base 2015.** Rio de Janeiro, RJ, 2016. 62 p.

ESCRITÓRIO VERDE UTFPR, 2016. Disponível em: <<http://www.escriptorioverdeonline.com.br/>> Acesso em: 12 de setembro de 2016.

GOOGLE EARTH. Programa Google Earth. 2016.

GREENPEACE. **Revolução energética: a caminho do desenvolvimento limpo.** Brasil, 2010. 40 p.

JARDIM, C. D. S. **A Inserção da Geração Solar Fotovoltaica em Alimentadores Urbanos Enfocando a Redução do Pico de Demanda Diurno.** (Tese de Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 166 p. 2007.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura.** 3ª Edição. Brasil, 2013. 382 p. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf> Acesso em: 12 de setembro de 2016.

NORMAS TÉCNICAS COPEL. NTC 905100 - **Manual de Acesso de Geração Distribuída ao Sistema da Copel.** Paraná, 155 p. 2010.

NOTA TÉCNICA EPE. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira.** Rio de Janeiro, 64 p. 2012.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. D.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, São José dos Campos: 2006.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Grupo de Trabalho de Energia Solar –GTES, CEPEL -CRESESB. 2014.

RÜTHER, R. **EDIFÍCIOS SOLARES FOTOVOLTAICOS: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil**. 1. ed. Florianópolis: UFSC/LABSOLAR, 114p. 2004.

SANTOS, Í. P. **Desenvolvimento de Ferramenta de Apoio à Decisão em Projetos de integração Solar Fotovoltaica à Arquitetura**. (Tese de Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2013.

TRIMBLE. **SketchUp Pro**. 2016.

UFRGS.**RADIASOL Versão 2.1** Porto Alegre, 2001.

URBANETZ JR, J. **Energia Solar Fotovoltaica – Notas de Aula**. V Curso de Especialização em Construções Sustentáveis; UTFPR; 2016.

URBANETZ JR, J. **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade**. (Tese de Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 189 p. 2010.

URBANETZ JR, J.; TONIN, F. S.; MARIANO, J. D. *Performance of photovoltaic system of the UTFPR - Analysis of four years of operation*. Florianópolis, 2016.

VARELLA, F., GOMES, R. D. M., JANUZZI, G. M. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação**. Campinas: International Energy Initiative e Universidade de Campinas, 2009.

ZOMER, C. D. **Método de Estimativa da Influência do Sombreamento Parcial Na Geração Energética de Sistemas Solares Fotovoltaicos Integrados em Edificações**. (Tese de Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 258 p. 2014.

ZOMER, C. D.; URBANETZ, J.; RÜTHER, R. **Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas: Compromissos entre Forma e Função**. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES – São Paulo, 2012.

