

O DESEMPENHO DE PROTETORES SOLARES FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS A EDIFÍCIOS INSTITUCIONAIS

THE PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC SHADING DEVICES INTEGRATED INTO INSTITUTIONAL BUILDINGS

 **Maurício Picetti dos Santos**¹

 **Ísis Portolan dos Santos**²

 **Isabel Tourinho Salamoni**³

¹ Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, mauriciopicetti@gmail.com

² Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, isis.santos@ufsm.br

³ Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil, isabel.salamoni@ufpel.edu.br

Resumo

A energia solar fotovoltaica é uma importante fonte de energia renovável que reduz o impacto ambiental e aproxima a geração elétrica das unidades de consumo, diminuindo as perdas na transmissão de energia. Além disso, as características geométricas dos módulos fotovoltaicos permitem a sua integração com a envoltória do edifício, estabelecendo componentes passivos para a promoção da eficiência energética. Quando instalados nas unidades consumidoras na forma de protetores solares, os módulos fotovoltaicos limitam os ganhos térmicos nos ambientes internos a partir do controle da incidência de irradiação solar, podendo também reduzir o consumo energético por climatização. Assim, este artigo avaliou o desempenho de propostas de protetores solares fotovoltaicos integrados ao edifício Instituto de Redes Inteligentes da Universidade Federal de Santa Maria quanto à geração de energia elétrica e a influência no consumo elétrico da edificação. Para isso, foi avaliada a geração energética do conjunto fotovoltaico, através de simulação no software PVsyst v6.8, e estimado o consumo energético na edificação no software DesignBuilder v6.1. A partir das simulações, verificou-se que os protetores solares fotovoltaicos, compostos por 34 módulos, apresentaram desempenho superior ao conjunto de mesma quantidade de módulos e instalado na cobertura do modelo virtual, desenvolvendo uma redução de 21,94 MWh/m².ano na resultante energética do modelo. Assim, a inserção de módulos fotovoltaicos na forma de protetores solares surge como alternativa para a integração em edificações com área de cobertura reduzida, apresentando geração similar aos sistemas tradicionais, além de permitir a diminuição do consumo elétrico.

Palavras-chave: sistemas fotovoltaicos, protetores solares, eficiência energética.

Contribuição dos autores:

MPS: conceituação, curadoria de dados, análise formal, investigação, metodologia, administração de projetos, validação, visualização, escrita - rascunho original, escrita - revisão e edição. **IPS:** conceituação, curadoria de dados, metodologia, administração de projetos, supervisão, validação, escrita - rascunho original, escrita - revisão e edição. **ITS:** conceituação, metodologia, supervisão e validação.

Fomento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul.

Declaração de conflito: nada foi declarado.

Editora Responsável:
Letícia de Oliveira Neves 

Abstract

Photovoltaic solar energy is an important source of renewable energy with less environmental impact. It brings electricity generation closer to consumption units and reduces losses in energy transmission. In addition, the geometric characteristics of photovoltaic modules allow integration with the building envelope, establishing passive components to promote energy efficiency. Acting in the consumer units as a solar shading component, they limit the thermal gains in indoor environments, controlling solar irradiation incidence and reducing energy consumption by air conditioning. This article evaluated the performance of photovoltaic integrated shading devices in the building Institute of Intelligent Networks of the Federal University of Santa Maria regarding the generation of electricity and its influence on the electricity consumption of the building. Simulations were performed in the PVsyst v6.8 software to evaluate the energy generation of the photovoltaic set and in the DesignBuilder v6.1 software to estimate the energy consumption of the building. The photovoltaic integrated shading devices, composed of 34 modules, performed better than the set of the same number of modules installed on the roof of the virtual model, reducing 21.94 MWh/m².year the resulting energy consumption of the model. Therefore, the insertion of photovoltaic modules in the form of shading devices appears as an alternative for integration in buildings with reduced coverage area, presenting a similar generation to traditional systems and reducing electricity consumption.

Keywords: photovoltaic systems, solar shading, energy efficiency.

How to cite this article:

SANTOS, M. P. dos; SANTOS, Ísis P. dos; SALAMONI, I. T. O desempenho de protetores solares fotovoltaicos integrados a edifícios institucionais. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 13, p. e022019, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v13i00.8664618>

Submitted 20.02.2021 – Approved 21.03.2022 – Published 01.06.2022

e022019-1 | **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 13, p. e022019, 2022, ISSN 1980-6809



Introdução

O crescimento da população mundial, orientado em uma cultura progressivamente tecnológica, favorece a expansão de produtos industrializados com significativa carga energética embutida. No Brasil, ainda, o aumento da demanda por energia está relacionado ao desenvolvimento econômico e mudanças na qualidade de vida da população. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (EPE, 2017), o crescimento da renda de grande parte da população brasileira, nesta década, favoreceu o acesso à infraestrutura básica (habitação, saneamento e transporte), o que representou um aumento no consumo de energia.

No país, nos últimos anos, a oferta de energia acompanhou o crescimento do consumo. De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN), no ano-base 2019, o consumo final de energia elétrica aumentou em 1,3%, em relação a 2018; enquanto a oferta interna de energia aumentou 2,3%. A matriz elétrica brasileira tem base em fontes renováveis, representando 83,0% da oferta interna de energia elétrica, sendo a fonte hídrica o principal recurso com 64,9% do total da energia gerada. Entretanto, esta geração ocorre centralizada e distante dos pontos de consumo, favorecendo perdas em sua distribuição e transmissão, representando 7,33% da energia gerada, em 2019, e relacionadas ao desvio de energia, estimada em 6,44% (ANEEL, 2020; EPE, 2020).

Nesse sentido, a geração distribuída oferece vantagens ao setor elétrico aproximando as unidades geradoras dos pontos de consumo, além de promover a diversidade de tecnologias utilizadas para a geração de energia. Com a Resolução ANEEL nº 687/2015, foram estabelecidos critérios para o desenvolvimento da geração distribuída de energia, que possibilitam, aos consumidores, a geração a partir de recursos renováveis e o fornecimento da energia excedente à rede de distribuição. Entre as vantagens implantadas pela resolução, estão a diminuição em investimentos na expansão de redes elétricas, menor impacto ambiental, decréscimo na sobrecarga da rede elétrica, redução nas perdas durante a transmissão e distribuição de energia e a diversificação da matriz energética (ANEEL, 2015).

Então, a tecnologia fotovoltaica, com fonte na energia solar, é fundamental para a expansão e variabilidade da matriz energética brasileira ao favorecer a geração de energia elétrica distribuída em sistemas de menor potência instalada sobre edifícios. Em dezembro de 2020, esta fonte de energia correspondeu a aproximadamente 1,7% da matriz energética brasileira, atingindo uma potência instalada superior a 7,2 GW (crescimento de 101,6% comparado ao período de 2019), dos quais 4,25 GW (59%) corresponderam a geração distribuída em residências, comércios, indústrias e propriedades rurais (ABSOLAR, 2020).

Além disso, devido às suas características geométricas, os módulos fotovoltaicos podem ser integrados às unidades consumidoras como componentes passivos para melhorar a eficiência energética de edificações. Constituído elementos de sombreamento, permitem o controle da incidência de irradiação solar sobre ambientes internos, implicando na diminuição da carga térmica da edificação, reduzindo a demanda de energia em equipamentos de climatização e racionalizando o uso de energia (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Desse modo, o objetivo geral deste trabalho é avaliar o impacto de um conjunto proposto de protetores solares fotovoltaicos no balanço energético de uma unidade consumidora, relacionando a geração de energia elétrica com a sua influência no consumo de energia da edificação. Para isso, foi adotado como modelo de estudo a edificação do Instituto de Redes Inteligentes da Universidade Federal de Santa Maria (RS) devido a sua atuação no desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao tema

fotovoltaico e perspectiva da execução da proposta. Entre os objetivos específicos, está o estabelecimento de um modelo de protetor solar fotovoltaico que atenda à função de geração elétrica e atue na redução do consumo elétrico; confrontando o desempenho com um conjunto fotovoltaico hipotético de referência e inserido, de modo convencional, na cobertura da edificação.

Referencial teórico

A popularização da geração fotovoltaica em unidades consumidoras orienta estudos sob a forma de instalação desta tecnologia em edificações. Segundo Rüter (2004), devido a sua geometria e composição, os módulos fotovoltaicos inseridos nas edificações podem desenvolver funções arquitetônicas, pertencendo ao plano de decisões projetuais. Quando integrados a edificações, substituindo componentes convencionais, ou aplicados em estruturas preexistentes, podem revestir fachadas, constituir coberturas, compor elementos de sombreamento, entre outros.

Nesse sentido, em função das possibilidades de inserção, os módulos fotovoltaicos podem atuar como componentes passivos em estratégias bioclimáticas a fim de promover o conforto ambiental no interior de edificações. Jovanovic *et al.* (2017) avaliaram o uso de módulos fotovoltaicos na constituição de uma parede Trombe em edificações nas cidades de Podgorica (Montenegro) e Changsha (China). O sistema composto pelo conjunto fotovoltaico, câmara de ar e a parede externa das edificações permite acumular a energia térmica, a partir da radiação solar incidente sobre os módulos, e propagá-la gradualmente para os ambientes internos, tornando-se uma estratégia bioclimática de aquecimento passivo para climas frios.

Dobrzycki *et al.* (2020) avaliaram a influência de módulos fotovoltaicos utilizados como revestimento de paredes para a geração energética e redução do consumo elétrico em uma edificação industrial de Poznan (Polônia). Assim, verificaram que o uso de módulos fotovoltaicos, nestas condições, ampliou a resistência térmica da parede, reduzindo o consumo energético em aquecimento e possibilitando a geração elétrica para a edificação. Rodrigues, Carlo e Oliveira Filho (2018), por sua vez, analisaram a integração de módulos fotovoltaicos semitransparentes a esquadrias na cidade de São Paulo. Através de simulação computacional, desenvolveram um método de modelagem das propriedades térmicas dos módulos para verificar a influência do calor gerado pelo sistema na temperatura interna dos ambientes. Então, constataram que a integração ampliou a temperatura média do ambiente e a temperatura superficial das janelas.

Em regiões de clima tropical ou subtropical, com elevados índices de irradiação solar, é necessário o desenvolvimento de projetos que atribuam protetores solares na envoltória, considerando o sombreamento uma estratégia bioclimática indicada. Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), no Brasil, as edificações deveriam atender as necessidades de sombreamento, considerando a radiação solar um importante fator para o ganho térmico em ambientes; porém, esta situação não ocorre diante de inúmeras edificações que não exploram técnicas para proteção solar.

Assim, foram desenvolvidos modelos avaliativos de protetores solares como ferramentas projetuais para verificar a influência na eficiência energética da edificação. A Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C), que especifica requisitos técnicos e métodos para a classificação destes edifícios quanto à sua eficiência energética, identifica os ângulos de sombreamento desenvolvidos por protetores solares nas aberturas das edificações, como parâmetro para a avaliação do desempenho da envoltória na variação do consumo energético (INMETRO, 2021).

Pereira e Souza (2008) desenvolveram um método para avaliar a necessidade de aplicação de protetores solares em aberturas de edifícios. O estudo levou em consideração dados climatológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e, com base nos dados de temperatura horária dos meses do ano, determinou a temperatura neutra mensal, que representa o centro da zona de conforto térmico. O método permite, para diferentes localidades, obter diretrizes para projetos de protetores solares de acordo com o período em que a incidência de irradiação solar é aceitável. Assim, promove o desenvolvimento de protetores solares que poderão obstruir a incidência de irradiação solar excessiva como causa de sobrecarga térmica, em dias quentes, e possibilita a incidência de irradiação solar como fonte de aquecimento interno para os dias frios.

Evangelisti *et al.* (2020) desenvolveram um modelo de avaliação do desempenho de protetores solares sobre as janelas de uma edificação localizada em Roma (Itália). Considerando a temperatura superficial externa do vidro, identificaram protetores solares que atingiram uma redução de 38,7% da carga térmica sobre as janelas da edificação no verão. Segundo os autores, o modelo de análise pode ser utilizado no desenvolvimento de dispositivos de proteção solar e para avaliações preliminares do projeto. Leitzke *et al.* (2017), através de simulação computacional, avaliaram o desempenho de protetores solares fixos e móveis em um modelo de edificação, nas zonas bioclimáticas 1 e 8, para os percentuais de conforto térmico e consumo elétrico. A partir dos resultados, foi possível identificar a proposta de protetor adequada ao modelo.

Cartana e Pereira (2016), considerando o controle da incidência de irradiação solar sobre ambientes como parâmetro para a manutenção do conforto e eficiência energética, analisaram o desempenho lumínico de protetores solares elaborados com modelagem paramétrica e algoritmos evolutivos. Com os resultados, concluíram que os elementos desenvolvidos favoreceram a distribuição da luz natural nos ambientes, destacando a importância da compreensão da geometria solar e métodos de sombreamento. Ghosh e Neogi (2018) simularam distintos protetores solares e avaliaram a influência no consumo energético em condicionamento e iluminação artificial para uma edificação situada em Calcutá (Índia). Verificaram que os fatores geométricos dos protetores influenciaram diretamente no consumo elétrico, visto que um modelo de protetor solar personalizado à edificação superou o desempenho de protetores genéricos e desprovidos de estudos sobre a trajetória solar.

Nos estudos de integração de protetores solares com sistemas fotovoltaicos, Hofer *et al.* (2016) desenvolveram um método para a constituição de protetores solares fotovoltaicos a partir da análise do padrão de sombreamento individual dos módulos e do rendimento energético do sistema. O método pode ser utilizado como ferramenta projetual, visto que possibilita o desenvolvimento de protetores solares fotovoltaicos com geometrias complexas. Li *et al.* (2017), também, avaliaram os ângulos de inclinação ideais para protetores solares fotovoltaicos, em cidades da China, para a máxima geração energética e redução no consumo elétrico. Por fim, Stamatakis, Mandalaki e Tsoutsos (2016) realizaram uma análise multicritério para determinar o desempenho de protetores solares fotovoltaicos em edificações na região do Mediterrâneo. Os modelos foram avaliados para os parâmetros de geração de energia, redução no consumo energético em condicionamento e iluminação artificial e conforto lumínico; sendo, posteriormente, classificados de acordo com a aceitabilidade dos usuários.

Método

O processo metodológico foi dividido em cinco etapas. Na primeira etapa, a edificação foi caracterizada com o levantamento espacial e volumétrico para, na segunda etapa, ocorrer o dimensionamento do protetor solar a partir das condições geométricas do módulo fotovoltaico. Ainda, foi constituído um conjunto fotovoltaico de referência permitindo a comparação entre os sistemas. Na terceira etapa, o protetor solar fotovoltaico e o conjunto de referências foram avaliados para a geração de energia e, na quarta etapa, avaliou-se a influência no consumo energético em um modelo virtual da edificação. Por fim, na quinta etapa, foi desenvolvido o balanço energético do modelo com a inserção dos conjuntos fotovoltaicos, averiguando o desempenho dos sistemas na relação entre geração energética e redução de consumo elétrico.

Caracterização da edificação

O Instituto de Redes Inteligentes (INRI) está localizado na Universidade Federal de Santa Maria, campus Camobi, em Santa Maria (RS) e foi adotado para a avaliação de um protetor solar fotovoltaico devido a suas características físicas e vocação para aplicação desta tecnologia. No edifício, há uso de vidros com películas para tratamento da obstrução da incidência de irradiação solar e uso intenso de climatizadores artificiais nos ambientes, indicando ganhos térmicos excessivos no interior da edificação. Por fim, a função da edificação, constituída de laboratórios para ensaios em sistemas fotovoltaicos, predispõe a aprovação da instalação de protetores solares fotovoltaicos para, inclusive, ser utilizada em ensaios e pesquisas posteriores. A Figura 1 apresenta perspectivas externas e panorâmica do Instituto.

Figura 1 – Instituto de Redes Inteligentes da UFSM (INRI/ UFSM)

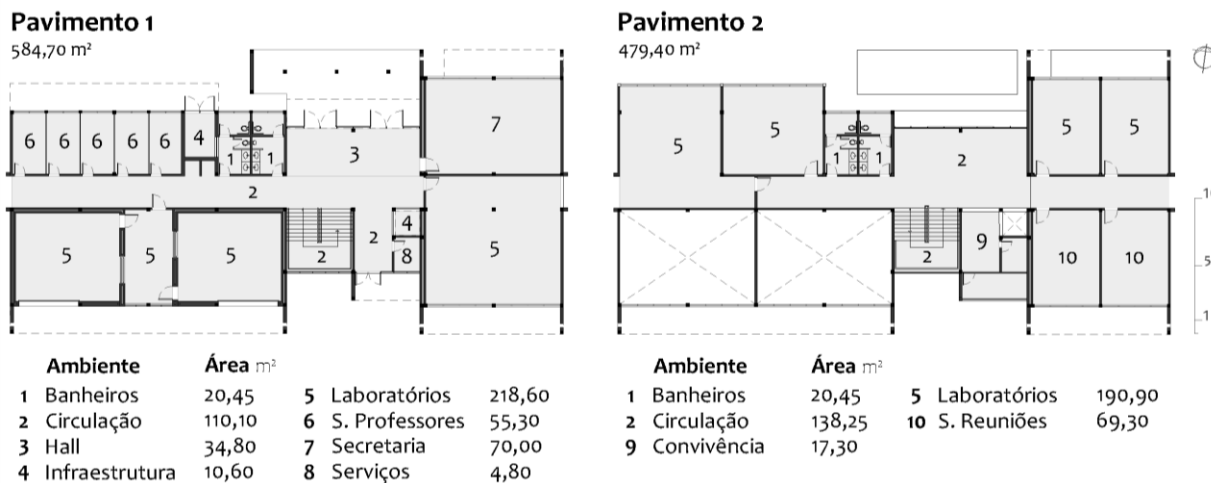


Fonte: os autores.

A edificação apresenta fachada principal na face norte com rotação em 8°, no sentido anti-horário, com recuos, beirais e marquises que determinam exposições distintas às aberturas pela incidência solar. Nesta face, predominam ambientes de elevado consumo energético devido a potência instalada em equipamentos, iluminação e maior ocupação dos usuários, como laboratórios, secretaria e salas de professores.

O Instituto apresenta 1.064,10 m² de área total construída sendo constituído por: hall, secretaria, laboratórios, sala de professores, salas de reunião, banheiros, áreas de circulação, convivência (copa e estar), serviços (depósito) e infraestrutura (subestação e área para elevador) distribuídos em dois pavimentos. A Figura 2 apresenta a distribuição dos ambientes no interior da edificação.

Figura 2 – Zoneamento do Instituto de Redes Inteligentes da UFSM (INRI/ UFSM)

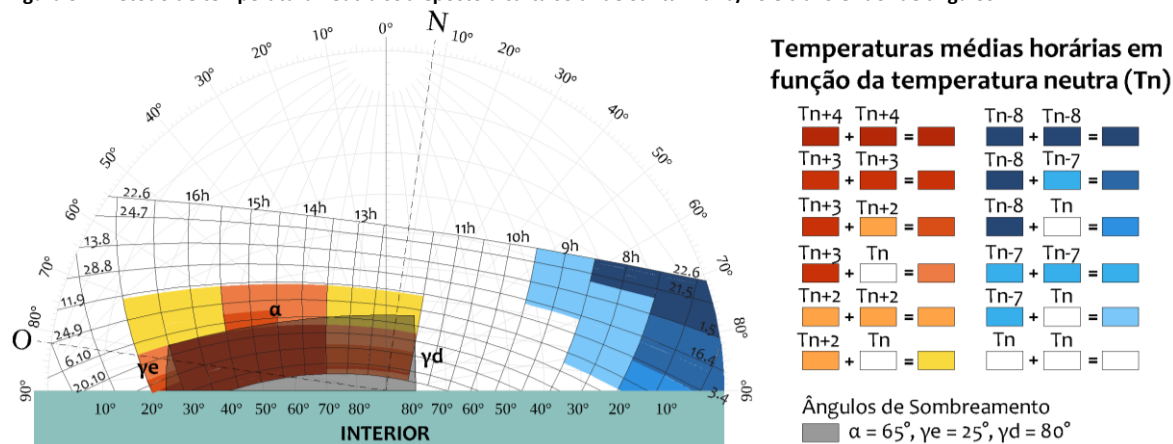


Fonte: os autores.

Dimensionamento dos protetores solares fotovoltaicos

Os protetores solares foram elaborados para a fachada norte da edificação diante da necessidade de obstrução da incidência de irradiação solar sobre as aberturas nesta orientação. Nas fachadas leste e oeste não ocorrem ambientes de trabalho com aberturas, exceto corredores, e na fachada sul não há incidência excessiva. Então, no dimensionamento dos protetores solares, foi utilizado o método de avaliação da temperatura neutra, desenvolvido por Pereira e Souza (2008), que permite associar a obstrução da irradiação solar à zona de conforto térmico em um ambiente, ampliando a eficiência energética da edificação. A Figura 3 apresenta a carta solar para a cidade de Santa Maria (RS), na zona bioclimática 2, com a escala de temperaturas médias horárias em função da temperatura neutra e a máscara de sombreamento indicada.

Figura 3 – Método de temperatura neutra sobreposto à carta solar de Santa Maria/RS e transferidor de ângulos



Fonte: adaptado de Pereira e Souza (2008).

Na composição das médias horárias, o centro da zona de conforto térmico foi identificado pela temperatura neutra (Tn), sendo a temperatura onde uma população

em atividade sedentária apresenta conforto térmico. Este parâmetro, segundo Pereira e Souza (2008), foi obtido pela Equação 1 (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2006).

$$T_n = 0,31T_e + 17,6^{\circ}\text{C} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

T_n é a temperatura neutra ($^{\circ}\text{C}$);

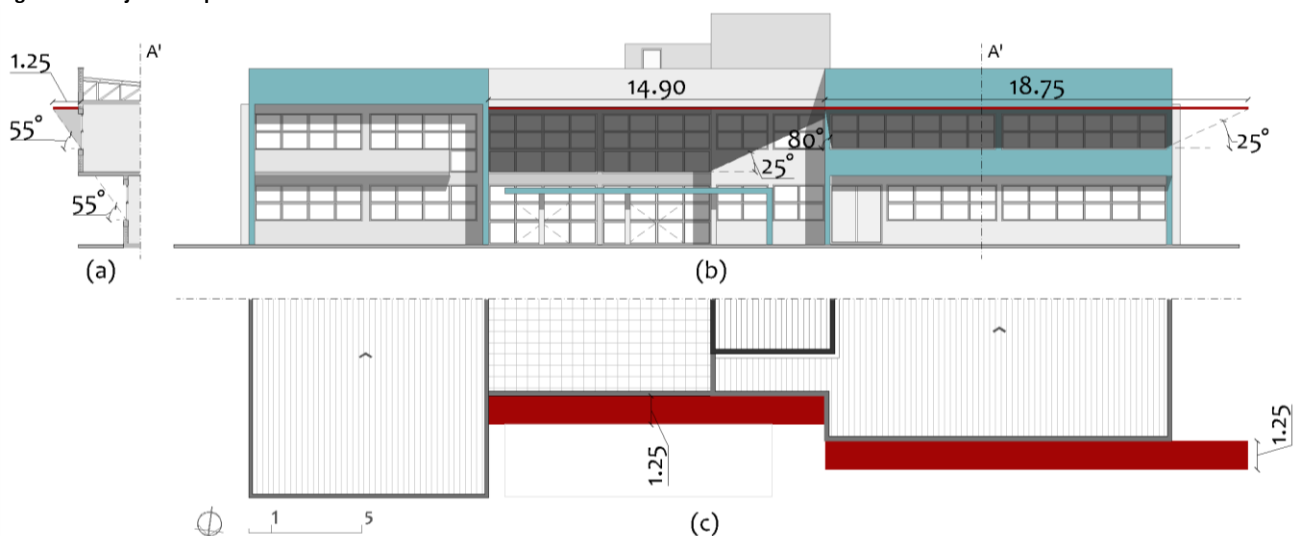
T_e é a temperatura do ar média mensal ($^{\circ}\text{C}$), obtida pelas Normais Climatológicas do INMET (INMET, 1992).

A partir disso, $T_n + x$ representa temperaturas médias horárias superiores à temperatura de conforto, enquanto $T_n - x$ representa temperaturas inferiores. Assim, é possível a identificação de períodos de desconforto térmico - por aquecimento e resfriamento - e períodos identificados em conforto térmico devido à temperatura neutra (T_n).

Utilizando o transferidor de ângulos, foram obtidos os ângulos necessários para o sombreamento nos períodos com temperaturas médias excedentes à zona de conforto na localidade. A definição da área de sombreamento segue adaptações das diretrizes estabelecidas pelo RTQ-R (ELETROBRÁS, 2012), destacando que as proteções solares não são necessárias quando o período de sombreamento for inferior a dois meses após as 17h00, além de favorecer a incidência de irradiação solar em períodos de temperatura média inferior à temperatura neutra - quando a irradiação poderá ser utilizada como fonte para aquecimento de ambientes. Então, para o desenvolvimento do protetor solar, foram considerados, inicialmente, os ângulos γ_d (80°) e γ_e (25°), como delimitadores do comprimento do protetor, e α (65°), para sua profundidade, em relação às aberturas da edificação.

Na fachada norte, os protetores solares sobrepõem-se às aberturas da área de circulação e laboratórios no segundo pavimento. Não foram desenvolvidos protetores para os ambientes do primeiro pavimento, visto que já apresentam componentes de sombreamento formados por marquises ou recuos das aberturas. A Figura 4 demonstra a configuração apropriada para os protetores solares sobre os conjuntos de aberturas e adaptadas às condições volumétricas da edificação.

Figura 4 – Conjunto de protetores solares sobre aberturas da fachada norte



Fonte: os autores.

A Figura 4 apresenta as dimensões mínimas para o sistema de proteção solar. Na Figura 4a, o ângulo de sombreamento α origina os protetores com profundidade de de,

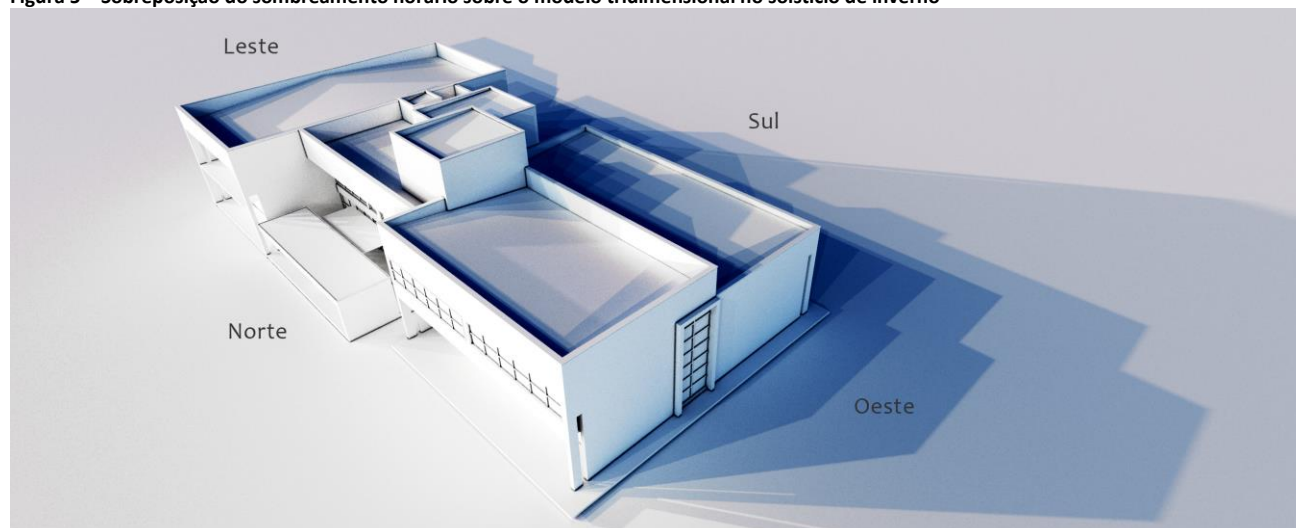
aproximadamente, 1,25 m, aplicados à 0,20 m sobre as aberturas. Na Figura 4b, em vista frontal, são apresentadas as dimensões gerais para o comprimento dos protetores horizontais definidos pelos ângulos γ_d e γ_e , bem como a área de sombreamento desenvolvida. A Figura 4c apresenta, em planta baixa, os conjuntos de proteção solar delimitados pela volumetria da edificação.

Então, os protetores solares foram adaptados a partir de um conjunto de módulos para a definição dos protetores solares fotovoltaicos, adequando-se às dimensões e inclinações de sombreamento pré-estabelecidas. Para tanto, adotou-se um módulo fotovoltaico de silício monocristalino com dimensões de 2.067 mm x 1.046 mm, potência de 435 w e eficiência energética de 20,1%, obtendo etiqueta de classificação energética A e atingindo uma produção média de energia de 54,38 kWh/mês (PROCEL, 2021). De modo a satisfazer a máxima geração energética, os módulos foram inclinados à 30° ao norte, como indicação, segundo o software PVsyst v6.8, para a maior geração energética na localidade de Santa Maria (29° 41' 29" sul e 53° 48' 3" oeste).

Com o intuito de desenvolver um modelo de referência para estimar o desempenho dos protetores solares fotovoltaicos, foi avaliado um posicionamento considerado ideal para a reprodução da quantidade de módulos que compõem os protetores. Dessa forma, foi utilizado o recurso *Daylight System*, do software 3D Studio Max v2021, que, a partir das coordenadas geográficas da localidade, permite simular a trajetória solar e identificar a forma de dispersão da iluminação natural sobre a volumetria do modelo.

Então, este foi avaliado para o dia 20 de junho de 2020 – data do solstício de inverno - em períodos de uma hora, iniciando às 8h e finalizando às 18h. Neste período, de menor altura solar, há ocorrência de sombras prolongadas que condicionam a geração elétrica a perdas devido ao sombreamento dos módulos. A posição ideal para a inserção do conjunto fotovoltaico de referência, então, surge com a sobreposição do sombreamento horário no modelo da edificação, conforme Figura 5.

Figura 5 – Sobreposição do sombreamento horário sobre o modelo tridimensional no solstício de inverno



Fonte: os autores.

De acordo com a Figura 5, a cobertura norte, na extremidade oeste da edificação, apresenta maior área útil para inserção do conjunto fotovoltaico de referência devido a suas dimensões e menor sombreamento. No entorno da edificação não são verificados componentes promotores de sombreamentos significativos, visto que a ocorrência de sombras tem origem, predominantemente, a partir da própria volumetria da edificação.

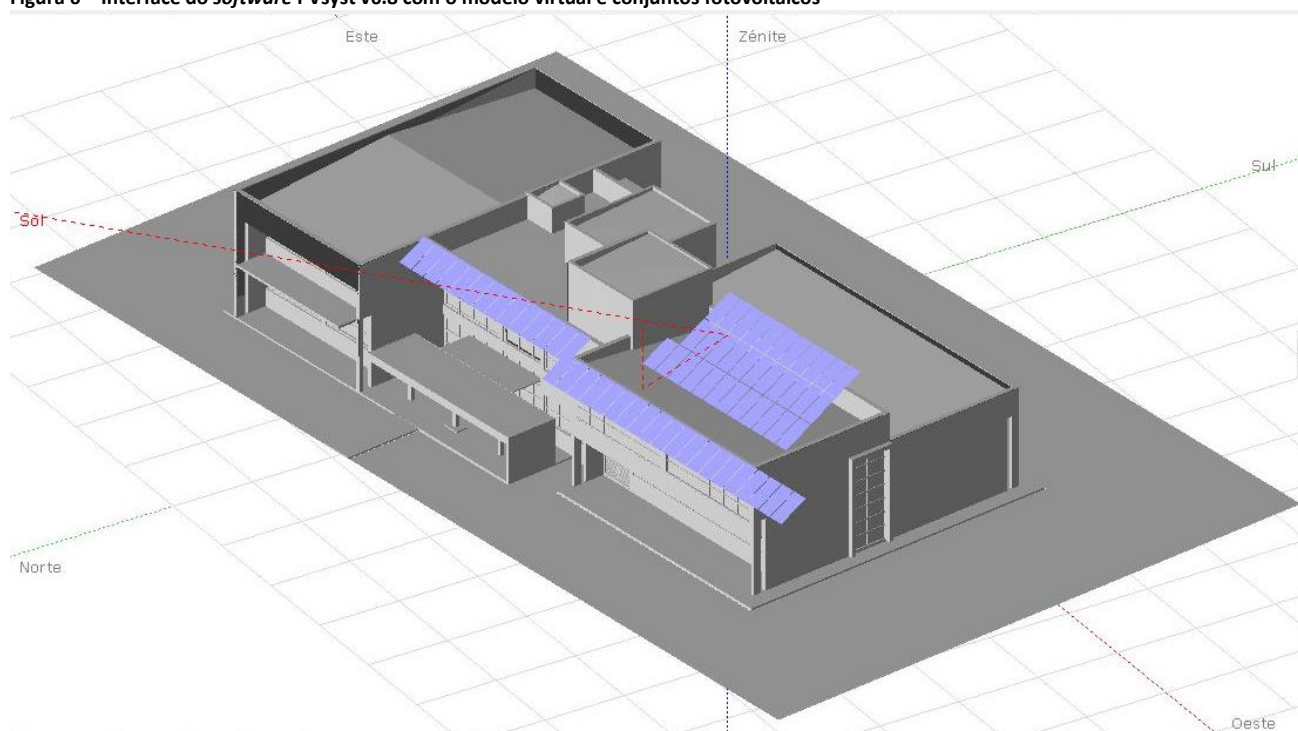
Geração de energia

Na avaliação da geração de energia elétrica dos conjuntos fotovoltaicos, foi utilizado o *software* PVsyst v6.8. Este possibilita a avaliação tridimensional da proposta em acordo com dados geográficos e meteorológicos locais e componentes comerciais de sistemas fotovoltaicos, produzindo relatórios de desempenho, quantitativos da geração energética e fatores que compõem perdas nos sistemas. Nesta pesquisa, foram avaliados os parâmetros de *irradiação global efetiva*, como irradiação útil incidente sobre os módulos, *energia efetiva gerada*, como energia produzida pelos módulos fotovoltaicos, e *perdas* de geração no sistema.

Apesar de os inversores e equipamentos de transmissão determinarem a eficiência da transferência da energia elétrica gerada pelos módulos em energia injetada na rede, esta pesquisa não avalia as perdas relativas à transmissão e conversão de energia. Isto decorre das características de cada conjunto fotovoltaico na edificação, como dimensões e disposição espacial, que orientam perdas energéticas distintas em transmissão, inviabilizando uma avaliação equivalente entre os conjuntos.

A Figura 6 apresenta, em perspectiva, o modelo virtual da edificação com os conjuntos fotovoltaicos para a simulação da geração energética.

Figura 6 – Interface do *software* PVsyst v6.8 com o modelo virtual e conjuntos fotovoltaicos



Fonte: os autores.

Nas simulações computacionais, a caracterização do modelo virtual deve considerar os detalhes volumétricos e a orientação espacial a fim de corresponder às condições observadas no modelo real. Assim, conforme a Figura 6, a volumetria da edificação foi representada de acordo com o levantamento físico do Instituto, visto que seus componentes desenvolvem sombreamentos e dispersões da irradiação solar sobre os conjuntos fotovoltaicos de formas distintas, influenciando na irradiação global efetiva, geração elétrica e quantitativo de perdas.

Consumo de energia

Para avaliar a influência dos conjuntos fotovoltaicos no consumo energético do modelo virtual, foi aplicado o software DesignBuilder v6.1. Assim, foi utilizado o arquivo climático SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) disponível para a localidade e obtido a partir do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLAR/UFSC), possibilitando a simulação climática para avaliações termoenergéticas no modelo representado.

Na constituição do modelo virtual do Instituto de Redes Inteligentes, foram levantados os dispositivos elétricos, componentes construtivos e caracterizadas as atividades da edificação. Assim, foram consideradas a densidade de ocupação nos ambientes e a taxa metabólica para desempenho da atividade, conforme a ISO (2005) e ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2019), e níveis de iluminância de acordo com a normativa NBR ISO/CIE 8.995-1 (ABNT, 2013). Na configuração da iluminação nos ambientes, foram consideradas densidades de potência adequadas para o desempenho das atividades, que exigem elevada precisão, sendo adotados índices do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) para a classificação energética A e através do método das atividades da edificação, quando a densidade de potência é específica para cada ambiente e atividades desempenhadas (INMETRO, 2021).

A potência instalada em equipamentos foi obtida a partir do levantamento dos aparelhos característicos em cada ambiente, em uma relação entre o somatório das cargas e a área média dos espaços. Os parâmetros utilizados para a caracterização da edificação são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Densidade de ocupação, taxa metabólica, componentes de iluminação e equipamentos do modelo virtual

Ambiente	Densidade de Ocupação (pessoas/m ²)	Taxa Metabólica (W/pessoa)	Iluminância (lux)	Densidade de Potência em Iluminação (W/m ²)	Densidade de Potência em Equipamentos (W/m ²)
Secretaria	0,14	70	500	11,90	14,36
Banheiros	0,20	58	200	5,0	-
Hall e Circulação	0,10	110	100	7,1	1,13
Laboratórios	0,25	93	500	10,2	6,25
Convivência	0,30	58	200	6,00	14,45
S. Reuniões	0,40	70	500	11,90	7,07
S. Professores	0,06	70	300	11,90	5,06
Serviços	0,10	116	100	6,0	-
Infraestrutura	-	-	-	6,0	-

Fonte: ABNT (2008, 2013), ASHRAE (2019), INMETRO (2021), ISO (2005).

O condicionamento artificial foi considerado nos ambientes de maior ocupação, como secretaria, laboratórios, salas de professores e de reuniões. Nestes, o equipamento adotado foi um modelo comercial de Split Inverter, identificado nos ambientes, com Coeficiente de Performance (COP) de 3,28 W/W para aquecimento, Índice de Eficiência de Energia (*Energy Efficiency Ratio*, EER) de 3,24 W/W para refrigeração e taxa de fluxo de ar ventilado interno de 1.100 m³/h.

No controle do condicionamento artificial, foi adotado como *setpoint* (temperatura ideal quando o ambiente está ocupado) de aquecimento a temperatura de 20 °C e, para resfriamento, de 26 °C; enquanto a temperatura de *setback* (quando desocupado) de até 12 °C e 30 °C respectivamente. Nos demais ambientes, compostos pelos banheiros, hall e circulação, área de convivência e serviços, foram consideradas contribuições por ventilação natural com taxas de trocas de ar por hora de 5,0 renovações/h.

Para a caracterização da envoltória, foram utilizados a norma de Desempenho Térmico de Edificações (ABNT, 2005) e o Catálogo de Propriedades Térmicas (INMETRO, 2017). Os componentes adotados para a configuração do modelo são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Componentes da envoltória

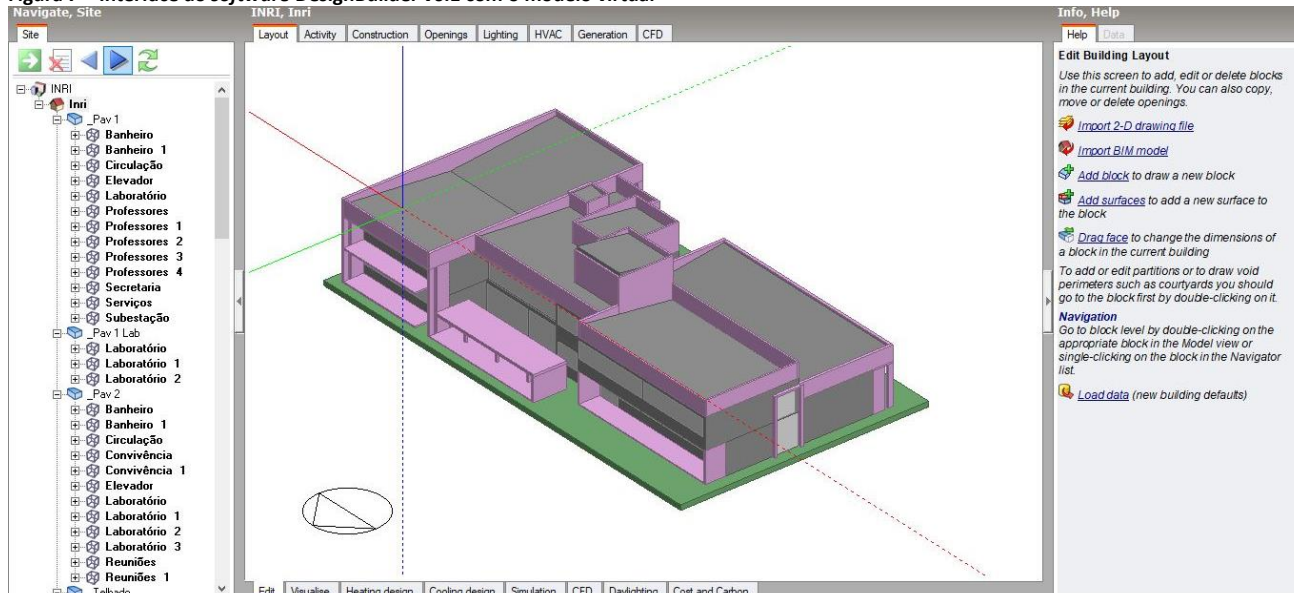
Elementos	Componentes	Transmitância Térmica (W/m²K)	Capacidade Térmica (kJ/m²K)	Absortância (α)
Paredes Gerais	Parede de tijolos de 6 furos assentados na menor direção. Dimensões do tijolo: 14,0 x 19,0 x 29,0 cm. Espessura da argamassa interna e externa: 2,5 cm.	1,85	161,00	0,20
Parede de Laboratório	Parede dupla de tijolos de 6 furos assentados na maior dimensão, com isolamento acústico/térmico e espessura de 40,0 cm. Dimensões do tijolo: 14,0 x 9,0 x 24,0 cm. Espessura da argamassa externa e interna: 2,5 cm. Espessura do isolamento em Lã de Rocha: 7 cm.	0,40	229,8	0,70
Laje	Laje pré-moldada de concreto: 12,0 cm. Espessura do piso cerâmico: 1,0 cm.	2,95	167,00	0,80
Piso Cerâmico	Espessura da argamassa e contrapiso: 3,0 cm. Espessura da laje: 12,0 cm.	2,67	239,40	0,65
Cobertura	Laje maciça: 10,0 cm Câmara de ar: superior a 5,0 cm Telha de fibrocimento: 0,60 cm	2,07	233,00	0,70

Fonte: ABNT (2005), EPE (2017).

As janelas são do tipo maxim-ar, com perfil de alumínio e com vidro incolor com espessura de 3 mm e fator solar (Fs) de 0,87 (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Ainda, foi considerada a influência térmica dos módulos fotovoltaicos sobre a edificação e, para tanto, adotado o valor de transmitância térmica de 8,61 W/m².K (RUSCHEL; GASPARIN; KRENZINGER, 2015).

A Figura 7 apresenta o modelo virtual constituído no software DesignBuilder v6.1 a partir do levantamento físico e dos componentes de consumo e da envoltória.

Figura 7 – Interface do software DesignBuilder v6.1 com o modelo virtual



Fonte: os autores.

O consumo elétrico no modelo virtual foi configurado a partir de cronogramas de uso conforme as características de ocupação do edifício. Assim, as rotinas foram organizadas em meses de férias (janeiro e fevereiro), quando as atividades nos espaços

são reduzidas, em meses intermediários (março, julho, agosto e dezembro), com ocupação parcial dos ambientes, e em meses letivos (abril, maio, junho, setembro, outubro e novembro), quando as atividades ocorrem tipicamente. Também, os horários foram distintos em período de ocupação (8h às 12h e 14h às 18h), intervalo (12h às 14h) e período de desocupação (18h às 8h). Por fim, buscando gerenciar os componentes de consumo elétrico, os cronogramas de acionamento para climatização, equipamentos, iluminação e ocupação em cada ambiente foram determinados em percentuais.

A Tabela 3 apresenta os cronogramas de utilização, em percentuais, dos componentes do consumo elétrico nos ambientes do modelo virtual.

Tabela 3 – Cronogramas e utilização (%) dos ambientes

Local	Componente de Consumo	Férias				Intermediário				Letivo			
		8 às 12h	12 às 14h	14 às 18h	18 às 8h	8 às 12h	12 às 14h	14 às 18h	18 às 8h	8 às 12h	12 às 14h	14 às 18h	18 às 8h
Secretaria	Climatização	100	25	100	0	100	25	100	0	100	25	100	0
	Equipamentos	100	25	100	0	100	25	100	0	100	25	100	0
	Iluminação	100	25	100	0	100	25	100	0	100	25	100	0
	Ocupação	100	25	100	0	100	25	100	0	100	25	100	0
Banheiros	Climatização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Equipamentos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Iluminação	100	100	100	0	100	100	100	0	100	100	100	0
	Ocupação	25	25	25	0	25	75	25	0	25	100	25	0
Circulação	Climatização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Equipamentos	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Iluminação	100	100	100	25	100	100	100	25	100	100	100	25
	Ocupação	25	50	25	0	25	50	25	0	25	50	25	0
Laboratórios	Climatização	100	25	100	0	100	25	100	0	100	25	100	0
	Equipamentos	50	25	50	25	75	25	75	25	100	25	100	25
	Iluminação	100	25	100	0	100	25	100	0	100	25	100	0
	Ocupação	100	25	100	0	100	25	100	0	100	25	100	0
Convivência	Climatização	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0
	Equipamentos	75	100	75	75	75	100	75	75	75	100	75	75
	Iluminação	25	100	25	0	25	100	25	0	25	100	25	0
	Ocupação	25	50	25	0	25	75	25	0	25	100	25	0
Reuniões	Climatização	0	0	0	0	25	0	25	0	50	0	50	0
	Equipamentos	0	0	0	0	25	0	25	0	50	0	50	0
	Iluminação	0	0	0	0	25	0	25	0	50	0	50	0
	Ocupação	0	0	0	0	25	0	25	0	50	0	50	0
Professores	Climatização	100	25	100	0	50	25	50	0	25	25	25	0
	Equipamentos	100	25	100	0	50	25	50	0	25	25	25	0
	Iluminação	100	25	100	0	50	25	50	0	25	25	25	0
	Ocupação	100	25	100	0	50	25	50	0	25	25	25	0
Serviços	Climatização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Equipamentos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Iluminação	50	25	50	0	50	25	50	0	50	25	50	0
	Ocupação	50	25	50	0	75	50	75	0	100	50	100	0

Fonte: os autores.

No cronograma de climatização, quando os aparelhos de ar condicionado apresentam percentuais acima de 50%, o *software* interpreta como ambientes ocupados, utilizando a temperatura de *setpoint* para aquecimento e resfriamento. Percentuais menores ou iguais a 50% e superiores a 0% indicam ambientes desocupados, operando em temperatura de *setback*, enquanto percentuais em 0% indicam o ar condicionado inativo. Nos cronogramas de equipamentos e iluminação, os percentuais indicam a taxa de utilização da densidade de potência e, no cronograma de ocupação, indicam o perfil de uso do ambiente pela densidade de ocupação (DESIGNBUILDER, 2010).

Balanço energético

Para avaliar o desempenho dos conjuntos fotovoltaicos na promoção da eficiência energética sobre o modelo virtual, foi realizado o balanço energético. Através desse parâmetro, que permite relacionar a geração energética e a variação na demanda de energia no modelo promovida pelos conjuntos fotovoltaicos, estima-se identificar a resultante energética ao longo do ano e equiparar o desempenho entre os conjuntos na forma de protetores solares fotovoltaicos, posicionados na cobertura do modelo. Então, no desenvolvimento do balanço energético, foi considerada a diferença entre a energia elétrica consumida no modelo virtual e a energia efetiva gerada pelos sistemas fotovoltaicos por unidade de área, conforme a Equação 2.

$$Be = (\sum Ec - \sum Eg) \div At \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

Be é o balanço energético (MWh/m²);

Ec é a energia elétrica consumida (MWh);

Eg é a energia elétrica efetiva gerada (MWh);

At é a área total do modelo virtual (m²).

A energia elétrica consumida é relativa à demanda energética em equipamentos, iluminação e dispositivos de condicionamento artificial, enquanto a energia efetiva gerada corresponde à energia elétrica gerada no terminal dos módulos fotovoltaicos.

Resultados

Os modelos constituídos para as simulações energéticas apresentam os protetores solares fotovoltaicos na forma de brises horizontais na fachada norte, enquanto o conjunto fotovoltaico de referência é aplicado na cobertura devido a maior área útil e exposição à incidência de irradiação solar. A Figura 8 demonstra, em perspectiva, a simulação do Instituto de Redes Inteligentes com a aplicação dos conjuntos.

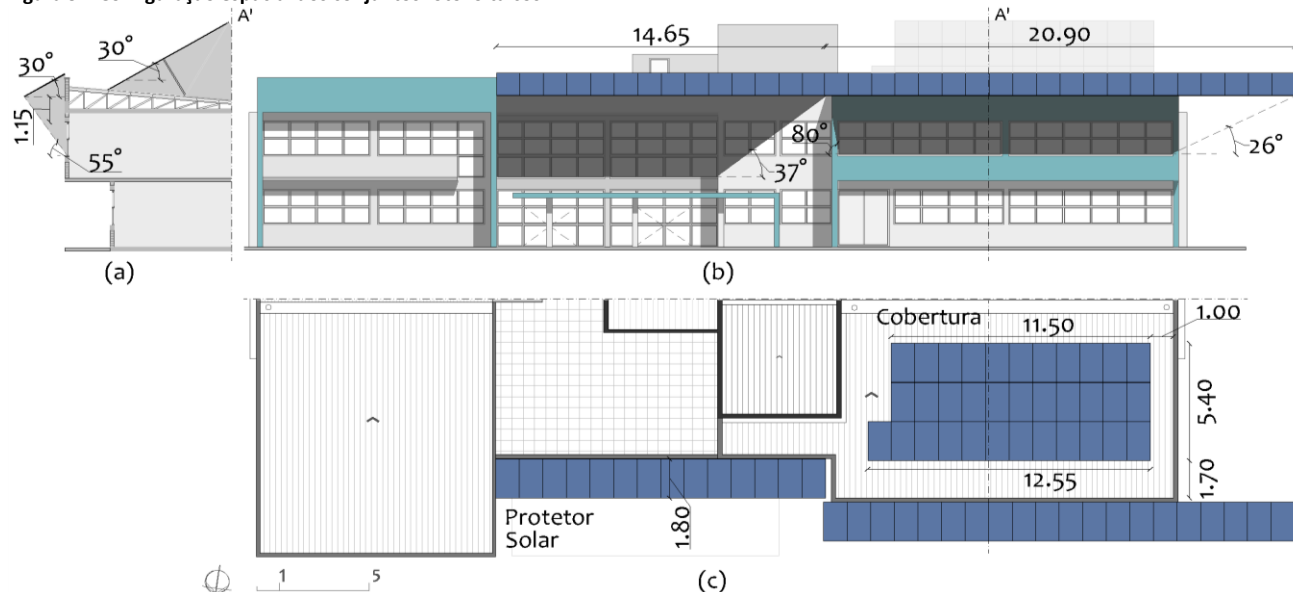
Figura 8 – Perspectiva da edificação com simulação da aplicação dos conjuntos fotovoltaicos



Fonte: os autores.

Os protetores solares são constituídos por 34 módulos fotovoltaicos que, a partir de suas características geométricas, satisfazem a área de sombreamento necessária para a obstrução da incidência solar sobre as aberturas. Na composição, 14 módulos são inseridos sobre a área de circulação e 20 módulos sobre os laboratórios; enquanto, na cobertura do modelo virtual, o conjunto de referência é composto por 34 módulos. A Figura 9 apresenta a espacialização dos conjuntos fotovoltaicos com suas dimensões e afastamentos obtidos a partir dos estudos de sombreamento e geração elétrica.

Figura 9 – Configuração espacial dos conjuntos fotovoltaicos



Fonte: os autores.

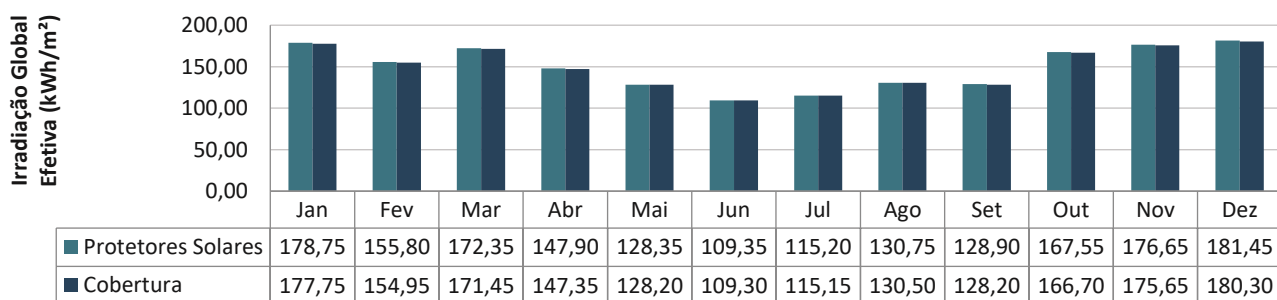
A Figura 9a apresenta, em corte, o módulo fotovoltaico satisfazendo o ângulo de sombreamento necessário às aberturas da edificação e preservando a inclinação para a geração energética. Nesta configuração, os módulos foram deslocados para, aproximadamente, 1,15 m acima da altura das esquadrias a fim de manter o ângulo de sombreamento α em 55°. Sobre a cobertura, é verificado o conjunto fotovoltaico de referência, em mesma inclinação, instalado em uma estrutura convencional e promovendo sombreamento em parte do telhado da edificação.

A Figura 9b indica as dimensões gerais para o comprimento dos protetores solares fotovoltaicos desenvolvidos. Considerando as dimensões dos módulos, os protetores solares foram reajustados para que a sua extensão permitisse a aproximação aos ângulos de sombreamento obtidos. Em 10c, são apresentadas as dimensões gerais para o conjunto da cobertura e seu afastamento de componentes da cobertura da edificação.

Geração de energia

Na simulação da geração de energia elétrica, através do software PVsyst v6.8, foram obtidos resultados para a *irradiação global efetiva*, *energia efetiva gerada* e *perdas*. A irradiação global efetiva representa a irradiação global incidente sobre os módulos e corrigida por perdas relacionadas ao ângulo de incidência da irradiância e sombreamento. A Figura 10 apresenta os níveis de irradiação global efetiva mensal sobre os módulos fotovoltaicos dos conjuntos de protetores solares e cobertura.

Figura 10 – Irradiação Global Efetiva (kWh/m²)



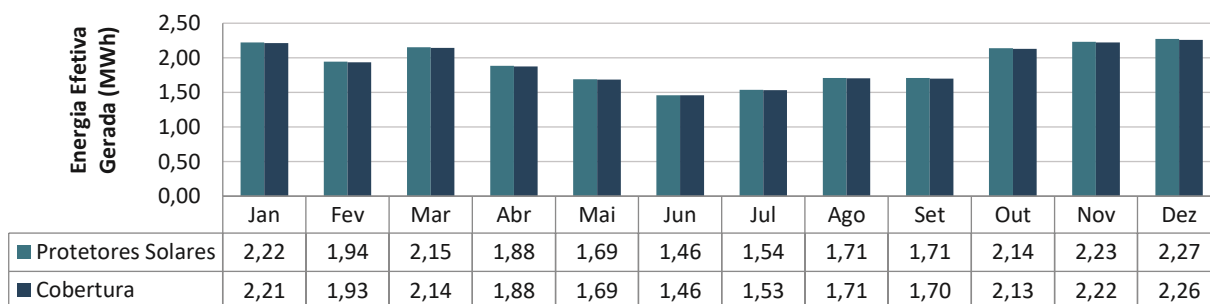
Fonte: os autores.

Conforme a Figura 10, ao longo do ano, a irradiação global efetiva é superior nos conjuntos de protetores solares fotovoltaicos e decorrente de maiores perdas por sombreamento no conjunto da cobertura. A volumetria da edificação reproduz sombreamentos distintos sobre os sistemas, onde o conjunto da cobertura está condicionado a sombras prolongadas devido, principalmente, à proximidade do volume do reservatório do edifício. Desse modo, o conjunto de protetores solares apresenta irradiação global efetiva anual de 1.793,00 kWh/m² e o conjunto de referência apresenta 1.785,45 kWh/m².

Em ambos os conjuntos, nos meses de verão, a irradiação global efetiva é superior devido à altura solar. Neste período, há incidência de irradiação solar próximo ao eixo perpendicular dos módulos, reduzindo perdas pela variação do ângulo de irradiância, além do desenvolvimento de sombras, a partir do entorno, com menor prolongamento sobre os módulos fotovoltaicos.

A energia efetiva gerada pelos conjuntos fotovoltaicos, por sua vez, é a resultante da conversão da irradiação global efetiva em energia elétrica e descontada de perdas energéticas durante a operação. Como a energia efetiva gerada está diretamente associada à disponibilidade de irradiação global efetiva sobre os módulos fotovoltaicos, é verificada uma geração elétrica superior nos conjuntos de protetores solares fotovoltaicos, quando comparados ao conjunto de referência na cobertura, conforme a Figura 11.

Figura 11 – Energia Efetiva Gerada (MWh)



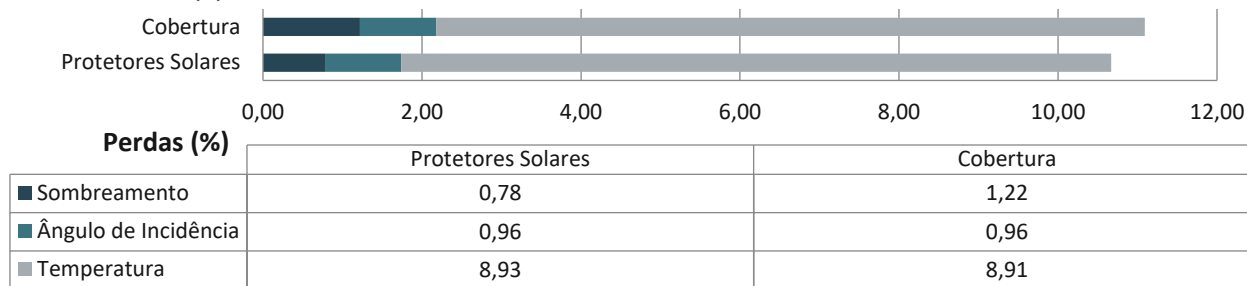
Fonte: os autores.

A energia efetiva gerada é condicionada, principalmente, por perdas referentes ao desempenho dos módulos e temperatura de operação. Com uma geração energética mensal similar entre os conjuntos, a energia efetiva gerada anualmente é brevemente superior no conjunto dos protetores solares fotovoltaicos, com um quantitativo de 22,94 MWh (média mensal de 1,91 MWh), enquanto o conjunto de referência apresenta a geração de 22,85 MWh no período, com média mensal de 1,90 MWh.

Ainda, apesar da energia gerada nos conjuntos ser mais significativa nos meses de verão, é constatada uma maior eficiência na geração energética nos meses de inverno quando a irradiação global efetiva é inferior. Esta relação decorre da redução na absorção de irradiação solar pelos módulos fotovoltaicos, diminuindo o sobreaquecimento do sistema e ampliando o seu rendimento.

As perdas energéticas, então, são os componentes que condicionam o desempenho nos sistemas fotovoltaicos e particularizam a geração energética. Entre os principais fatores de perdas observados nos conjuntos fotovoltaicos, no ano, destacam-se os relacionados ao sombreamento, ângulo de incidência de irradiância e temperatura, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Perdas ao ano (%)



Fonte: os autores.

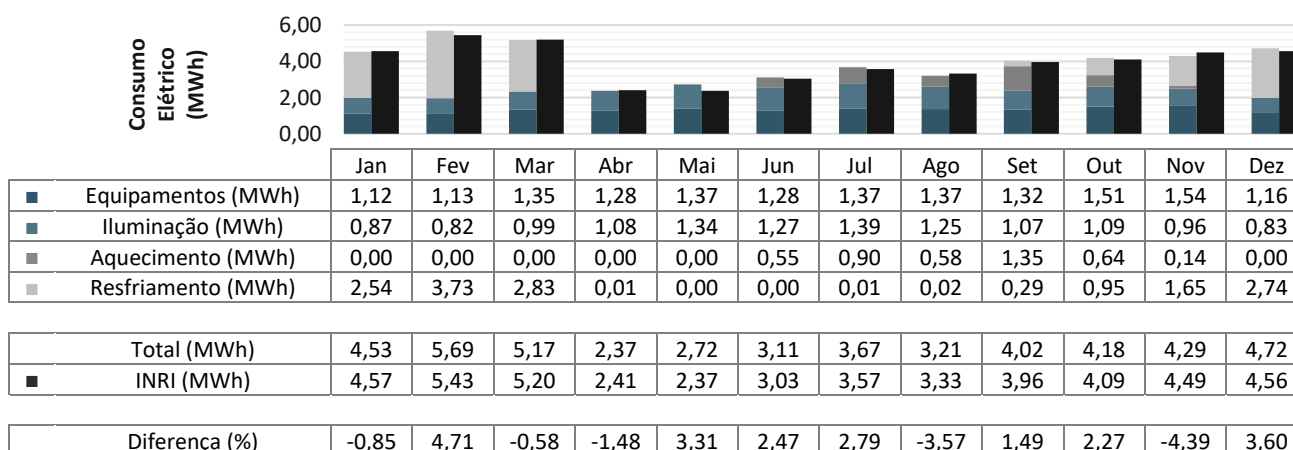
O sombreamento limita a irradiação global efetiva sobre os sistemas fotovoltaicos e foi identificado como principal fator para a diferenciação na geração energética dos conjuntos. Nesse sentido, a volumetria da edificação reproduz maiores áreas sombreadas sobre o conjunto da cobertura, atingindo um percentual de perdas anuais de 1,22%, enquanto, no conjunto de protetores solares, este fator é reduzido à 0,78%. O sombreamento, nos conjuntos, tem origem em elementos da própria edificação, como nos componentes do telhado (reservatório e platibandas) sobre o conjunto de referência, na cobertura, e recuos na volumetria sobre o conjunto de protetores solares.

Assim como o sombreamento, as perdas, devido ao fator do ângulo de incidência de irradiação, limitam a irradiação global efetiva e correspondem às variações no ângulo de incidência da irradiação, ao longo do ano, sobre o módulo fotovoltaico. Nos conjuntos, de mesma inclinação, este componente apresenta perdas anuais equivalentes de 0,96%. As perdas por temperatura afetam a energia efetiva gerada em sistemas fotovoltaicos, sendo originadas pela irradiação, fatores climáticos e características dos módulos. No período anual, as perdas energéticas por temperatura são similares nos conjuntos, com percentuais de 8,93% e 8,91% para os conjuntos dos protetores solares e da cobertura respectivamente.

Consumo de energia

Para a simulação da influência dos conjuntos fotovoltaicos no consumo energético, foi utilizado o software DesignBuilder v6.1; onde, através do levantamento físico e do consumo elétrico do Instituto de Redes Inteligentes, foi constituído um modelo virtual equivalente à edificação real. A Figura 13 apresenta a relação entre o consumo elétrico obtido pela simulação do modelo virtual, em equipamentos, iluminação, aquecimento e resfriamento, e o consumo real do Instituto (INRI) desenvolvido durante o ano de 2020.

Figura 13 – Consumo elétrico do modelo virtual e do Instituto INRI em 2020



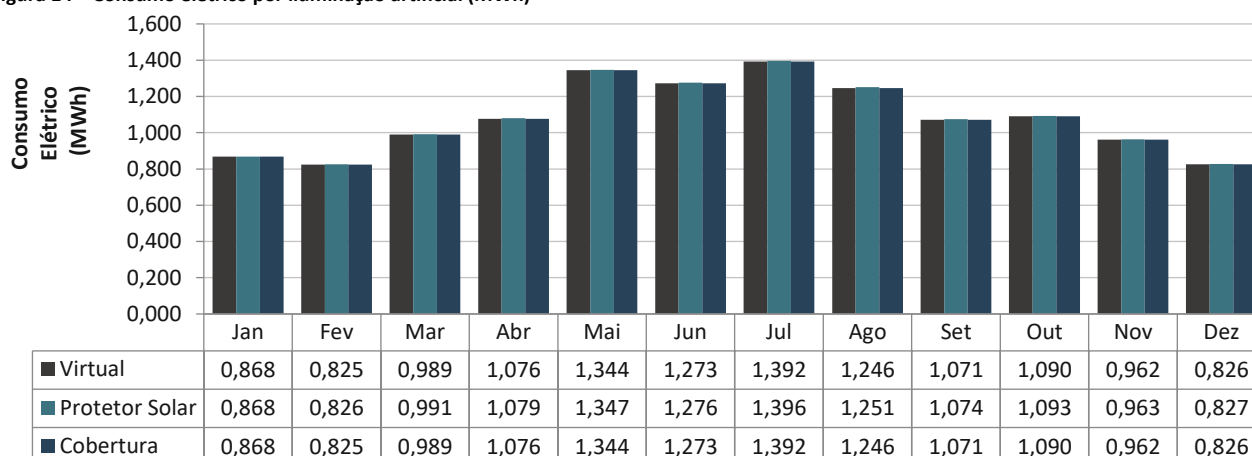
Fonte: os autores.

Ao avaliar os quantitativos no consumo elétrico do modelo virtual e o consumo observado na edificação existente, foi verificada uma variação energética inferior a 5% ao mês. Houve uma maior variação no mês de fevereiro, quando o consumo elétrico do modelo virtual foi superior em 4,71%; enquanto, em março, houve a variação mínima, com um consumo superior do Instituto em 0,58%. A edificação, no ano de 2020, apresentou consumo elétrico total de 47.419,17 kWh (média mensal de 3.951,60 kWh), enquanto o modelo virtual apresentou consumo total de 47.687,98 kWh, com média mensal de 3.974,00 kWh. Esta aproximação, nas demandas energéticas, é fundamental para as etapas de simulação do consumo energético, visto que permite situar os resultados em quantitativos equivalentes aos que seriam observados na edificação real.

Na avaliação da influência dos conjuntos fotovoltaicos sobre o consumo elétrico do modelo virtual, foram verificadas as variações no consumo para os fatores de iluminação, aquecimento e resfriamento artificiais. O consumo elétrico por equipamentos foi desconsiderado, visto que este independe da inserção dos conjuntos fotovoltaicos. Então, ao avaliar a variação no consumo elétrico por iluminação artificial, foi constatado que a utilização dos conjuntos de protetores solares fotovoltaicos amplia minimamente o consumo energético, enquanto o conjunto na cobertura não exerce influência sobre este parâmetro.

O consumo elétrico simulado para a iluminação artificial no modelo virtual é apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Consumo elétrico por iluminação artificial (MWh)

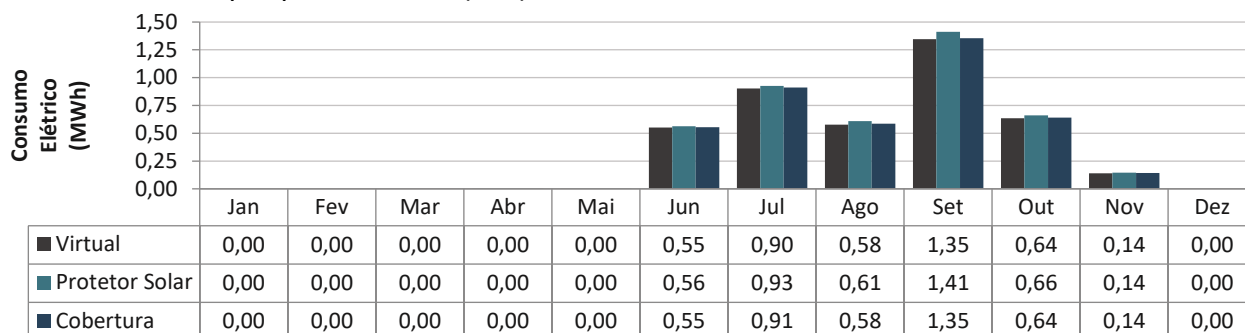


Fonte: os autores.

Os protetores solares fotovoltaicos acrescentam, anualmente, 30,50 kWh no consumo elétrico por iluminação artificial, um aumento de 0,24%. Esta variação ocorre devido a obstrução da iluminação natural pelos protetores solares sobre os ambientes, estimulando o consumo em iluminação artificial complementar, especialmente, nos meses de inverno. Além disso, o desenvolvimento dos protetores solares, a partir da máscara solar da localidade de Santa Maria, contribui para a manutenção da iluminação natural no interior da edificação e menor impacto em consumo energético, visto que a incidência de irradiação solar foi obstruída nos períodos em que foi considerada excessiva.

Em relação ao consumo elétrico por aquecimento artificial, a inserção dos conjuntos fotovoltaicos amplia, de maneira distinta, o consumo elétrico do modelo virtual. A Figura 15 representa a variação do consumo elétrico mensal por aquecimento no modelo devido a utilização dos conjuntos.

Figura 15 – Consumo elétrico por aquecimento artificial (MWh)

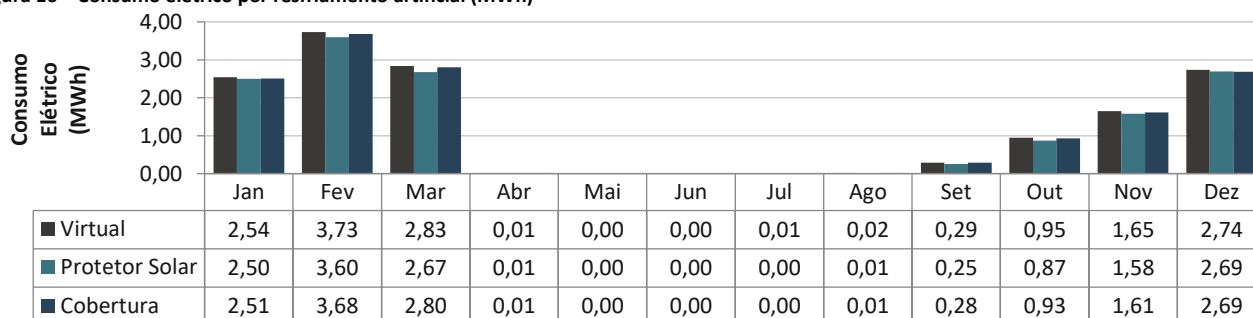


Fonte: os autores.

Os protetores solares fotovoltaicos, ao obstruírem a incidência de irradiação solar, impedem a sua utilização como fonte térmica em horários com temperaturas inferiores à temperatura neutra, ampliando o consumo elétrico por aquecimento artificial sobre os ambientes de laboratórios. Desse modo, a inserção destes componentes amplia o consumo elétrico anual em 160,90 kWh, representando um acréscimo de 3,87%. O conjunto fotovoltaico de referência, por sua vez, devido ao sombreamento promovido sobre a cobertura dos ambientes de laboratórios, reduz os ganhos térmicos nestes e amplia o consumo elétrico anual em 35,21 kWh ou 0,85%.

A obstrução da incidência de irradiação solar também influencia no consumo elétrico por resfriamento artificial. Assim, a partir da inserção dos conjuntos fotovoltaicos, foi verificada uma redução no consumo elétrico para este parâmetro. A Figura 16 apresenta a variação no consumo elétrico mensal em resfriamento com a atribuição dos conjuntos.

Figura 16 – Consumo elétrico por resfriamento artificial (MWh)



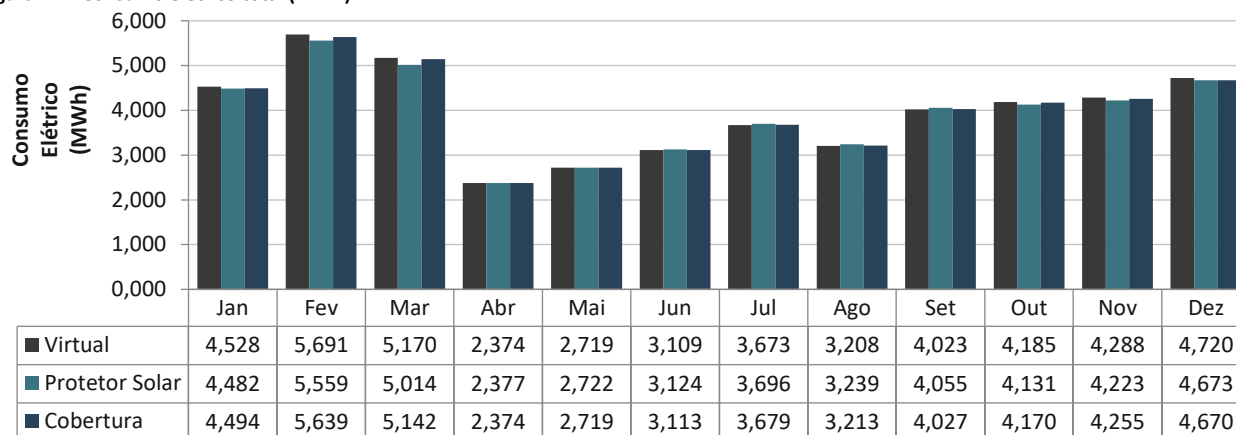
Fonte: os autores.

Com o conjunto de protetores solares fotovoltaicos, há a obstrução da incidência de irradiação solar excessiva sobre os laboratórios do modelo virtual, nos meses de verão, limitando a carga térmica sobre estes e reduzindo o consumo elétrico por dispositivos de resfriamento artificial. Dessa forma, na simulação, foi verificada uma redução anual de 585,34 kWh em consumo elétrico, decréscimo de 3,96%.

Em menor intensidade, o conjunto fotovoltaico de referência reduz o consumo elétrico por resfriamento artificial devido ao sombreamento que desenvolve sobre a cobertura dos laboratórios, promovendo a redução das cargas térmicas nos dias quentes. Assim, favorece uma diminuição anual no consumo elétrico de 227,72 kWh, representando uma redução de 1,54%.

Enfim, na avaliação do consumo elétrico total, são integrados os consumos em equipamentos, iluminação, aquecimento e resfriamento artificiais. No quantitativo final, a inserção dos componentes fotovoltaicos favoreceu uma redução no consumo elétrico do modelo simulado. A Figura 17 apresenta as variações no consumo elétrico mensal do modelo virtual com a utilização dos conjuntos fotovoltaicos.

Figura 17 – Consumo elétrico total (MWh)



Fonte: os autores.

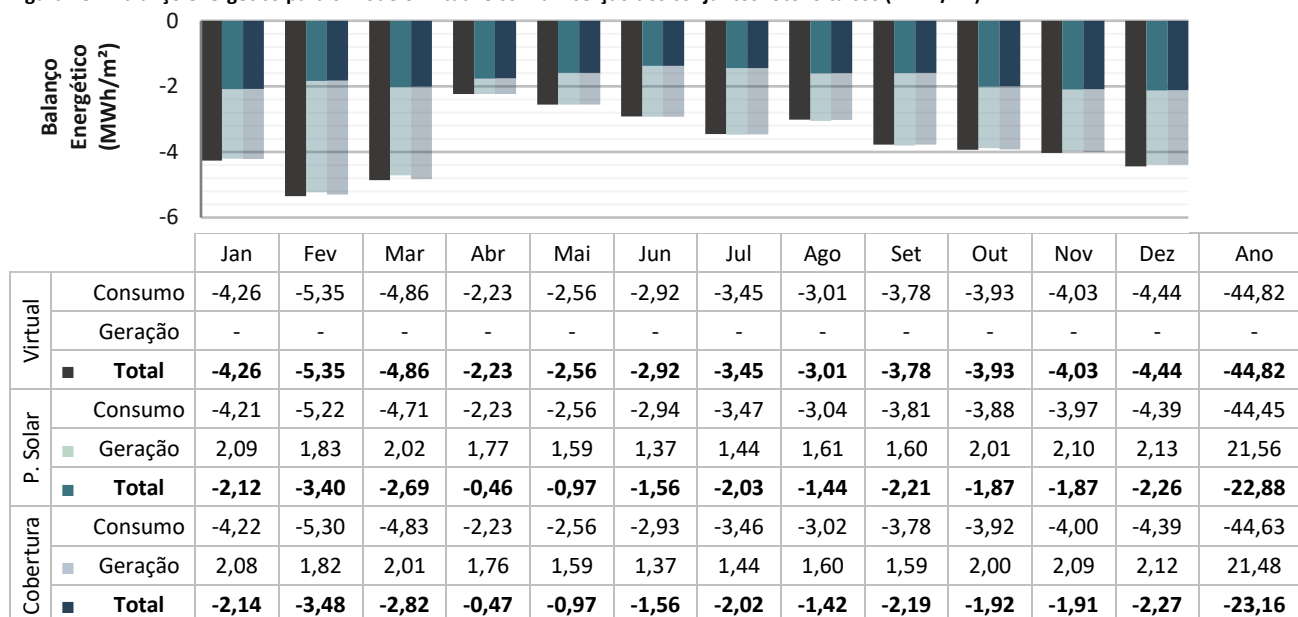
O conjunto de protetores solares fotovoltaicos desenvolve uma redução anual no consumo elétrico de 393,94 kWh, representando uma taxa de 0,83%. É constatado, sobretudo, que as reduções no consumo ocorrem entre os meses de outubro e março, com uma diminuição de 500,48 kWh, ou 1,75% do consumo no período. Estas diferenças são orientadas, especialmente, pelo consumo elétrico em resfriamento artificial, que apresenta uma diminuição de 528,29 kWh (3,72%) nestes meses. Os protetores solares fotovoltaicos apresentaram melhor desempenho no mês de março, quando possibilitaram uma redução de 155,83 kWh no consumo elétrico (3,01%), enquanto, no mês de agosto, cresceram o consumo em 32,03 kWh (0,96%).

Enquanto isso, o conjunto fotovoltaico da cobertura, posicionado de modo convencional, promove uma diminuição no consumo elétrico total de 192,52 kWh (0,40%). Assim como verificado no desempenho do conjunto de protetores solares, o sistema fotovoltaico da cobertura apresenta melhor desempenho para redução do consumo energético total nos meses de outubro a março, com uma redução de 212,43 kWh (0,74%), condicionado pelo resfriamento artificial que possibilita uma economia de 221,65 kWh (1,53%) no período.

Balanco energético

O balanço energético é um critério fundamental para avaliar a densidade de consumo elétrico em uma edificação, permitindo averiguar a gestão da energia nesta e sua correspondência com outras edificações. Nesta pesquisa, o balanço energético do modelo virtual é determinado pela diferença entre o consumo em energia elétrica e a energia efetiva gerada pelos conjuntos fotovoltaicos em função da área da edificação. Assim, é possível avaliar o desempenho dos conjuntos fotovoltaicos associando a sua geração energética fotovoltaica e a redução do consumo elétrico enquanto componentes passivos.

Na avaliação, o balanço energético mensal demonstra que o modelo com conjuntos fotovoltaicos na forma de protetores solares apresentou melhor desempenho ao longo do ano, conforme a Figura 18.

Figura 18 – Balanço energético para o modelo virtual e com a inserção dos conjuntos fotovoltaicos (MWh/m²)

Fonte: os autores.

O modelo virtual, que busca representar a edificação real, apresentou um balanço energético anual de -44,82 MWh/m².ano, representando uma média de -3,74 MWh/m².mês. Com a inserção dos conjuntos fotovoltaicos, o modelo passou a apresentar um melhor desempenho devido, principalmente, à geração de energia. Assim, com a utilização dos protetores solares fotovoltaicos, o modelo desenvolveu um balanço energético de -22,88 MWh/m².ano (média de -1,91 MWh/m².mês), enquanto, com o conjunto fotovoltaico na cobertura, apresentou um quantitativo de -23,16 MWh/m².ano (média de -1,93 MWh/m².mês).

Então, diante das características da edificação e das simulações energéticas, foi verificado que os módulos fotovoltaicos apresentaram maior eficiência energética se dispostos sob a forma de protetores solares. Nestas condições, apesar de desenvolverem uma ampliação no consumo elétrico em iluminação e aquecimento artificial, há uma taxa de redução superior no consumo em resfriamento artificial, resultando em uma diminuição no consumo elétrico anual. Enquanto isso, os módulos fotovoltaicos inseridos de modo convencional, na cobertura do modelo virtual, ainda que não tenham interferido no consumo por iluminação artificial, apresentam uma economia energética anual inferior.

O desempenho dos protetores solares fotovoltaicos está relacionado à metodologia utilizada em seu desenvolvimento, que integrou o potencial de geração elétrica do sistema fotovoltaico com o controle da incidência de irradiação solar em função da temperatura neutra. Assim, utilizando uma inclinação adequada para módulos fotovoltaicos, respeitando os ângulos de obstrução solar, o conjunto apresentou uma geração elétrica equivalente às condições ideais. Também, obstruindo a irradiação solar excessiva, como causa para o desconforto térmico nos ambientes internos, foi possível reduzir o consumo elétrico em equipamentos de resfriamento artificial.

Considerações finais

Este artigo avaliou a influência de uma proposta de protetores solares fotovoltaicos para a promoção da eficiência energética no Instituto de Redes Inteligentes da Universidade Federal de Santa Maria (INRI/UFSM). Obstruindo a irradiação solar

excessiva em períodos em que é fonte de desconforto térmico, a simulação indicou que os protetores contribuíram na redução do consumo elétrico em equipamentos de resfriamento artificial, com uma diminuição no consumo anual de 0,83%. Quando inclinados para a máxima geração elétrica, os protetores apresentaram uma geração pouco superior (em 90 kWh/ano) em relação ao conjunto de referência inserido na cobertura do modelo virtual da edificação.

No balanço energético, os protetores solares fotovoltaicos apresentaram melhor desempenho que o conjunto fotovoltaico da cobertura. Os protetores promoveram uma redução de 21,94 MWh/m².ano na resultante energética, enquanto o conjunto da cobertura desenvolveu uma diminuição de 21,66 MWh/m².ano. Embora o balanço energético, resultante da utilização dos conjuntos fotovoltaicos, tenha permanecido negativo, estima-se que o modelo pudesse apresentar melhor eficiência se os protetores solares fotovoltaicos fossem aplicados sobre as demais aberturas da edificação.

Na simulação, os protetores foram inseridos sobre os ambientes de laboratórios e circulação expostos à incidência de irradiação solar na fachada norte, visto que os demais ambientes apresentavam proteção por beirais e recuos. Esta condição limitou a utilização dos protetores solares fotovoltaicos em maior escala. Além disso, nos espaços de circulação, onde foram aplicados, não há ocupação permanente e equipamentos de climatização, minimizando a sua influência no controle dos ganhos térmicos e na redução do consumo em equipamentos de resfriamento artificial.

Também, as características das aberturas condicionaram o desempenho dos protetores solares fotovoltaicos. Nos laboratórios, que apresentam janelas em fita, a configuração de um protetor solar contínuo limitou a incidência de irradiação solar no interior dos ambientes como fonte térmica nos períodos em que a temperatura média é inferior à temperatura neutra, como nos meses frios; e, por sua vez, aumentou o consumo energético em aquecimento artificial. Ao mesmo tempo, o consumo elétrico em iluminação artificial foi ampliado devido à obstrução excessiva da iluminação natural incidente nos ambientes.

No entanto, o desempenho geral dos protetores solares fotovoltaicos, nesta pesquisa, contribuiu para identificar o potencial da geração elétrica na envoltória de edifícios e em locais com área útil insuficiente. Assim, em tipologias prediais, que apresentam menores áreas de cobertura e elevada demanda de energia, os protetores solares fotovoltaicos surgem como elementos promotores da eficiência energética, viabilizando a geração de energia e possibilitando a redução do consumo elétrico.

A possibilidade de reduzir a demanda energética nos edifícios, conforme os resultados obtidos, permite explorar os módulos fotovoltaicos como elementos passivos na envoltória de edificações reais. Atualmente, o uso da tecnologia fotovoltaica nas unidades consumidoras está associado ao entendimento de reduzir os custos e ampliar o consumo elétrico, desvinculados de uma percepção sobre a redução da demanda. Entretanto, reduzindo a carga térmica nos ambientes através da obstrução da incidência solar excessiva, é possível reavaliar a potência instalada nas unidades consumidoras, tendo em vista a redução na demanda. Desse modo, os conjuntos fotovoltaicos podem ser redimensionados, com menor quantidade de módulos, e reduzir os investimentos no sistema.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração distribuída de Energia Elétrica (INCT), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de

Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo apoio financeiro recebido para o desenvolvimento deste trabalho. O presente trabalho foi realizado com o apoio do INCTGD e das agências financiadoras (processo CNPq 465640 / 2014-1, processo CAPES nº 23038.000776 / 2017-54 e FAPERGS 17 / 2551-0000517-1).

Referências

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220-2**. Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.401-3**: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/CIE 8.995-1**. Iluminação de ambientes de trabalho. Parte 1: Interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABSOLAR. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Energia solar voltaica no Brasil**: Infográfico ABSOLAR. São Paulo, SP, 2020. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 22 dez. 2020.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA **Perdas de Energia Elétrica na Distribuição**. Edição 01. Brasília, DF, 2020. Disponível em: https://antigo.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relat%C3%B3rio+Perdas+de+Energia_+Edi%C3%A7%C3%A3o+1-2021.pdf/143904c4-3e1d-a4d6-c6fo-94af77bac02a. Acesso em: 14 jan 2020.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 687/2015**: altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Brasília, DF, 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2020.

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Standard 90.1**: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta: ASHRAE, 2019. Disponível em: https://www.techstreet.com/ashrae/standards/ashrae-90-1-2019-i-p?gateway_code=ashrae&product_id=2088527. Acesso em: 18 dez. 2021.

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. 2. ed. Maceió: EdUFAL, 2006. 163 p.

CARTANA, R. P.; PEREIRA, F. O. R. Elementos de controle solar desenvolvidos com modelagem paramétrica e algoritmos evolutivos. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 7, n. 3, p. 133–144, out. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v7i3.8647516>.

DESIGNBUILDER. **Defining set point temperature and RH schedules**. 2010. Disponível em: https://designbuilder.co.uk/helpv4.2/Content/Defining_setpoint_temperature_schedules.htm. Acesso em: 05 jun. 2020.

DOBRZYCKI, A.; KURZ, D.; MIKULSKI, S.; WODNICKI, G. Analysis of the Impact of Building Integrated Photovoltaics (BIPV) on Reducing the Demand for Electricity and Heat in Buildings Located in Poland. **Energies**, v.13, n. 10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13102549>.

ELETOBRÁS. CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. **Manual para aplicação do RTQ-R**: baseado na Portaria nº 18/2012. Versão 1. Rio de Janeiro: Eletrobrás/ Procel, 2012. Disponível em: http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/Manual_de_aplica%C3%A7%C3%A3o_do_%20RTQ-R-v01.pdf. Acesso em: 21 dez. 2020.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2020**: Ano base 2019. Rio de Janeiro: EPE, 2020. 292 p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf. Acesso em: 14 jan 2020.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Brasília: Ministério de Minas e Energia Empresa de Pesquisa Energética, 2017. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf>. Acesso em: 8 out. 2021.

EVANGELISTI, L.; GUATTARI, C.; ASDRUBALI, F.; VOLLARO, R. L. An experimental investigation of the thermal performance of a building solar shading device. **Journal of Building Engineering**, v. 28, Mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101089>.

GHOSH, A.; NEOGI, S. Effect of fenestration geometrical factors on building energy consumption and performance evaluation of a new external solar shading device in warm and humid climatic condition. **Solar Energy**, v. 169, p. 94–104, July 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.025>.

HOFER, J.; GROENEWOLT, A.; JAYATHISSA, P.; NAGY, Z.; SCHLUETER, A. Parametric analysis and systems design of dynamic photovoltaic shading modules. **Energy Science & Engineering**, v. 4, n. 2, p. 134-152, Mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/ese3.115>.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais climatológicas 1961-1990**. Brasília: INMET, 1992. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 17 dez. 2021.

INMETRO. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Anexo geral V**: Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros. Portaria no 50/2013. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtospbe/regulamentos/anexov.pdf>. Acesso em: 8 dez. 2021.

INMETRO. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Portaria Nº 42, de 24 de fevereiro de 2021. [Aprova a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) que aperfeiçoa os Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C)]. **Diário Oficial da União**: Edição 45, Seção 1, p. 44. Brasília, DF, 24 fev. 2021. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002707.pdf>. Acesso em: 08 dez. 2021.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARD. **ISO 7730**: moderate thermal environments: determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the conditions of Thermal Comfort. Geneva: ISO, 2005.

JOVANOVIĆ, J.; SUNB, X.; STEVOVIĆ, S.; CHEN, J. Energy-efficiency gain by combination of PV modules and Trombe wall in the low-energy building design. **Energy and Buildings**, v. 152, p. 568-576, Oct. 2017. DOI: [10.1016/j.enbuild.2017.07.073](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.073).

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás/PROCEL: Ministério de Minas e Energia, 2014. 366 p.

LEITZKE, R. K.; CUNHA, E. G.; SILVA, O., M.; SILVA, A. C. S. B.; BELTRAME, C. M. Avaliação de dispositivos de proteção solar fixos e automatizados para edifício residencial. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 8, n. 1, p. 59–72, 2017. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v8i1.8649657>.

LI, X.; PENG, J.; LI, N.; WANG, M.; WANG, C. Study on optimum tilt angles of photovoltaic shading systems in different climatic regions of China. **Procedia Engineering**, v. 205, p. 1157-1164, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.185>.

PEREIRA, I. M.; SOUZA, R. V. G. Proteção Solar em Edificações Residenciais e Comerciais: Desenvolvimento de Metodologia. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO-ENTAC, 12, Fortaleza, 2008. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2008.

PROCEL. PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Módulos Fotovoltaicos**. 2021. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BB70B5A3C-19EF-499D-B7BC-D6FF3BABE5FA%7D>. Acesso em: 4 fev. 2022.

RODRIGUES, T. T. V.; CARLO, J. C.; OLIVEIRA FILHO, D. Modelagem térmica de fotovoltaicos semitransparentes: impactos na eficiência da célula e no desempenho da zona. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 9, n. 4, p. 305–318, 2018. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v9i4.8652785>.

RUSCHEL, C. S.; GASPARIN, F. P.; KREZINGER, A. Determinação da capacidade térmica de módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologias. **Revista Brasileira de Energia Solar**. v. 6, n. 2, dec. 2015. Disponível em: <https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/130/129>. Acesso em: 15 jan. 2021.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos**: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Florianópolis: UFSC/ LABSOLAR, 2004. 114 p. Disponível em: <https://fotovoltaica.ufsc.br/sistemas/livros/livro-edificios-solares-fotovoltaicos.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2021.

STAMATAKIS, A.; MANDALAKI, M.; TSOUTSOS, T. Multi-criteria analysis for PV integrated in shading devices for Mediterranean region. **Energy and Buildings**, v. 117, p. 128-137, Apr. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.007>.

1 Maurício Picetti dos Santos

Arquiteto e Urbanista. Mestre em Arquitetura e Urbanismo no Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo da Universidade Federal de Santa Maria. Endereço postal: Avenida Roraima, n. 1.000, Santa Maria, RS – Brasil. CEP 97105-900

2 Ísis Portolan dos Santos

Arquiteta e Urbanista. Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina. Professora na Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Endereço postal: Avenida Roraima, n. 1.000, Santa Maria, RS – Brasil. CEP 97105-900

3 Isabel Tourinho Salamoni

Arquiteta e Urbanista. Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina. Professora Adjunta na Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Tecnologia da Construção. Endereço postal: Rua Benjamin Constant, 1359, Pelotas, RS – Brasil. CEP 96010-020