

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA**

CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

MARINA ESPÍNDOLA AMORIM

**COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO INTEGRADO A UMA FACHADA: EDIFÍCIO EDUCACIONAL EM
FLORIANÓPOLIS**

FLORIANÓPOLIS, 2021

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

MARINA ESPÍNDOLA AMORIM

COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO A UMA FACHADA: EDIFÍCIO EDUCACIONAL EM FLORIANÓPOLIS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora:

Ana Lígia Papst de Abreu

Coorientador:

Rogério de Souza Versage

FLORIANÓPOLIS, 2021

FICHA DE IDENTIFICAÇÃO

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

AMORIM, Marina Espíndola
Comparação do desempenho térmico e energético de um sistema fotovoltaico integrado a uma fachada: edifício educacional em Florianópolis / Marina Espíndola Amorim; orientador, Ana Lígia Past de Abreu; coorientação de Rogério de Souza Versage. - Florianópolis, SC, 2021.
84 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico de Construção Civil.
Inclui referencias.

1. Desempenho Termo Energético 2. Simulação Computacional 3. Sistema Fotovoltaico 4. BIPV 5. Fachada Dupla Ventilada. I. Abreu, Ana Lígia Past de. II. Versage, Rogério de Souza. III. Instituto Federal de Santa Catarina. IV. Comparação do desempenho térmico e energético de um sistema fotovoltaico integrado a uma fachada: edifício educacional em Florianópolis.

COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO A UMA FACHADA: EDIFÍCIO EDUCACIONAL EM FLORIANÓPOLIS

MARINA ESPÍNDOLA AMORIM

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina,

Florianópolis, 22, setembro de 2021.

Banca Examinadora:

Ana Lúcia Papst de Abreu, Dra.

Rogério de Souza Versage, Dr.

Fabício Peter Vahl, Dr.

Tiago de Castro Quevedo, Eng. Civil

AGRADECIMENTOS

Minha gratidão aos meus pais e irmão, que me deram todo suporte durante a graduação, acreditando sempre nas minhas escolhas.

A todos os meus amigos, que participaram dos momentos felizes e dos desafios dessa trajetória.

À Tríade Empresa Júnior, pelo imenso aprendizado para minha vida profissional e pessoal.

Ao Leopoldo, que sempre me apoiou e esteve ao meu lado, compreendendo minhas ausências.

Ao professor Rogério, coorientador deste TCC, pelo suporte e colaboração no meu progresso com simulação computacional.

À professora Ana Lígia, pelo aprendizado adquirido nas pesquisas desenvolvidas nas bolsas de estudo, por me orientar neste trabalho e por vibrar comigo cada etapa alcançada.

RESUMO

As edificações são responsáveis por aproximadamente 50% do consumo de eletricidade no Brasil. A utilização de estratégias passivas, ativas, e proativas, podem ser usadas para melhorar o desempenho termo energético das edificações. Quando são incorporadas nas etapas iniciais de projeto, se consegue obter os melhores resultados com menor custo. Em edificações de vários pavimentos, o sistema de vedação vertical é o elemento construtivo com maior influência nas trocas de calor da edificação com o meio externo. Numa edificação com envoltória adequada ao clima (estratégia passiva), uma forma de melhorar o desempenho da edificação é o uso de sistema fotovoltaico aplicado na envoltória (BIPV), estratégia proativa que possibilita a geração de energia limpa *in loco*. Neste trabalho foi feita uma comparação do desempenho termo energético de três sistemas de vedação vertical em uma edificação de uso educacional em Florianópolis. Os casos avaliados foram: um caso base, com parede simples em alvenaria; um caso com parede simples e sistema fotovoltaico aplicado diretamente sobre a fachada norte; e por último, um caso com sistema de parede dupla ventilada e sistema fotovoltaico integrado, funcionando como pele externa. Os modelos foram analisados por meio de simulação computacional no *software EnergyPlus*. Através dessas simulações obteve-se o consumo de energia, a carga térmica, o balanço térmico e a temperatura de ponto de equilíbrio de cada caso, além da geração de energia do sistema fotovoltaico. Como resultado constatou-se que os dois casos com uso de sistemas fotovoltaicos obtiveram um aumento da carga térmica de ar condicionado quando comparados ao caso base. Desta forma, os casos com sistemas fotovoltaicos na fachada apresentaram um consumo maior de energia quando comparados ao caso base. Porém, a geração de energia decorrente do sistema fotovoltaico simulado foi superior a demanda energética do ar condicionado, resultando que o caso base apresentou a maior demanda energética.

Palavras-chave: Desempenho Termo Energético; Simulação Computacional; Sistema Fotovoltaico; BIPV; Fachada Dupla Ventilada.

ABSTRACT

Buildings are responsible for approximately 50% of energy consumption in Brazil. The use of passive, active and proactive strategies can improve the thermal energy performance of buildings. When these strategies are incorporated in the initial design stages, it is possible to obtain the best results at a lower cost. In several floors buildings, the vertical sealing system is the constructive element that has the greatest influence on the heat exchange between the building and the environment. In a building with adequate climate envelope (passive strategy), a way to improve the building's performance is the use of photovoltaic applied to the envelope (BIPV), proactive strategy that enables the generation of clean energy in loco. In this study, it was made a comparison of the thermal energy performance of three vertical sealing systems in an educational building in Florianópolis. The cases evaluated were: a base case, with a simple masonry façade; a case with a simple masonry façade and a photovoltaic system applied on the north wall; and a case with a double skin façade with an integrated photovoltaic system as the external north skin. Three models were analyzed, one for each case, using computer simulation in EnergyPlus. Through these simulations, the energy consumption, thermal load, thermal balance and the balance point temperature were obtained, furthermore, the energy generation of the photovoltaic system. Through the simulations results, it was found that both cases with photovoltaic system had an increase in the thermal load of air conditioning when compared to the base case. Thus, the cases with photovoltaic systems on the façade had higher energy consumption when compared to the base case. However, the energy generation resulting from the simulated photovoltaic system was higher than the energy demand of the air conditioning, resulting in the base case having the highest energy demand.

Keywords: Thermal Energy Performance. Computer Simulation. Photovoltaic System. BIPV. Double Skin Façade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Possibilidades de uso de sistemas fotovoltaicos vinculados à pele externa da edificação.....	14
Figura 2 – Esquema de fachadas ventiladas naturalmente x mecanicamente.....	28
Figura 3 – Zonas bioclimáticas brasileiras com indicação dos índices de aceitabilidade térmica para paredes duplas ventiladas.....	29
Figura 4 – Esquema dos fluxos de energia em sistemas BIPV.....	32
Figura 5 – Esquema dos diferentes aspectos da integração fotovoltaica em edifícios	33
Figura 6 – Ábaco do potencial de radiação recebido pelas superfícies em Florianópolis.....	35
Figura 7 – Esquema dos aspectos considerados na avaliação da Temperatura de Ponto de Equilíbrio,.....	40
Figura 8 - Exemplificação do conceito de temperatura do ponto de equilíbrio.....	41
Figura 9 – Fachada sul Edifício Solar XXI.....	45
Figura 10 – Esquema de aproveitamento térmico do sistema fotovoltaico aplicado na fachada ventilada.....	46
Figura 11 – Fachadas Torre CIS em Manchester, Reino Unido.....	47
Figura 12 – Sede Isofóton em Málaga, Espanha.....	48
Figura 13 – Vista interna da parede-cortina no período de construção.....	49
Figura 14 – Detalhe da fachada ventilada da Sede Isofóton em Málaga, Espanha. .	50
Figura 15 – Vista aérea do Laboratório Fotovoltaica/UFSC.....	51
Figura 16 – Implantação novo bloco DACC.....	53
Figura 17 – Esquema da planta do modelo adotado.....	54
Figura 18 – Modelo geométrico do objeto de estudo.....	55
Figura 19 – Ilustração do sistema de vedação vertical de bloco de concreto.....	56
Figura 20 – Modelo de teste <i>Air-flow Network</i>	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resistencia térmica de câmara de ar não ventiladas de largura muito maior que espessura.....	23
Tabela 2 – Termos sobre edificios com energia zero.....	37
Tabela 3 – Cargas internas.....	60
Tabela 4 – Dados de entrada da caracterização do sistema fotovoltaico.....	62
Tabela 5 - Dados de entrada da caracterização da fachada ventilada.....	62
Tabela 6 – Balanço de energia em kWh.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BAPV – Building Applied Photovoltaic

BIPV – Building Integrated Photovoltaic

CB3E – Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações

CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A.

DACC – Departamento Acadêmico de Construção Civil

ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

INET - Instituto de Engenharia, Tecnologia e Inovação

INI-C – Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

NREL – National Renewable Energy Laboratory

OIE – Oferta Interna de Energia

Procel – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

PV – Photovoltaic

RAC – Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações

RNA – Revestimento não aderido

RTQ-C – Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos

RTQ-R – Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais

SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

SVVE – Sistema de Vedação Vertical Externa

ZEB – Zero Energy Building

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Justificativa.....	15
1.2	Objetivos.....	19
1.2.1	Objetivo Geral.....	19
1.2.2	Objetivos Específicos.....	19
1.3	Estrutura do Trabalho.....	19
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1	Desempenho térmico e energético das edificações.....	20
2.1.1	Transferência de calor.....	21
2.1.2	Simulação computacional de desempenho termo energético.....	24
2.2	Sistemas de fachada dupla ventilada.....	26
2.2.1	Fachada Ventilada e sua relação com desempenho térmico e energético. .	27
2.2.2	Sistemas fotovoltaicos.....	30
2.2.3	Fachada Ventilada e sua relação com desempenho de Painéis Fotovoltaicos Integrados à Edificação (BIPV).....	31
2.2.4	BIPV X BAPV.....	36
2.3	Edificações Energia Zero.....	37
2.4	Temperatura de Ponto de Equilíbrio.....	39
2.5	Considerações finais do capítulo.....	42
3	EXEMPLOS DE EDIFICAÇÕES COM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS À EDIFICAÇÃO.....	43
3.1	Edifício Solar XXI – Lisboa, Portugal.....	43
3.2	Torre CIS – Manchester, Reino Unido.....	46
3.3	Sede Isofóton – Málaga, Espanha.....	47
3.4	Fotovoltaica – Florianópolis, Brasil.....	50
4	MÉTODO.....	52
4.1	Objeto de estudo.....	53
4.1.1	Modelos de simulação.....	54
4.2	Diretrizes dos modelos avaliados.....	55
4.3	Simulação computacional.....	56
4.4	Seleção do método de simulação.....	59
4.5	Determinação dos parâmetros avaliados.....	61

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
5.1	Análise da geração de energia dos sistemas fotovoltaicos.....	62
5.2	Análise do balanço de energia dos modelos.....	63
5.3	Análise da carga térmica.....	65
5.4	Análise do balanço térmico.....	66
5.5	Temperatura de ponto de equilíbrio.....	66
6	CONCLUSÃO.....	72
6.1	Limitações do trabalho e sugestões para trabalho futuros.....	73
	REFERÊNCIAS.....	75

1 INTRODUÇÃO

As edificações são responsáveis por 55% do consumo de energia mundial (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2020). No Brasil, as edificações também representam mais da metade do consumo de energia elétrica do país (EPE, 2021). Ainda não se tem dados específicos sobre edificações educacionais no Brasil, porém em dados de outros países essa tipologia apresenta um consumo significativo. Nos Estados Unidos as edificações escolares representam 10,8% do consumo total das edificações, já no Reino Unido essa tipologia é a terceira maior consumidora de energia, ficando atrás apenas dos edifícios comerciais e escritórios. (WANG, 2016).

Sobre a oferta interna de energia (OIE), no ano de 2020, 48,4% da matriz energética brasileira foi de energia renovável, vinda principalmente da geração hidráulica e da biomassa da cana-de-açúcar. A energia solar aumentou sua representatividade na matriz elétrica brasileira, passando de 1% em 2019 para 1,7% em 2020. A capacidade instalada de energia solar teve um aumento de 32,9%. (EPE, 2021).

As emissões de CO₂ antrópicas associadas à matriz energética brasileira tiveram uma redução de 4,9% em relação ao ano de 2019. Muito disso ocorreu devido à diminuição do consumo energético no setor de transportes durante a pandemia da COVID-19. Apesar das edificações residenciais responderem a somente 5% do total de emissões de CO₂ da matriz energética brasileira (EPE, 2021), a produção dos materiais, a construção e uso das edificações são uma alternativa importante para mitigação das emissões de CO₂ (AGOPYAN; JOHN, 2011).

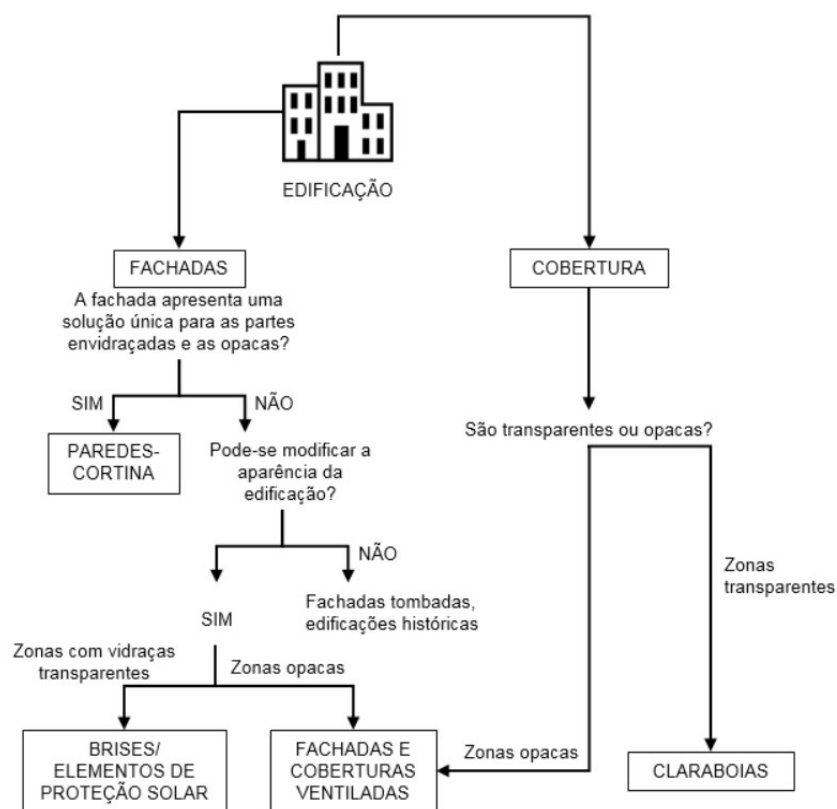
A radiação solar é uma fonte de energia renovável e praticamente inesgotável, não é poluente e nem traz efeitos negativos para o meio ambiente (GAVIRIA; PEREIRA; MIZGIER, 2013). Essas características devem-se ao fato de que a radiação solar é uma fonte de energia primária, ou seja, não é submetida a nenhum processo de conversão/transformação e pode ser usada em fontes de

energia secundárias, como a eletricidade (CB3E, 2020). O Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA) mostra que hoje o Brasil possui 3,29 GW de potência instalada em usinas fotovoltaicas até fevereiro de 2021 (ENEEL, 2021).

Uma das formas de se inserir a geração de energia solar no meio urbano é integrando/aplicando o sistema fotovoltaico às edificações. O Brasil é um país que tem grande disponibilidade de irradiação solar, sendo assim, a geração de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos tem um grande potencial a ser explorado (GAVIRIA; PEREIRA; MIZGIER, 2013). Uma grande vantagem do uso de sistemas fotovoltaicos nas edificações, principalmente comerciais, é que o pico de demanda ocorre no período diurno, quando há um maior nível de irradiação solar (SCHNEIDER; SORGATO; RÜTHER, 2018). Em 2020 houve um aumento de 187% na micro e mini geração distribuídas (MMGD) de energia, sendo a energia solar equivalente a 90,4% desse total. A energia solar teve destaque nesse ano em relação à MMGD, com 2.764 GWh de geração e 4.635 MW de potência instalada (EPE, 2021).

A possibilidade de aplicação de sistemas fotovoltaicos na face externa de edificações é apresentada esquematicamente na Figura 1. Neste esquema, identifica-se as duas possibilidades de integração ou aplicação de painéis fotovoltaicos: na cobertura ou na fachada.

Figura 1 – Possibilidades de uso de sistemas fotovoltaicos vinculados à pele externa da edificação



Fonte: Adaptado de Chivelet e Solla (2010)

O sistema fotovoltaico pode ser usado nas edificações de duas maneiras: painéis fotovoltaicos integrados à envoltória do edifício (BIPV) ou painéis fotovoltaicos aplicados à envoltória do edifício (BAPV). O método integrado (BIPV) é a troca de materiais da cobertura ou revestimento de fachada por painéis fotovoltaicos, ou seja, os painéis fotovoltaicos não só geram energia, mas possuem a função de envelope da edificação. Já no método BAPV os painéis possuem apenas a função de gerar energia, mesmo fazendo parte da composição arquitetônica, não substituem outros materiais da envoltória do edifício (DEBBARMA; SUDHAKAR; BAREDAR, 2017).

Uma das possibilidades de integração do sistema fotovoltaico ao edifício é o uso de fachadas duplas, podendo ser ventiladas ou não. O sistema de fachadas duplas ventiladas é um tipo de revestimento não aderido que pode melhorar o desempenho térmico da edificação. Seu uso pode fornecer uma zona de proteção térmica, economia de energia, proteção sonora e contra o vento e resfriamento

noturno. Além disso, o sistema pode contribuir para a redução das cargas térmicas no verão devido à ventilação de ar quente na câmara (CHIVELET; SOLLA, 2010). Quando integrado a um sistema fotovoltaico, o sistema de fachada ventilada pode melhorar ainda mais o desempenho da edificação. O sistema BIPV influencia na transferência de calor por causa da mudança da resistência térmica ao substituir os elementos de construção convencionais (WANG et al., 2006 apud AGATHOKLEOUS; KALOGIROU, 2016).

1.1 Justificativa

As construções sustentáveis estão em ascensão por todo o mundo, principalmente devido à redução de recursos naturais e energéticos (LIMA *et al.*, 2021). A arquitetura sustentável busca soluções que atendam às premissas do cliente, seu orçamento, condições físicas e sociais do local, tecnologias disponíveis no mercado, legislação e a antecipação das necessidades da vida útil da construção. Deve-se obter essas soluções com uso responsável dos recursos, com menos consumo de energia e água (ASBEA, 2012).

Buscando a sustentabilidade nas construções, podem ser usadas tecnologias classificadas em passivas, ativas e proativas. Roméro e Reis (2012) dizem que as estratégias passivas são as referentes a envoltória da edificação, as que não utilizam energia para funcionar, como por exemplo a escolha adequada de materiais e da orientação solar. As estratégias ativas são os sistemas de iluminação eficientes, controles individuais de climatização, e outros, e são preferencialmente usadas quando não há mais possibilidade de uso e equacionamento das tecnologias passivas. Já as tecnologias proativas são aquelas que não gastam energia, mas sim a ofertam, como por exemplo os painéis fotovoltaicos.

A Eletrobrás e o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) iniciaram o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações – PROCEL EDIFICA em 2003 (PROCEL, 2006). O programa PROCEL EDIFICA lançou com o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) os documentos: Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) e o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de

Edificações Residenciais (RTQ-R). Além disso, outras documentações complementares foram publicadas também, como os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações (RAC). (PBE EDIFICA, 2019).

Porém a partir de 2014, o Procel Edifica e o Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E) vem pesquisando ações para melhorar o método de avaliação do nível de eficiência energética de edificações comerciais, de serviços e públicas, assim como as residenciais - RTQ-C e RTQ-R. Em maio de 2021 o Inmetro aprovou a nova Instrução Normativa Inmetro (INI) para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C), que aprimora o RTQ-C. (PBE EDIFICA, 2021).

O RTQ-C e o RTQ-R possuem os requisitos para classificação da eficiência energética da edificação em níveis, já o RAC mostra os procedimentos de avaliação, direitos e deveres das partes envolvidas, o modelo da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) do Inmetro, e outras informações importantes para o processo. Esse é o documento que possibilita a obtenção da ENCE (PBE EDIFICA, 2019).

O regulamento divide a avaliação das edificações comerciais em três sistemas: envoltória, sistemas de iluminação e sistemas de ar condicionado. Cada sistema é avaliado individualmente, resultando em uma classificação final, na qual os níveis de eficiência energética vão de “A”, mais eficiente, até “E”, menos eficiente. (INMETRO, 2014).

A ENCE não é obrigatória para edificações residenciais e comerciais. Mas, desde 2014, com a implementação da IN nº2, todas as edificações públicas federais, construídas ou reformadas devem obter a Etiquetagem Nacional de Conservação de Energia (ENCE) Nível “A”, obrigatoriamente (BRASIL, 2014).

Sendo o Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) uma instituição pública federal, a construção de qualquer nova edificação terá que ser avaliada como nível “A” pela ENCE.

Possuir edificações educacionais mais sustentáveis, para o IFSC, traz diversos benefícios, como servir de exemplo, melhorar a sensação de conforto dos ocupantes e possivelmente diminuir custos operacionais do edifício (U.S. Department of Energy, 2014). Uma edificação com preocupações de sustentabilidade pode ser um laboratório para avaliação real de sistemas mais adequados ao local (CHATZIPANAGI; FRONTINI; VIRTUANI, 2016).

Um novo prédio educacional para o Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACC) está previsto no Plano Diretor do Campus Florianópolis do IFSC. Além da obrigatoriedade de se obter o nível “A”, espera-se que essa edificação seja um exemplo, que funcione como demonstração de sistemas construtivos adaptados ao clima e energeticamente eficientes. Além de servir como objeto de estudo para pesquisas durante o projeto, execução da obra e operação, durante a vida útil da construção, com a utilização de sensores de temperatura, iluminação, monitoramento do consumo energético, e outras tecnologias para avaliar o desempenho da edificação.

O trabalho de Quevedo (2019) teve como objeto de estudo uma proposta de um novo bloco de salas de aula e laboratórios para o Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACC, do Campus Florianópolis do Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC. O objetivo do trabalho foi determinar diretrizes construtivas do sistema de envoltória para que, um projetista saiba quais estratégias de eficiência energética são mais determinantes nas etapas iniciais de projeto, pensando na obtenção do nível “A” na ENCE. Foram feitas 720 simulações, variando: disposição das zonas térmicas; percentual de abertura da fachada; tipo de vidro; absorvância solar; características térmicas das paredes e cobertura; e sombreamento. Os parâmetros construtivos que tiveram maior influência/relação na carga térmica total da edificação foram o sombreamento, o percentual de área de aberturas das fachadas e a absorvância solar. As outras variáveis ganham mais ou menos importância dependendo da variação das três principais citadas. Como a cobertura possui uma área pequena em relação a área de fachada, esta não apresentou uma relevância significativa na carga térmica total de resfriamento da edificação.

A proposta desse trabalho é auxiliar na pesquisa para que a nova edificação do DACC/IFSC não apenas consuma menos energia, mas também para

destacar o uso de energia solar na envoltória da edificação. Com isso mostra-se a preocupação com as emissões de CO₂ na área da construção civil, além de buscar ser um edifício “Zero Energy Building” ou “Nerarly Zero Energy Building”. Em um trabalho de pesquisa anterior, Abreu et al. (2016) observaram numa avaliação usando a ferramenta BIPV Design, que para este novo bloco do DACC/IFSC somente a colocação de painéis fotovoltaicos na cobertura do prédio não seria capaz de atender a demanda anual esperada para a edificação. Entretanto, a adição de painéis solares na fachada, geraria um excedente energético que poderia ser exportado, sendo utilizado por outras edificações do Campus. (ABREU *et al.*, 2016).

Com relação a eficiência energética nas edificações, é nos primeiros esboços de projeto onde podem se cometer os maiores erros que podem ser custosos o resto da vida útil da edificação e até mesmo impossíveis de serem alterados (KRESE, LAMPRET, et al., 2018). Também são nas etapas iniciais onde se tem o maior potencial para serem feitas as melhores propostas para um bom desempenho térmico energético da edificação (LAMBERTS et al., 2014; PEDRINI e SZOKOLAY, 2004). Avaliar o uso de fachada dupla é importante já na abordagem inicial da proposta, pois permite previsões precisas para a fase de projeto arquitetônico. (POIRAZIS, 2007). Nesta fase inicial, não é importante a precisão do consumo de energia da edificação, mas uma estimativa geral do desempenho térmico energético. (KRESE, LAMPRET, et al., 2018).

Este trabalho de conclusão de curso é uma das etapas iniciais de um projeto sustentável que pretende ser uma edificação exemplo, que possa ser usada para estudos futuros dos alunos do IFSC. O problema em forma de perguntas deste TCC são: qual o impacto termo energético da integração dos PVs na fachada deste novo bloco escolar no Campus Florianópolis do IFSC? Aumentará a carga térmica interna da edificação com a colocação dos painéis fotovoltaicos na fachada? A geração de energia solar será suficiente para a demanda de energia? Ter essas perguntas em mente ajudará os projetistas na tomada de decisão quanto a adoção ou não deste sistema antes mesmo de se iniciar esboços do projeto arquitetônico e definição de sistemas fotovoltaicos e de condicionamento de ar.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o impacto da adoção de painéis fotovoltaicos integrados à fachada no desempenho térmico e energético de uma edificação educacional em Florianópolis.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Comparar o desempenho térmico e energético de uma edificação de uso educacional de características de envoltória (fachada simples) Nível A, com sistema fotovoltaico integrado a fachada dupla e aplicado a fachada simples;
- b) Avaliar a geração de energia do sistema fotovoltaico na fachada norte de uma edificação de uso educacional frente a demanda energética do condicionamento de ar;
- c) Estimar o comportamento energético das três diferentes proposições construtivas de fachada, em relação à temperatura externa.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em 6 capítulos. Neste primeiro capítulo foi apresentada a justificativa e objetivos do trabalho. No capítulo 2 está apresentada a revisão bibliográfica dos temas pertinentes a partir de outros trabalhos científicos. A revisão bibliográfica se inicia com o desempenho térmico e energético das edificações, seguido da simulação computacional, sistema de fachada ventilada, edificações energia zero e finalizando com as considerações finais do capítulo. O capítulo 3 traz exemplos de edificações com painéis fotovoltaicos integrados na edificação. A metodologia proposta é apresentada no capítulo 4, onde explica-se as etapas para atendimento aos objetivos propostos neste trabalho. O capítulo 5 traz os resultados e discussões das simulações realizadas, analisando os dados obtidos. O capítulo 6 apresenta as considerações finais do trabalho, suas limitações e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo traz a pesquisa bibliográfica desenvolvida abordando conceitos necessários para o estudo do funcionamento da fachada ventilada e da simulação computacional. Para alcançar os objetivos propostos, a revisão de literatura aborda os temas: desempenho térmico e energético; simulação computacional; fachada dupla ventilada; sistemas fotovoltaicos integrados em edificações e edificações de energia zero.

Inicia-se com o assunto do desempenho térmico e energético em edificações e em seguida a ferramenta de simulação computacional, com foco em edificações de uso educacional. Na sequência, o tema abordado é a fachada dupla ventilada, com enfoque no sistema de revestimento não aderido, dentro dos sistemas de vedação vertical externa (SVVE), os tipos de fachadas ventiladas existentes e benefícios do seu uso.

2.1 Desempenho térmico e energético das edificações

A eficiência energética na arquitetura pode ser vista como uma característica referente à construção que representa seu potencial em proporcionar conforto térmico, visual e acústico aos usuários, tudo isso com baixo consumo de energia (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

As estratégias para melhorar a eficiência energética de uma edificação podem ser divididas em soluções passivas, soluções ativas, e proativas (ROMÉRO; REIS, 2012). As soluções ativas abrangem sistemas de ar condicionado, iluminação, ventilação entre outros. Já as soluções passivas referem-se aos componentes arquitetônicos com maior eficiência energética, como os componentes do envelope da edificação, para diminuir a dependência das soluções ativas (SUN; GOU; LAU, 2018). As estratégias passivas têm um melhor custo-benefício, uma vez que é necessário um menor custo de investimento quando comparado com seu potencial de economia de energia (BUI *et al.*, 2020). As soluções proativas são as tecnologias que ofertam energia limpa incorporadas na edificação, como por exemplo pode-se citar os aero geradores e os painéis fotovoltaicos (ROMÉRO; REIS, 2012).

Toda forma de calor existente no ambiente é chamado de carga térmica. Alguns dos fatores que influenciam nesse ganho de calor são a temperatura externa, radiação solar, pessoas, equipamentos e iluminação (OMORI, 2018). A radiação solar transmitida para o interior do ambiente é a principal fonte de ganho térmico (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Os ganhos térmicos podem ser desejados ou não, a depender do tipo de uso da edificação. Em escritórios, por exemplo, as cargas internas são elevadas, por isso, os ganhos de calor por radiação devem ser evitados (CHIVELET; SOLLA, 2010).

É importante entender os conceitos de transmissão de calor e o comportamento térmico dos materiais de revestimento para que se tenha uma condição interna de conforto (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). As fachadas das edificações atuam como filtro para a transferência de calor entre o ambiente externo e interno, tendo a intenção de deixar o meio interno mais confortável consumindo o mínimo possível de recursos energéticos (CHIVELET; SOLLA, 2010).

2.1.1 Transferência de calor

A envoltória da edificação é o conjunto de elementos construtivos que possuem contato com o meio externo, podendo ser comparada à pele da edificação. No Manual do Procel, as fachadas são definidas por elementos como paredes, aberturas e vãos sem fechamentos. (INMETRO, 2014). A envoltória da edificação pode ser dividida em dois grupos de materiais que a constituem: os opacos e os translúcidos. Os materiais opacos não possibilitam a transferência direta do calor para o interior do ambiente, já os materiais translúcidos permitem que grande parte da radiação solar seja diretamente transmitida para dentro da edificação (QUEVEDO, 2019). Uma parcela da radiação incidente no material opaco será refletida e outra absorvida e, se o material for translucido, uma terceira parcela será transmitida diretamente para o ambiente interno (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Diferentes propriedades dos materiais influenciam no ganho de calor interno caso o material seja opaco ou translúcido. O desempenho térmico do ambiente será influenciado principalmente pela resistência térmica, transmitância e absortância solar dos materiais da envoltória (QUEVEDO, 2019), e para materiais translúcidos influencia também a transmissividade solar.

Um dos principais elementos da edificação a serem pensados quando se está projetando um edifício energeticamente eficiente é a envoltória. O envelope deve ser pensado para que evite ganho de calor externo no período de verão, porém permita a passagem de luz natural e a perda de carga térmica interna (de pessoas, iluminação e equipamentos). No período de inverno os ganhos térmicos são positivos e as perdas por condução e infiltração devem ser minimizadas. (ASHRAE, 2016).

A transferência de calor dar-se-á devido a diferença de temperatura entre o exterior e o interior da superfície (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). O fluxo de calor que atravessa a superfície depende da transmitância térmica “U” do material, da diferença de temperatura entre os meios interno e externo e a densidade de fluxo de calor (LAMBERTS *et al.*, 2016). A transmitância térmica “U” [$\text{W/m}^2\text{K}$] é o parâmetro que possibilita mensurar a perda de calor pela fachada.

A radiação solar absorvida nas superfícies opacas é função da absorptância solar e da refletividade solar. Ao incidir em uma superfície opaca a energia radiante é absorvida ou refletida, sendo transformada em energia térmica ou calor (LAMBERTS *et al.*, 2016). A absorptância solar está diretamente relacionada a cor da superfície do material. Cores mais escuras absorvem a maior parte da radiação incidente, enquanto cores claras absorvem bem pouco da radiação solar incidente (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

O trabalho de Cheng, Ng, Givoni (2004) apresenta uma instalação teste na Universidade Chinesa de Hong Kong, que permite estudar o efeito de diversas características da edificação. O estudo aponta resultados sobre a influência da cor e da massa térmica nas temperaturas internas da instalação. Foi concluído que o uso de cores claras e menos massa térmica pode diminuir as temperaturas internas, e quanto mais leve o sistema construtivo for, maior é a influência da absorptância, ou seja, da cor da superfície. Porém esse resultado depende das circunstâncias, pois podem ser aplicados de diferentes maneiras na edificação.

A resistência térmica é definida pela NBR 15220-1 (ABNT, 2003) como a razão entre a diferença de temperatura entre as superfícies do elemento construtivo pela densidade de fluxo de calor. Dessa forma, a resistência térmica do material

mostra sua capacidade em resistir à passagem do calor, e está relacionada com a espessura do material. Quanto maior a espessura, maior será a resistência térmica. A resistência térmica pode ser de um único material, ou resultado da composição de vários materiais construtivos (componentes). Se somada as resistências térmicas superficiais interna e externa com a resistência térmica dos componentes, tem-se a resistência térmica total de um determinado sistema construtivo (fechamento). (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

A transmitância térmica ("U") é o inverso da resistência térmica total de um fechamento, sendo a variável mais importante na avaliação do desempenho das superfícies opacas da envoltória (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Numa fachada, assim como numa cobertura, quanto mais baixo for o coeficiente "U", menor é a perda de calor através deste sistema construtivo (CHIVELET; SOLLA, 2010).

As câmaras de ar oferecem resistência a passagem do calor. Segundo a NBR 15220-2 (ABNT, 2003) as câmaras de ar em paredes duplas são consideradas poucos ventiladas, se a distância do fechamento externo for menor do que 5 cm, e muito ventilada para câmaras de ar com mais 5 cm.

Tabela 1 – Resistência térmica de câmara de ar não ventiladas de largura muito maior que espessura

Natureza da superfície da câmara de ar	Espessura da câmara de ar (cm)	Resistência térmica R_{ar} [$m^2.K/W$]
		Direção do fluxo de calor Horizontal
Superfície de alta emissividade $\varepsilon > 0,8$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,14
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,16
	$e > 5,0$	0,17
Superfície de baixa emissividade $\varepsilon < 0,2$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,29
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,37
	$e > 5,0$	0,34

Fonte: adaptado da ABNT (2003)

Observa-se pela Tabela 1 que o fato de se ter superfícies internas de baixa emissividade (chapa de alumínio polido por exemplo) numa câmara de ar de uma parede dupla, o valor da resistência térmica dobra (ou mais que dobra) para a mesma espessura.

Para câmaras muito ventiladas a camada externa não será considerada, nem a câmara de ar, e a resistência térmica total é calculada segundo a Equação (1) abaixo.

$$R_T = 2 \cdot R_{si} + R_t \quad (1)$$

Onde:

R_T = resistência térmica da camada interna do componente construtivo;

R_{si} = resistência superficial interna (0,13 m².K/W para fluxo de calor horizontal – caso para fachadas ventiladas)

As superfícies translúcidas são a principal fonte de ganho de calor nas fachadas. O coeficiente que mede esses ganhos é o fator solar, que indica o percentual de fluxo de energia solar que entra no prédio pelas áreas envidraçadas em relação à radiação solar total que incide na fachada (CHIVELET; SOLLA, 2010). Então, pode-se dizer que os elementos translúcidos das fachadas influenciam fortemente no consumo de energia da edificação. Este consumo varia conforme orientação, relação entre área de aberturas e área de paredes, tipo de vidro e proteção solar, uma vez que esse tipo de material permite que parte da radiação solar entre diretamente no ambiente (PALMER; GENTRY, 2012).

2.1.2 Simulação computacional de desempenho termo energético

Projetos que visam a sustentabilidade e economia de energia são grandes desafios para grande parte das ferramentas e abordagens atuais. As ferramentas recentes de projeto não são multidisciplinares, por isso, muitas vezes tornam-se inadequadas para os desafios que as construções sustentáveis trazem. (HENSEN; LAMBERTS, 2011). Avaliar o desempenho de construções é complexo e

depende de diversas variáveis interdependentes, além de conceitos multidisciplinares (MENDES *et al.*, 2005).

Prever e avaliar o comportamento das edificações com antecedência é mais vantajoso economicamente do que corrigir os problemas na fase de uso. Porém, a simulação computacional nas fases iniciais de projeto é pouco utilizada, aparecendo geralmente apenas nas fases finais do projeto (HENSEN; LAMBERTS, 2011).

Para modelar e simular o desempenho de edificações é necessário o uso de uma ferramenta multidisciplinar. Geralmente é baseada em métodos numéricos que objetivam alcançar uma solução o mais próximo possível da realidade. Mesmo sendo uma ferramenta de análise muito poderosa, nem sempre é possível obter uma resposta ou solução da simulação, além de ser difícil garantir a qualidade dos resultados (HENSEN; LAMBERTS, 2011).

Por meio da simulação computacional é possível avaliar o desempenho térmico e energético para diferentes possibilidades de projeto (MENDES *et al.*, 2005). Inicialmente deve-se buscar o entendimento do programa de simulação desejado e sua compatibilidade com as informações do projeto arquitetônico, como clima, terreno, plano diretor, entre outros (PEDRINI, SZOKOLAY, 2004).

Além de avaliar o desempenho térmico e energético, a simulação pode ser usada para estimar o consumo de energia, o custo desse consumo e o impacto ambiental provocado pelo projeto antes de ser executado (MENDES *et al.*, 2005). Para o projeto de sistemas de fachadas ventilada, a utilização da simulação numérica computacional é uma das ferramentas mais poderosas (GRACIA *et al.*, 2013).

O programa *EnergyPlus* é uma ferramenta utilizada para simulações computacionais de desempenho termo energético. Esta ferramenta foi desenvolvida e é disponibilizada gratuitamente pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, que atualiza o *software* a cada seis meses. É um *software* de análise

de energia e simulação de carga térmica e pode ser usado para diversas situações de simulações (ENERGYPLUS, 2020).

O modelo geométrico pode ser desenvolvido diretamente no *EnergyPlus* por meio de códigos, porém o programa não possui uma interface para visualizar e modelar em 3D. Para facilitar a modelagem em simulações com o *EnergyPlus*, a empresa *Bigladder* desenvolveu um *plug-in* para o *software Sketchup*, permitindo a modelagem 3D para posterior uso no *EnergyPlus*. O *plug-in Euclid* é gratuito e está disponível para *download* (BIGLADDER, 2020).

O *EnergyPlus* possui três modelos diferentes para simular um sistema fotovoltaico: “*Simple*”, “*Equivalent Onne Diode*” e “*Sandia*”. Cada um possui um modelo matemático e dados de entrada diferentes, que são usados para determinar a energia produzida pelos painéis (ENERGYPLUS, 2020). Nesse trabalho será usado o modelo simples, no qual o calor gerado pelas placas atua como um dissipador no cálculo de saída do próximo passo de tempo, diferente dos outros dois modelos (MUN *et al.*, 2020).

2.2 Sistemas de fachada dupla ventilada

Dentre os sistemas de vedação vertical externa (SVVE), existem sistemas de revestimentos não-aderidos (RNA), fixados por dispositivos que mantêm afastamento em relação ao substrato (MEDEIROS; SABBATINI, 1999), ou seja, as chamadas fachadas duplas. As fachadas duplas podem ser ventiladas, onde existe entre a estrutura portante e a camada exterior de proteção uma câmara de ar circulante. Nesta câmara de ar pode-se usar materiais isolantes. Além disso, se utiliza o nome de Fachada Ventilada Opaca quando o revestimento externo usado não é um material translúcido (BLAZIUS; ABREU; BETIOLI, 2020).

Nas fachadas ventiladas, a camada mais externa absorve a energia solar, transferindo parte dessa energia para a câmara de ar. Já a camada interna atua como uma camada isolante (PECI-LÓPEZ; ADANA, 2015). Segundo Barbos e Ip (2016), a Fachada Dupla Ventilada pode ser considerada um tipo de chaminé

acoplada ao edifício, promovendo ventilação natural através da força de empuxo induzida pelo sol e pela pressão do ar.

As fachadas ventiladas também são uma solução para o problema de entrada de água através de sistemas de vedação leves. Ancoragens ou perfis para instalação dos painéis da pele externa são instalados sobre a parede interna. A câmara de ar entre as peles é arquetetada para que todas ou algumas juntas da parede externa fiquem abertas (CHIVELET; SOLLA, 2010). A parede interna pode ser feita de concreto, bloco cerâmico, ou ainda painéis pré-fabricados. Já a pele externa deve ser resistente às intempéries, e como não tem função além de barrar a água e o sol, é ideal que seja leve e de pequena espessura. Existem diversos materiais com essas características como painéis de alumínio, placas de pedra natural, laminados de madeira, vidro, cerâmica e até mesmo os painéis fotovoltaicos (CHIVELET; SOLLA, 2010). O material mais utilizado na camada mais externa é o vidro, mas no Brasil observa-se um predomínio do uso de cerâmica ou porcelanato (BLAZIUS; ABREU; BETIOLI, 2020).

2.2.1 Fachada Ventilada e sua relação com desempenho térmico e energético

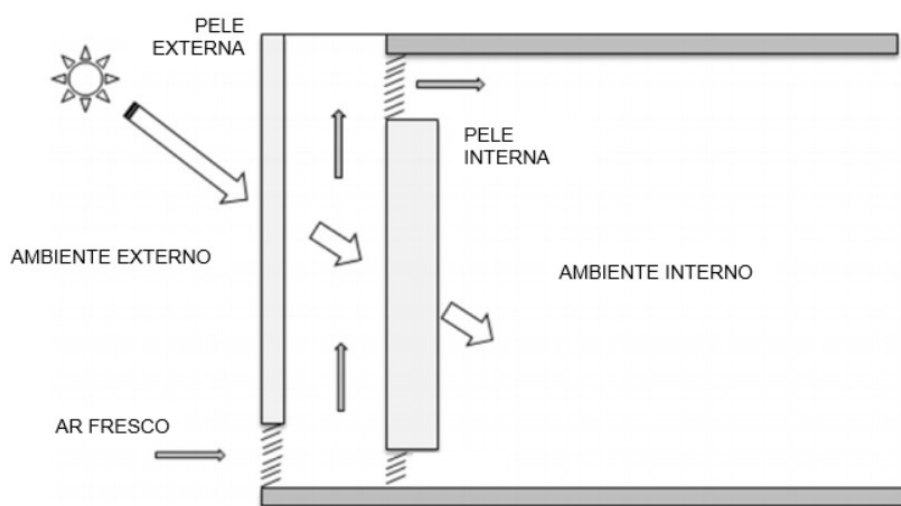
Além de evitar a passagem de água, outras vantagens da fachada dupla ventilada são: maior tolerância aos movimentos da edificação, proteção da barreira impermeável, melhor posição para o isolamento térmico, e contribuição para redução das cargas térmicas no verão devido a ventilação do ar quente na câmara (CHIVELET; SOLLA, 2010). O sistema de fachada ventilada auxilia também na proteção sonora do edifício, proteção contra o vento e poluentes, permite o resfriamento noturno dos ambientes e pode ajudar na economia de energia (AGATHOKLEOUS; KALOGIROU, 2016). Entretanto, salienta-se que os estudos citados foram desenvolvidos para climas predominantemente frios.

As fachadas ventiladas podem ter dois sistemas de ventilação: com fluxo de ar natural ou forçado, conforme mostra a Figura 2. A taxa de fluxo de ar varia ao longo do tempo nos sistemas com ventilação natural em função do clima externo, interno e do uso do edifício, o que torna a previsão de desempenho mais complexa. Já os sistemas acionados mecanicamente possuem a taxa de fluxo de ar mais ou

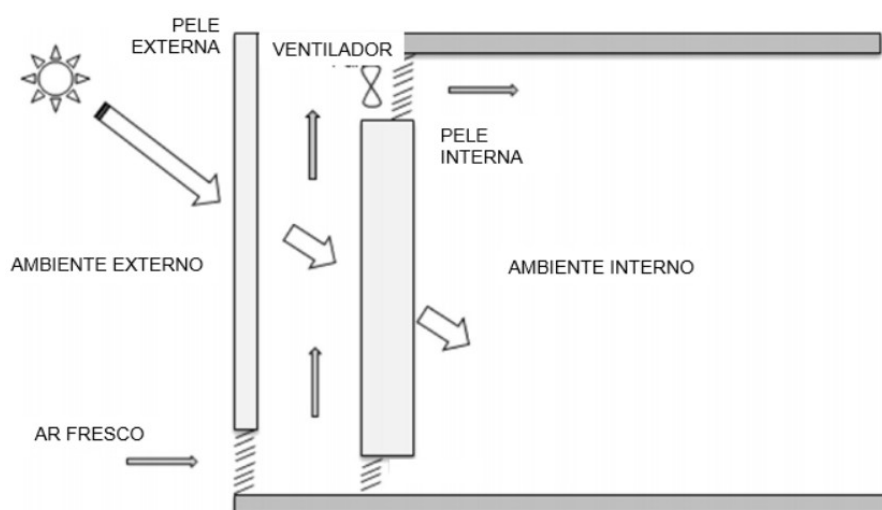
menos constante e conhecida, tornando mais fácil a estimativa de balanço térmico (BLOEM *et al.*, 2012).

O uso de ventilação natural nas fachadas ventiladas tem mais vantagens quando comparado ao uso de ventilação mecânica, já que não há necessidade de instalação de ventilador para adicionar o ar. Assim, além do custo de instalação ser reduzido, não ocorre o gasto de energia para o funcionamento do ventilador (AGATHOKLEOUS; KALOGIROU, 2016).

Figura 2 – Esquema de fachadas ventiladas naturalmente x mecanicamente



a) Ventilada naturalmente



b) Ventilada mecanicamente

Fonte: Adaptado de Agathokleous e Kalogirou (2016).

Barbosa (2015) estudou o desempenho térmico de fachadas duplas ventiladas em diferentes condições climáticas brasileiras para edificações naturalmente ventiladas nos ambientes internos de ambientes de uso de escritórios. Observou que de modo geral, os modelos simulados de fachadas duplas ventiladas comparados com edificações com paredes simples, não apresentaram benefício direto ao desempenho térmico da edificação. Entretanto, estes comentários não se aplicam para as zonas bioclimáticas brasileiras no sul do Brasil, como pode-se observar na Figura 3, que mostra a indicação do nível de aceitabilidade térmica das simulações feitas usando parede dupla ventilada nas diferentes zonas bioclimáticas. A aceitabilidade térmica alcança níveis superiores a 90% quando a parede dupla é colocada na fachada norte, e estratégias conjuntas com sistemas de ventilação natural e de condicionamento de ar podem ser usadas para reduzir o desconforto em dias extremamente quentes. (BARBOSA; IP, 2016).

Figura 3 – Zonas bioclimáticas brasileiras com indicação dos índices de aceitabilidade térmica para paredes duplas ventiladas



Fonte: Barbosa, Ip (2016).

Nas simulações feitas para o clima de Florianópolis (BARBOSA, 2015), foi comparado a porcentagens de horas de aceitabilidade de conforto térmico, porcentagem de horas com muito frio, e porcentagens com horas com muito calor,

em relação ao comportamento térmico da parede simples, e com a parede dupla ventilada. Os comentários aqui referem-se as simulações com controle de abertura para permitir ventilação cruzada em função da temperatura externa. O que se encontrou foi que com o controle da ventilação do ambiente interno no inverno, a parede dupla apresentou 1% de desconforto por frio versus 16% da parede simples. A porcentagem com período de conforto térmico foi de 92% para a parede dupla, enquanto a parede simples apresentou 81% de horas em conforto. Mas com relação a porcentagem com horas com temperaturas muito quentes, a simulação da edificação com parede ventilada apresentou 7% das horas do ano em desconforto por calor enquanto a parede simples foi de apenas 2%.

2.2.2 Sistemas fotovoltaicos

Um painel fotovoltaico é constituído de várias células fotovoltaicas associadas em série e/ou em paralelo. O mais usual é associar em série até que se obtenha o valor de tensão desejado, e em seguida associa-se em paralelo quanta fileiras forem necessárias para alcançar a potência desejada da instalação, consequentemente a intensidade de corrente elétrica (CHIVELET; SOLLA, 2010).

Quando se pensa em instalar um sistema fotovoltaico tem-se a intenção de maximizar a captação da radiação solar disponível, além de prevenir ou reduzir perdas por sombreamento, temperatura da célula, sujeira, fiação ou na conversão de corrente. Assim, é fundamental definir a localização geográfica, a orientação e os ângulos de inclinação do sistema fotovoltaico para aumentar ao máximo possível sua geração de energia (CRONEMBERGER; CAAMAÑO-MARTÍN; SÀNCHEZ, 2012).

A maior parte dos sistemas fotovoltaicos interligados com as edificações está conectada à rede elétrica pública. Nesses sistemas conectados à rede pública não é necessário o uso de baterias, já que a eletricidade gerada é transmitida diretamente à rede local. Porém, há a necessidade de um inversor para transformar a corrente de contínua para alternada (CHIVELET; SOLLA, 2010).

O uso de geração distribuída próximo aos consumidores oportuniza benefícios técnicos e econômicos, desde que feito de forma controlada e

organizada. Alguns desses benefícios são: redução das perdas na linha, redução de emissão de poluentes, redução de custos relacionados a problemas ambientais e sociais, baixo impacto ambiental, entre outros (CARVALHO, 2012).

A contribuição do sistema fotovoltaico, quando integrado nas edificações, está relacionada com a capacidade máxima de uma rede quando o pico de demanda ocorre durante o dia. Nos prédios comerciais, por exemplo, as maiores demandas de ar condicionado coincidem com as horas de alto nível de irradiação solar (SCHNEIDER; SORGATO; RÜTHER, 2018). Segundo Pereira et. al (2006), na maioria das capitais brasileiras a possibilidade das cargas coincidirem com a disponibilidade de recurso solar aumenta quanto maior a demanda energética no verão quando comparada com o período de inverno.

2.2.3 Fachada Ventilada e sua relação com desempenho de Painéis Fotovoltaicos Integrados à Edificação (BIPV)

A temperatura é um fator que pode gerar perdas na geração de energia fotovoltaica. A perda depende da tecnologia fotovoltaica usada, os módulos de silício cristalino por exemplo, perdem cerca de 4% de potência para cada 10°C de elevação da temperatura. O módulo que melhor se desempenha em altas temperaturas são os de silício amorfo. (CHIVELET; SOLLA, 2010).

Uma ventilação na parte posterior do painel reduz a temperatura e trabalho das células, melhorando seu rendimento. Como são ventilados, os sistemas de fachada dupla são apropriados para integração com um sistema fotovoltaico. A câmara de ar presente nas fachadas duplas ventiladas tem função de diminuir as temperaturas das camadas sobrepostas, contribuindo para um alto rendimento das células fotovoltaicas (CHIVELET; SOLLA, 2010). Segundo Agathokleous e Kalogirou (2016), pesquisadores concordam que espaçamentos de 10 a 15 cm entre a fachada do edifício e o sistema fotovoltaico, possibilitam que a temperatura dos PVs se mantenha em níveis baixos, e assim tenham um melhor desempenho.

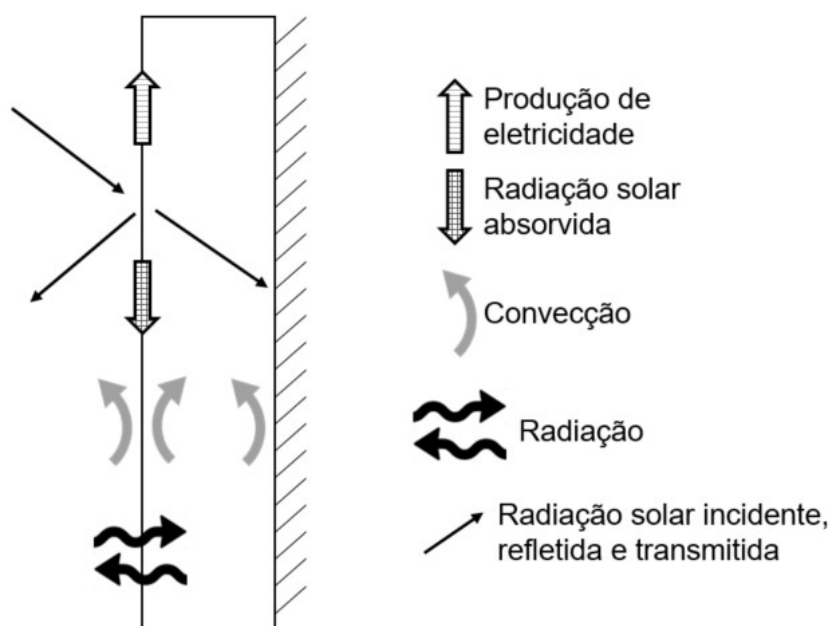
O uso de sistemas fotovoltaicos integrados à edificação é conhecido como BIPV (*building integrated photovoltaics*). O sistema BIPV é formado por componentes construtivos que combinam diversas funções do envelope com a

geração de energia elétrica. Esses componentes não servem apenas para produzir energia, e o impacto térmico desses elementos é aproveitado para outros fins (BLOEM *et al.*, 2012). No uso do sistema BIPV os materiais da envoltória servem como fechamento da edificação e simultaneamente geram energia. Dessa forma, podem ser mais econômicos tanto no âmbito dos materiais quanto de custos de energia elétrica, reduzindo o uso de combustíveis fósseis e emissão de gases que prejudicam a camada de ozônio (AGATHOKLEOUS; KALOGIROU, 2016).

A localização e orientação, tipo de uso do edifício, cargas elétricas e os códigos de construção e segurança locais são parâmetros de projeto importantes para serem considerados nos sistemas BIPV (AGATHOKLEOUS; KALOGIROU, 2016). Ao substituir elementos convencionais da construção por placas fotovoltaicas, o sistema BIPV tem grande influência na transferência de calor pela envoltória da edificação (WANG *et al.*, 2006 apud AGATHOKLEOUS; KALOGIROU, 2016).

Os sistemas de pele dupla com fotovoltaica integrada podem melhorar o desempenho energético da envoltória, uma vez que diminuem as perdas por transmissão no inverno e reduzem ganhos solares no verão (BLOEM *et al.*, 2012). Ocorrem diferentes processos de fluxo de energia quando o sistema BIPV é exposto à radiação solar. Esses processos são mostrados na Figura 4.

Figura 4 – Esquema dos fluxos de energia em sistemas BIPV



Fonte: Adaptado de Bloem et al. (2012).

O uso de sistemas de fachadas ventiladas é uma ótima chance de integrar painéis fotovoltaicos na edificação. A substituição do material da pele externa por PVs pode ser feita de duas formas: apoiados em vidro ou em suportes opacos. Na primeira opção o vidro laminado ou temperado da pele externa é substituído por um painel de vidro laminado com células fotovoltaicas. Já nas fachadas opacas os módulos fotovoltaicos são aderidos ao pano opaco externo (CHIVELET; SOLLA, 2010).

A interação de painéis fotovoltaicos com o edifício ocorre em diversos aspectos, sendo os principais apresentados na Figura 5.

Figura 5 – Esquema dos diferentes aspectos da integração fotovoltaica em edifícios



Fonte: Adaptado de Bloem et al. (2012).

Chivelet e Solla (2010) comentam que em termos construtivos, os elementos fotovoltaicos passam a desempenhar a mesma função das fachadas quando integrados a ela. Ou seja, deve-se levar em consideração a cor, imagem e tamanho dos elementos de vedação externa, impermeabilidade, estanqueidade, resistência, durabilidade e manutenção, além da segurança elétrica e os custos. Para atender tais exigências, é importante que o uso do sistema fotovoltaico integrado seja discutido desde o início do processo de projeto da edificação. Além

disso, pode proporcionar economia de material e mão de obra devido a substituição de materiais, e reduzir também os custos com energia elétrica. Porém é preciso atentar-se à estanqueidade e durabilidade do sistema fotovoltaico (PETTER; BREIVIK; DROLSUM, 2012).

Em sistemas BIPV aplicados em fachadas nas áreas urbanas, a localização, orientação e ângulos de inclinação do gerador fotovoltaico precisam de atenção específica. Ao integrar o sistema fotovoltaico na edificação nem sempre é possível posicionar o sistema da melhor forma (CRONEMBERGER; CAAMAÑO-MARTÍN; SÀNCHEZ, 2012), e quando o sistema é integrado às fachadas o ângulo de inclinação não será o mais favorável.

É importante que todos os painéis integrados à fachada sejam acessíveis para que seja possível realizar manutenção e limpeza do sistema fotovoltaico (CHIVELET; SOLLA, 2010). Deve-se cuidar com a área em que será instalado o sistema fotovoltaico, fachadas com sombreamento na maior parte do dia por exemplo, devem ser evitadas (PETTER; BREIVIK; DROLSUM, 2012).

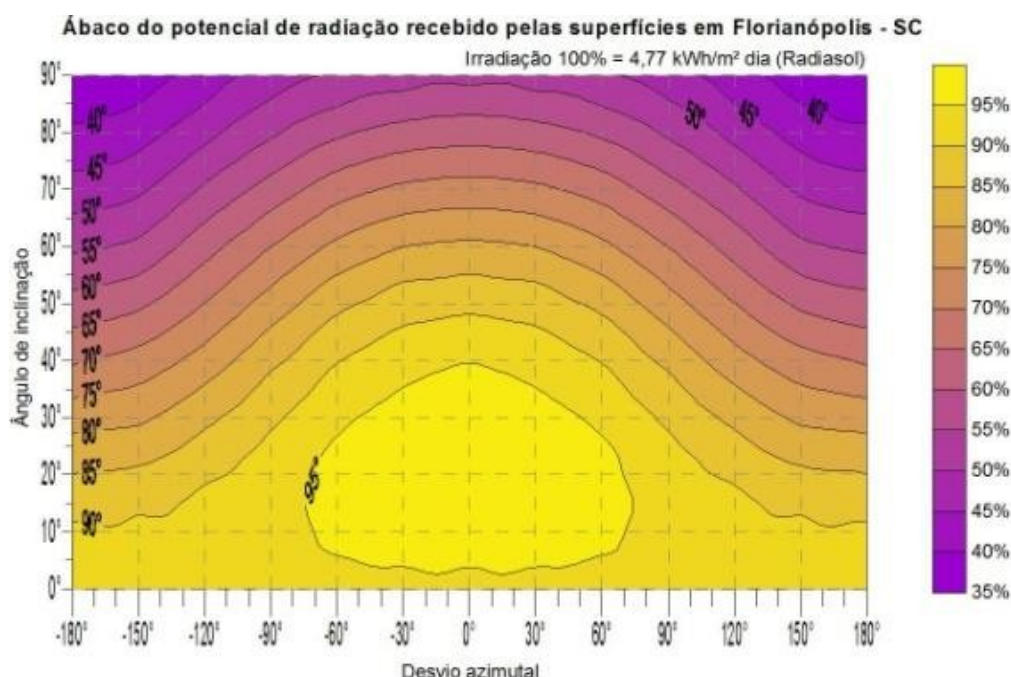
Em cidades com baixas latitudes, a instalação de painéis fotovoltaicos integrados verticalmente podem ter perdas no desempenho quando comparadas com sistemas com inclinação e orientação ideais (URBANETZ; ZOMER; RÜTHER, 2011).

Burger e Rütther (2006) estudaram o dimensionamento de inversores de sistemas fotovoltaicos de acordo com as características de distribuição dos recursos solares e de temperatura locais. O estudo foi realizado para duas localizações: Freiburg, na Alemanha (48°N) e Florianópolis, Brasil (27°S), para mostrar as diferenças entre diferentes latitudes. Concluíram que a relação de tempo dos dados de radiação solar influencia no dimensionamento correto do sistema fotovoltaico. O uso de médias horárias de irradiação pode esconder picos importantes, que devem ser considerados. Outra conclusão importante é que mesmo Florianópolis (27°S) estando em baixa latitude, o que poderia acarretar em perdas no desempenho do sistema fotovoltaico, recebe aproximadamente 30% mais radiação solar em uma fachada norte em um ano do que em uma fachada orientada para o sul em Freiburg, na Alemanha (48°N).

O trabalho de Cronemberger, Caamaño-Martín e Sànchez (2012) analisa o potencial solar de rendimento para algumas cidades brasileiras com latitude entre 0° e 30° com objetivo de oferecer ferramentas para avaliar a adequação das envoltórias para uso integrado com sistemas fotovoltaicos. Como resultado, para as 78 cidades brasileiras analisadas, a inclinação ideal do sistema fotovoltaico está quase sempre um pouco acima do valor da latitude, chegando até 9° a mais. Foi constatado também, que para as cidades brasileiras simuladas, um máximo de 60% da irradiação disponível pode ser aproveitado nas fachadas verticais. Quanto maior a latitude, maior será a irradiação recebida pela fachada, por isso, a maior taxa de utilização encontrada no estudo foi a fachada Norte em Porto Alegre (latitude 30°S), que foi de 60,3%. A pesquisa mostra ainda que nas cidades de Porto Alegre (latitude 30°S), Curitiba (latitude $25,3^{\circ}\text{S}$), Belo Horizonte (latitude $19,9^{\circ}\text{S}$) e Brasília (latitude $15,7^{\circ}\text{S}$) a irradiação nas fachadas leste e oeste possuem variações menores que 5% quando comparadas a fachada norte. Assim, essas fachadas podem ser consideradas para o uso de BIPV sem perdas expressivas.

Santos (2013) desenvolveu em sua tese uma ferramenta para auxiliar as decisões de projetos arquitetônicos com sistemas fotovoltaicos integrados. Para isso foram realizadas entrevistas com profissionais brasileiros para identificar as dificuldades na hora de trabalhar com integração fotovoltaica na arquitetura. Percebeu-se que um dos questionamentos mais frequentes foi em relação a posição de instalação, visando obter a máxima geração de energia, ou seja, o problema “forma x função” da integração do sistema fotovoltaico com a arquitetura. A solução proposta foi o desenvolvimento de ábacos mostrando a redução de irradiação para cada orientação e inclinação, que foram desenvolvidos para todas as capitais brasileiras. O ábaco para a cidade de Florianópolis está apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Ábaco do potencial de radiação recebido pelas superfícies em Florianópolis



Fonte: Santos (2013).

As cores claras do ábaco indicam orientações e inclinações expostas aos índices mais elevados de irradiação solar, e as cores mais escuras às menores incidências de irradiação. O eixo horizontal representa as variações de orientação, sendo 0° o norte, com variações de +180° e -180°, e o eixo vertical representa as variações de inclinação, sendo 0° uma superfície horizontal e 90° uma vertical. (SANTOS, 2013).

Para Florianópolis, conforme apresenta o ábaco da Figura 6, os maiores índices de irradiação estão entre os azimutes +60° e -60°, e inclinação entre 5° e 30°. Já para fachadas (inclinação de 90°) os melhores valores (55%) estão para um desvio azimutal de até 30° para a fachada norte, e as fachadas leste e oeste já passam a ter aproximadamente 45% de potencial de radiação solar recebida. Para esse ábaco 100% de irradiação equivale a 4,8 kWh/m²/dia.

2.2.4 BIPV X BAPV

As tecnologias atuais dos sistemas fotovoltaicos para uso em sistemas de geração de energia distribuída têm vantagens para aplicação ou integração no envelope das edificações (SCHNEIDER; SORGATO; RÜTHER, 2018). Além do

BIPV, existem mais uma forma de instalar placas fotovoltaicas em edificações: *Building Applied Photovoltaic* (BAPV). Os módulos no caso BAPV, normalmente são instalados na cobertura da construção, e tem como foco a obtenção da máxima geração de energia (RODRIGUEZ-UBINAS *et al.*, 2020). BAPV são considerados módulos adicionados ao edifício, sendo apoiados em uma superestrutura que suporta os módulos tradicionais (PENG; HUANG; WU, 2011), ou sistemas colocados sobre o estacionamento de veículos, por exemplo.

Já os módulos BIPV, são considerados parte funcional da estrutura da construção ou integrados ao *design* da arquitetura (PENG; HUANG; WU, 2011). Os módulos BIPV são uma solução multifuncional, já que podem ser usados em coberturas, paredes opacas ou superfícies envidraçadas, contribuindo não somente com a geração de energia, mas também com a estética e performance da edificação (RODRIGUEZ-UBINAS *et al.*, 2020).

Sabe-se que a incidência da radiação solar numa cobertura é maior do que a incidência solar nas fachadas. Entretanto, nos centros urbanos adensados e com prédios altos, nem sempre a área de cobertura é suficiente para garantir a demanda de energia da edificação (GAVIRIA; PEREIRA; MIZGIER, 2013).

Em um estudo esquemático de avaliação do potencial de aplicação de painéis fotovoltaicos no mesmo objeto de estudo deste TCC, observou-se que: (a) somente painéis na cobertura, ou somente painéis fotovoltaicos nas fachadas, não atendem isoladamente a 100% a demanda anual esperada; (b) entretanto a utilização de PV na cobertura e nas fachadas simultaneamente consegue-se um superávit anual de 110kWh de energia elétrica. Esse superávit energético poderia ser utilizado para diminuir o consumo da conta de energia mensal do Campus, ou poderia se pensar na redução da quantidade de painéis fotovoltaicos na nova edificação. (ABREU *et al.*, 2016).

2.3 Edificações Energia Zero

Acadêmicos e profissionais da área da construção civil vêm dedicando suas pesquisas nas últimas décadas para reduzir o uso de energia e as emissões de gases do efeito estufa nas edificações. A adoção do conceito das “*Zero Energy*

Buildings” (ZEB), ou Edificações Energia Zero, é uma das estratégias utilizadas como uma das mais eficazes soluções para reduzir o uso de energia e as emissões de gases. (SHIRINBAKHS; HARVEY, 2021).

ZEB produzem energia renovável suficiente para garantir o seu consumo de energia anual. Existem diversos conceitos e definições relacionadas a ZEB, e estes divergem em função do local e da organização (DOE, 2015). A Tabela 2 apresenta uma relação de significados e características de conceitos (tradução da autora de D’AGOSTINO; MAZZARELLA, 2019).

Tabela 2 – Termos sobre edifícios com energia zero

Acrônimo	Significado	Características
NZEB	Edifício Energia Quase Zero	Edifício de alto desempenho energético, com baixa quantidade de energia necessária, coberta de forma significativa por energia de fontes renováveis no local ou nas proximidades.
Net ZEB	Edifício Energia Líquida Zero	Edifício neutro em energia anual, que fornece tanta energia para a rede quanto retira.
ZEB	Edifício Energia Zero	Edifício que consome zero energia na operação do dia a dia.
ZEB	Edifício Emissão Zero	Edifício que tem emissão zero de carbono liberado no meio ambiente.
NZSoEB	Edifício Fonte de Energia Líquida Zero	Edifício que produz no local a mesma quantidade de energia que consome em um ano, quando contabilizado na fonte.
NZSiEB	Edifício Energia Líquida Zero Local	Edifício que produz no local a mesma quantidade de energia que consome em um ano, quando contabilizado no edifício.
NZEC	Edifício Zero Custo de Energia	O dinheiro que o proprietário paga pela energia consumida é equilibrado pelo dinheiro que recebe pela energia entregue à rede ao longo de um ano.
nNZEB	Edifício Energia Quase Líquida	Edifício com utilização ideal de energia de custo nacional superior a zero de energia primária.
Autonomous ZEB	Edifício Energia Zero Autônomo	Edifício autônomo, que supre suas próprias necessidades de energia.
+ ZEB	Edifício mais energia	Um edifício que produz mais energia a partir de fontes renováveis do que importa em um ano.
PV-ZEB	Edifício Energia Zero com Sistema Fotovoltaico	Edifício com baixa demanda de energia elétrica e sistema fotovoltaico.
Wind-ZEB	Edifício Energia Zero com Energia Eólica	Um edifício com baixa demanda de energia elétrica e uma turbina eólica no local.
PV-Solar thermal-heat pump ZEB	Edifício Energia Zero com Bomba de Calor Solar Fotovoltaica Térmica	Um edifício com uma demanda de calor e eletricidade, um sistema fotovoltaico em combinação com coletores solares térmicos, bombas de calor e armazenamento de calor.
Wind-Solar thermal-heat pump ZEB	Edifício Energia Zero com Bomba de Calor Solar Eólica Térmica	Um edifício com baixa demanda de calor e eletricidade e uma turbina eólica em combinação com um coletor térmico solar, uma bomba de calor e um acumulador de calor.

Fonte: D'Agostino e Mazzarella (2019).

Adiciona-se a estes o PEB (Positive Energy Building) (ZOMER et al., 2020), que tem as mesmas características do significado +ZEB proposto por D'Agostino e Mazzarella (2019).

Para que os edifícios de energia zero possam ser adotados em larga escala é preciso que seja economicamente viável e que haja incentivo. Construir um ZEB com custos comparáveis a uma edificação não energia zero requer que o edifício seja de alto desempenho. (D'ANTONIO, 2020). Algumas estratégias que podem ser usadas para uma construção mais econômica de um ZEB são:

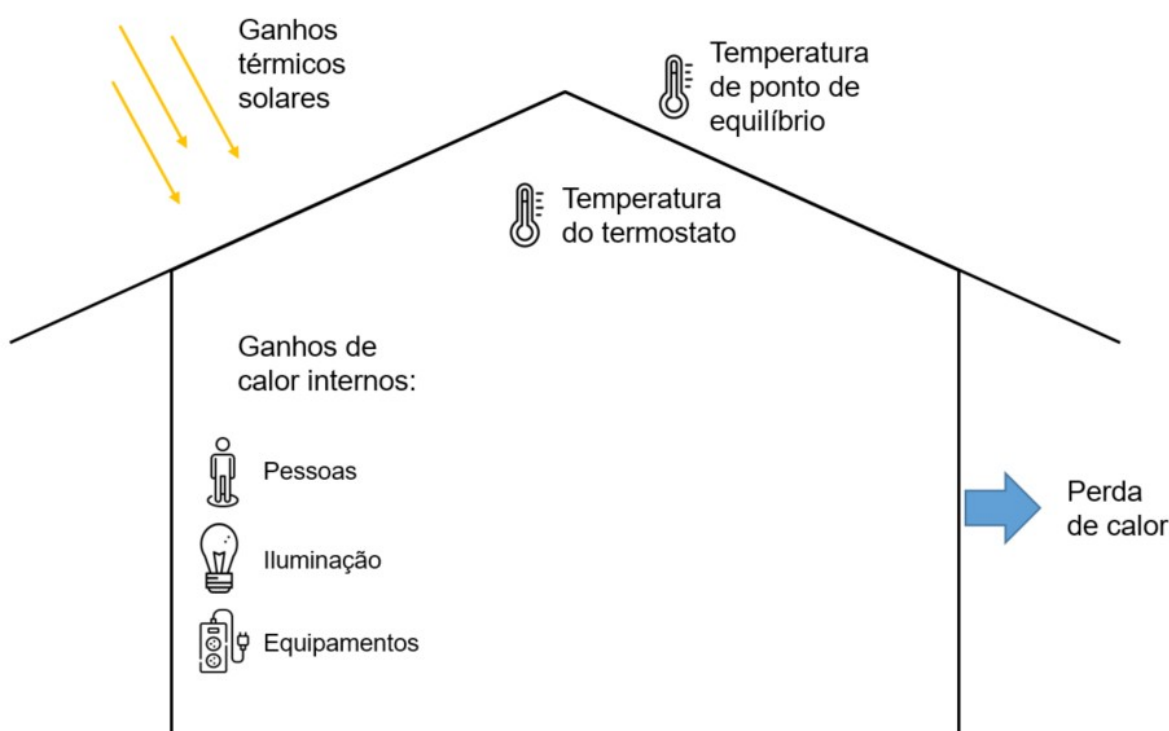
- (a) Natureza: orientação adequada;
- (b) Envelope: construir um envelope hermeticamente e ventilar usando recuperação de energia, áreas envidraçadas em lugares estratégicos;
- (c) Tecnologia: instalar sistemas de condicionamento de ar eficientes;
- (d) Zelo/Motivação: Energia em busca do objetivo que é tornar o ZEB possível;
- (e) Educação/Comportamento: reconhecer o comportamento, educar os ocupantes da edificação;
- (f) Pesquisa: Analisar a interação do envelope com o entorno, além das interações dos sistemas dentro da envoltória, usando de ferramentas de análise energética e modelação computacional. É importante pois cada edifício se comporta de maneira diferente no clima local, e tem funções e necessidades diferentes;
- (g) Observação: Monitorar e gerenciar o que não se pode medir, de forma contínua para comprovar e manter o desempenho energético. (D'ANTONIO, 2020)

2.4 Temperatura de Ponto de Equilíbrio

O desempenho térmico das fachadas é normalmente avaliado pela comparação de critérios como a transmitância térmica ("U") e o coeficiente de ganho térmico solar (SHGC – *Solar Heat Gain Coefficient*). Porém esses critérios não são os mais adequados para comparações com fachada ventilada, uma vez que

possuem um comportamento dinâmico. Fallahi, Haghighat e Elsadi (2010) adotaram o critério da carga térmica interna (aquecimento e resfriamento) para comparação do desempenho de fachadas ventiladas. Dessa forma são considerados aspectos de: transmissão térmica pela envoltória, ganhos térmicos solares, os coeficientes de transferência térmica por convecção e pela ventilação, conforme apresentados na Figura 7.

Figura 7 – Esquema dos aspectos considerados na avaliação da Temperatura de Ponto de Equilíbrio,



Fonte: Adaptado de (UTZINGER; WASLEY, 1997).

Para prever o desempenho na fase de projeto com maior precisão, é importante realizar a avaliação do uso de fachadas ventiladas desde a proposta inicial (POIRAZIS, 2007). Onde procura-se estimar de forma geral o desempenho térmico energético.

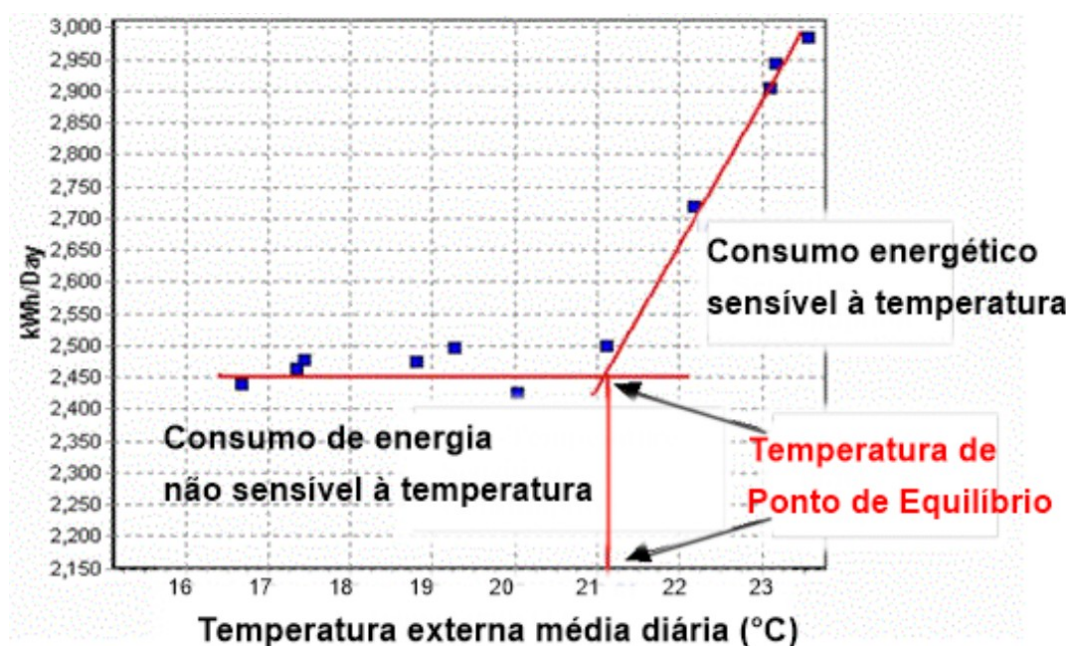
A temperatura de ponto de equilíbrio é uma característica que representa o desempenho energético da edificação, pois inclui a influência da resposta térmica da edificação com relação às variáveis climáticas e o consumo de energia do condicionamento de ar (ASHRAE, 2016). A temperatura de ponto de equilíbrio pode ser conceituada como o valor da temperatura externa na qual não é necessário

consumo de energia (aquecimento ou resfriamento) para garantir conforto térmico (KRESE *et al.*, 2018). É a temperatura na qual as perdas através do envelope se equalizam com os ganhos de calor interno da edificação (ASHRAE, 2016).

A temperatura de ponto de equilíbrio não é, entretanto, uma temperatura medida na edificação, e sim um valor estimado da temperatura externa frente ao balanço térmico neutro da edificação. Existem duas formas de estimar a temperatura de ponto de equilíbrio, através de método gráfico, ou através de equação matemática. (UTZINGER; WASLEY, 1997).

O método gráfico para estimar a temperatura de ponto de equilíbrio é exemplificado na Figura 8.

Figura 8 - Exemplificação do conceito de temperatura do ponto de equilíbrio



Fonte: https://www.archibus.net/ai/abizfiles/v21.2_help/archibus_help/Subsystems/webc/Content/energy/calcs/calc_balance_points.htm Adaptado de

A Figura 8 mostra o consumo de energia diário em função da temperatura média diária externa. Numa edificação ocorre consumo de energia com iluminação, equipamentos, entre outros, que são em função das características da edificação e do uso, e não se faz necessário o condicionamento de ar. Mas a partir de determinadas condições climáticas externas, o consumo energético aumenta devido

ao uso do condicionamento de ar. A temperatura de ponto de equilíbrio é esta faixa de temperatura externa média diária, onde o ar condicionado começa a ser usado porque as temperaturas internas naquele dia estão acima do *setpoint* estabelecido. A mesma análise pode ser feita para quando existe a mudança do consumo energético para o aquecimento do ambiente.

A definição matemática da temperatura de ponto de equilíbrio é apresentada na Equação 2 (UTZINGER; WASLEY, 1997).

$$T_{balance} = T_{thermostat} - \frac{Q_{IHG} + Q_{SOL}}{U_{BLD}} \quad (2)$$

Onde:

$T_{thermostat}$ é a temperatura do *setpoint* do ar condicionado (°C)

Q_{IHG} é a taxa de geração de calor interna da edificação por unidade de área, devida à ocupação (W/m²)

Q_{SOL} é a taxa de ganho térmico solar da edificação por unidade de área (W/m²)

U_{BLD} é a taxa de transferência térmica através da envoltória da edificação por diferença de temperatura, e por unidade de área (W/K/m²)

A (2) é uma forma aproximada de estimar a temperatura de ponto de equilíbrio, visto que assume que a transferência de calor é estática na edificação. Os dados de consumo energético podem ser obtidos através de medições em edificações existentes, ou resultantes de simulação para edificações em fase de projeto.

O gráfico da temperatura do ponto de equilíbrio (Figura 8) é uma ferramenta conceitual, que permite uma avaliação visual do desempenho térmico e dos fluxos de energia. O gráfico do consumo diário de diferentes tipos de edificações, frente ao mesmo clima, serve como uma estratégia de comparação do desempenho térmico energético.

2.5 Considerações finais do capítulo

Este capítulo apresentou conceitos que servem de embasamento teórico para o desenvolvimento deste trabalho, e para melhor interpretação dos dados dos resultados.

Observou-se na revisão de literatura que existe o potencial de se usar painéis fotovoltaicos na fachada norte na cidade de Florianópolis, e nesta incidiria 55% da radiação solar anual. Nas Fachadas leste e oeste, este potencial diminuiu para 45%. Além disso, observou-se que fachadas duplas ventiladas tem potencial de uso na cidade de Florianópolis, melhorando inclusive o desempenho térmico no período mais frio. Soma-se a isso, a possibilidade de substituir a camada mais externa das fachadas duplas por painéis fotovoltaicos.

Uma edificação projetada para ter um alto desempenho termo energético pode tornar-se uma edificação energia zero (ZEB) de maneira economicamente viável, combinando estratégias proativas de geração de energia com estratégias passivas para melhorar o desempenho.

Não é o enfoque deste trabalho conceituar ou rotular as simulações que vão ser feitas. Este trabalho é parte de uma etapa inicial na busca de uma edificação educacional sustentável e energeticamente eficiente. Durante as etapas do processo projetual arquitetônico, estudos e análises precisam ser feitos tendo como um dos objetivos a “energia zero” desta edificação, mas sem prejudicar outros aspectos de eficiência energética, de sustentabilidade e de conforto.

3 EXEMPLOS DE EDIFICAÇÕES COM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS À EDIFICAÇÃO

Neste capítulo serão apresentados alguns exemplos não residenciais com sistemas fotovoltaicos integrados, ou aplicados à edificação. Ao final são apresentados alguns detalhes construtivos de possibilidade de fixação de painéis fotovoltaicos à fachada.

3.1 Edifício Solar XXI – Lisboa, Portugal

Em 2006 o Edifício Solar XXI e seus sistemas fotovoltaicos foram inaugurados no Departamento de Energias Renováveis do INETI – Instituto de Engenharia, Tecnologia e Inovação. Essa edificação fez parte de um projeto de demonstração apoiado pelo governo de Portugal (RODRIGUES *et al.*, 2006), e possui salas, gabinetes de trabalho e laboratórios (GONÇALVES; CABRITO, 2005).

A arquitetura do prédio foi pensada para o melhor aproveitamento da iluminação e ventilação natural. A área central é provida de uma claraboia que ilumina os três pisos da edificação, e pode funcionar também para ventilação natural caso os vãos no nível da claraboia sejam abertos (GONÇALVES; CABRITO, 2005).

O projeto conta com estratégias como: otimização térmica para reduzir o gasto energético com aquecimento, arrefecimento e iluminação; integração de painéis fotovoltaicos nas fachadas; coletores solares térmicos para aquecimento do edifício; ventilação e iluminação natural; e sistema de arrefecimento de ar pelo solo (GRAÇA, [s.d.]).

O sistema construtivo do Solar XXI é alvenaria de bloco cerâmico de 22 cm, com 6 cm de isolamento de poliestireno expandido, totalizando uma transmitância térmica de $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. A laje de cobertura é em concreto, maciça e com isolamento de poliestireno expandido e extrusivo, com transmitância térmica do sistema de $0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$.

O sistema fotovoltaico integrado na fachada do edifício é formado por 76 módulos, totalizando 96 m^2 de área, como é apresentado na Figura 9. Somente esse sistema produz aproximadamente 30 kW/h por dia, o que representa em média 40% da energia elétrica total consumida pelo edifício. Além do sistema integrado na fachada, o projeto conta com dois sistemas no estacionamento, o mais antigo com 100 módulos fotovoltaicos de silício amorfo totalizando 95 m^2 , que representa cerca de 33% da energia elétrica consumida e o mais recente equivale a 120 m^2 . Com a implementação do último sistema espera-se que o edifício produza toda a energia elétrica que consome, tornando-se um edifício de “Zero consumo energético” (*Near zero energy building*). (GRAÇA, [s.d.])

Figura 9 – Fachada sul Edifício Solar XXI

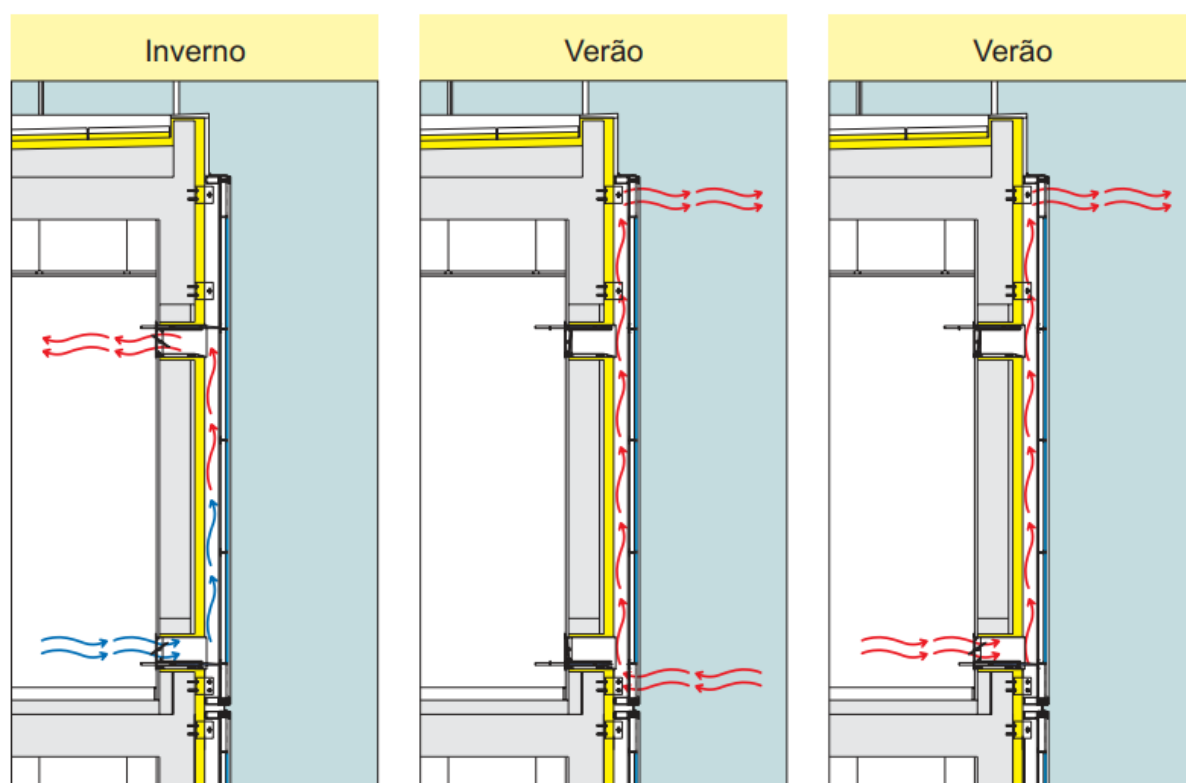


Fonte: Graça (s.d.).

A forma como os painéis foram instalados na fachada permitem o aproveitamento do calor produzido pelas placas solares no período do inverno. O ambiente interno se comunica com o espaço posterior dos painéis, possibilitando a recuperação do calor produzido através de duas aberturas, uma superior e outra inferior, controladas pelo usuário da sala (GONÇALVES; CABRITO, 2005). A Figura 10 mostra o funcionamento desse esquema de aproveitamento.

Essas aberturas para a fachada ventilada podem ser aproveitadas também nos períodos mais quentes, de duas maneiras diferentes: quando o calor produzido pelos painéis é expelido diretamente para o exterior; ou é aproveitado o efeito chaminé que ocorre para retirar o calor interno do ambiente para o exterior (GONÇALVES; CABRITO, 2005).

Figura 10 – Esquema de aproveitamento térmico do sistema fotovoltaico aplicado na fachada ventilada



Fonte: adaptado de Gonçalves e Cabrito (2005).

3.2 Torre CIS – Manchester, Reino Unido

Em Manchester, Reino Unido, a Torre CIS teve parte de sua fachada remodelada em 2005, quando o núcleo de elevadores e escada foi revestido com a fachada fotovoltaica ventilada (CHIVELET; SOLLA, 2010). A edificação de escritórios foi construída na década de 1960, e possuía parte de sua fachada coberta por ladrilhos. Porém por conta do tempo e poluição, esses ladrilhos estavam caindo, precisando então de uma reforma das fachadas (SOLARCENTURY, 2009).

Foram instalados mais de 7200 painéis, com 4900 células fotovoltaicas de 80W interligados à rede. Nas áreas do núcleo onde há sombreamento ou difícil acesso a manutenção, foram instalados revestimentos com a mesma aparência exterior dos painéis fotovoltaicos, para que a estética do prédio ficasse uniforme (CHIVELET; SOLLA, 2010), conforme mostra a Figura 11. Três das quatro fachadas da torre são revestidas com placas fotovoltaicas, possibilitando a coleta de energia

do amanhecer ao anoitecer, uma vez que a face central está voltada para o sul (SOLARCENTURY, 2009).

Figura 11 – Fachadas Torre CIS em Manchester, Reino Unido



Fonte: Adrian Welch (2006).

3.3 Sede Isofóton – Málaga, Espanha

Localizada no Parque Tecnológico de Málaga, Espanha, a sede da empresa fabricante de painéis fotovoltaicos Isofóton (Figura 12) é revestida de painéis de células amorfas sobre placas de cerâmica vitrificada. O projeto contempla um pavilhão de fabricação de painéis e uma área de escritórios organizados ao redor de um átrio central (CHIVELET; SOLLA, 2010).

Além da fachada ventilada com placas fotovoltaicas integradas, o edifício conta com diversas outras estratégias da arquitetura bioclimática, visando a redução do consumo energético do ar condicionado. Elementos de sombreamento nas fachadas mais ensolaradas, fachadas ventiladas, divisórias em vidro duplo, um pátio central que funciona como regulador climático e umidificador e uma tampa de vidro que ameniza os efeitos do sol no verão são as principais estratégias usadas no projeto (EYRAS, I. *et al.*, 2006).

Figura 12 – Sede Isofóton em Málaga, Espanha



Fonte: Isofóton (2007).

O edifício de escritórios foi revestido com painéis fotovoltaicos em diferentes tipos de integração com a fachada: fachada ventilada, parede-cortina, brises e claraboias. Além de painéis na fachada, há também coletores com tubos à vácuo e painéis solares na cobertura, ao redor da claraboia (CHIVELET; SOLLA, 2010). As quatro fachadas da edificação são revestidas com cerâmica, em um sistema de ripas ou corrimãos, formando uma fachada ventilada. A ventilação na câmara de ar ocasionada por convecção natural oferece melhorias na proteção térmica, estanqueidade e estabilidade (EYRAS, I. *et al.*, 2006).

Foram instalados mais de 1100 módulos cerâmicos nas fachadas ventiladas sudeste e sudoeste, sendo 120 módulos de vidro duplo na parede-cortina e 26 módulos de vidro laminado nos brises sobre a parede-cortina (CHIVELET; SOLLA, 2010). A fachada ventilada facilita a instalação e possíveis reparos no cabeamento e nos painéis devido ao sistema de carris e ancoragem a seco. As paredes cortinas são divididas em três listras horizontais: a faixa central é uma área de visibilidade, de vidro transparente; e as faixas inferior e superior são peitoris e vergas, onde estão os painéis fotovoltaicos, como mostra a Figura 13 (EYRAS, I. *et al.*, 2006).

Os elementos de sombreamento foram instalados nas fachadas sudeste e sudoeste, bloqueando a radiação solar excessiva perto do meio-dia e no verão, porém possibilitando a entrada dos raios solares pela manhã e no inverno. A posição desses elementos foi pensada também para evitar grandes sombreamentos nos painéis fotovoltaicos das fachadas (EYRAS, I. *et al.*, 2006).

Figura 13 – Vista interna da parede-cortina no período de construção



Fonte: Eyras et. Al. (2006).

O sistema implementado na fachada ventilada inclui painéis-sanduiche por trás da vedação, deixando uma câmara de ar ventilada de 10 cm. Os painéis cerâmicos da fachada ventilada possuem 12 mm de espessura, são instalados na horizontal e fixados com quatro grampos duplos de aço inoxidável. As juntas horizontais são de 12 mm e as verticais são invisíveis (CHIVELET; SOLLA, 2010).

Figura 14 – Detalhe da fachada ventilada da Sede Isofóton em Málaga, Espanha



Fonte: Isofóton (2007).

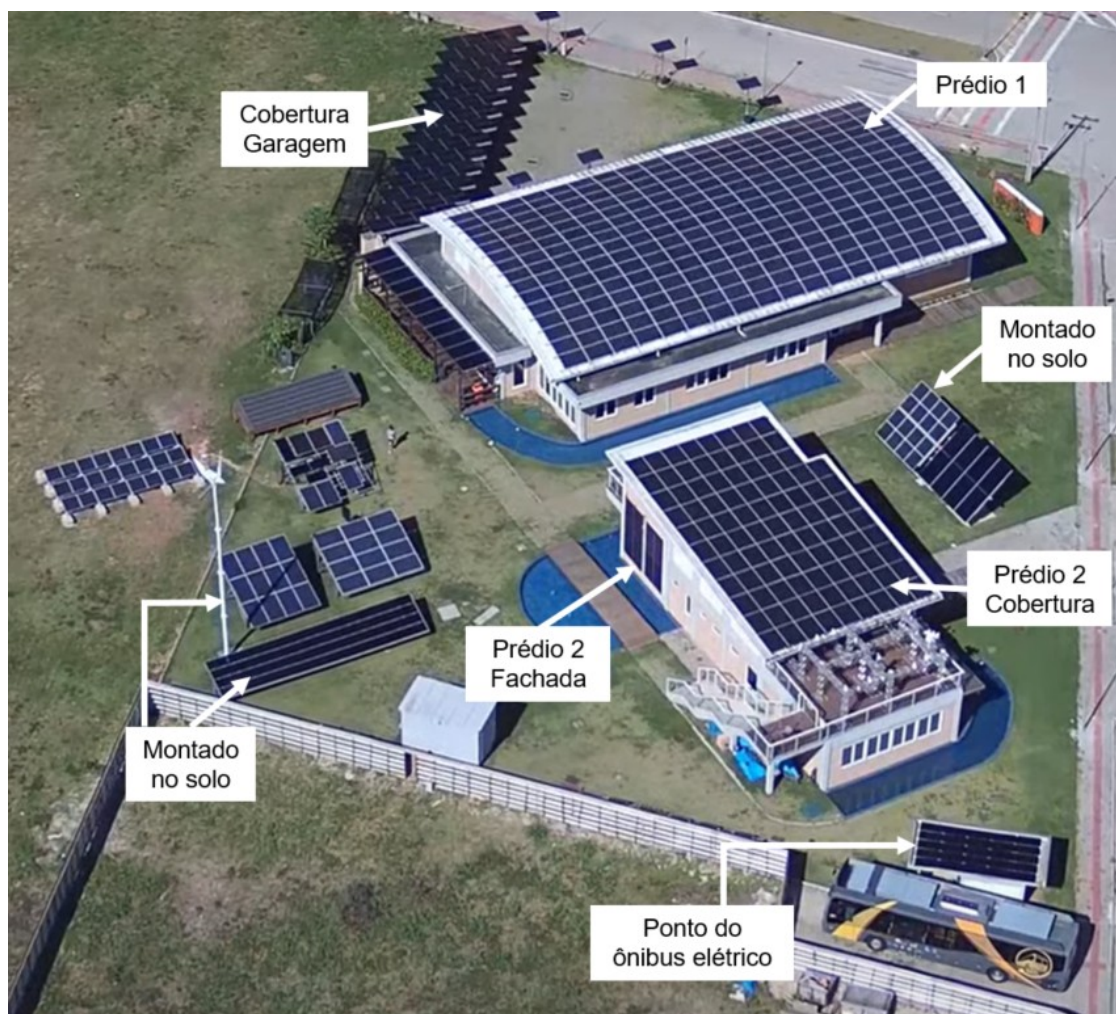
3.4 Fotovoltaica – Florianópolis, Brasil

O primeiro sistema fotovoltaico conectado à rede e integrado a edificação do Brasil está localizado no prédio de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), o Laboratório de Energia Solar (LABSOLAR) está em operação desde 1997. O sistema é uma marquise orientada para o norte verdadeiro, com inclinação de 27° , igual a latitude local. (NASCIMENTO; RUTHER, 2014).

Inicialmente o laboratório desenvolvimento estava localizado no campus central, mas em 2015 começou a operar em um novo prédio, ainda em Florianópolis. Essa nova edificação foi projetada para demonstrar diferentes possibilidades de integração de painéis fotovoltaicos com a arquitetura, pensando não apenas na máxima geração de energia, mas também buscando harmonia entre a forma da edificação com a função dos painéis (URBANETZ; ZOMER; RÜTHER, 2011).

O laboratório foi projetado por uma equipe interna de engenheiros e arquitetos da UFSC, e consiste em dois prédios, conforme Figura 15. O Prédio 1 possui o sistema aplicado em uma cobertura arredondada, enquanto o Prédio 2 possui uma cobertura reta. Além do sistema na cobertura, o Prédio B possui também sistemas aplicados na fachada da edificação. Existem também sistemas montados no solo e no ponto do ônibus elétrico. (ZOMER et al., 2020).

Figura 15 – Vista aérea do Laboratório Fotovoltaica/UFSC



Fonte: Fotovoltaica UFSC (2020).

As duas coberturas têm a integração com os sistemas fotovoltaicos visíveis do chão, para demonstrar que os sistemas podem ser interligados em qualquer formato de telha. A cobertura do Prédio 1 é um sistema com 270 módulos e 66,1 kWp de energia máxima total, sendo dois terços do sistema com orientação para o norte e o restante quase horizontal ou levemente voltado para o sul. Já o

Prédio 2 possui um sistema de 13,5 kWp aplicado em uma cobertura com 6° de inclinação, voltado para o norte. (ZOMER, et al., 2020).

A cobertura da garagem é um sistema de 13,4 kWp, inclinação de 5° e orientados a oeste. O sistema do ponto do ônibus elétrico é de 2,4 kWp, locados na cobertura de 3° de inclinação e voltados para o leste. Os painéis instalados na fachada do Prédio 2 possuem juntos 2,5 kWp, e estão fixados na fachada leste. Por último, os sistemas montados no solo totalizam 6,8 kWp, e são orientados a norte com uma inclinação de 20° (ZOMER et al., 2020).

Os dois sistemas instalados na fachada estão a uma distância de 16 cm da parede, e são instalados de duas formas diferentes: um possui uma câmara de ar ventilada, e o outro possui a câmara fechada, não ventilada (ZOMER et al., 2020). O sistema fotovoltaico com ventilação gerou aproximadamente 10% mais energia do que o sistema não ventilado. Em dias com sol sobre a fachada a temperatura superficial da parede sem painel é superior a temperatura da parede atrás dos painéis fotovoltaicos dos dois sistemas. Porém, em dias com pouca radiação, a temperatura superficial atrás do sistema não ventilado apresentou em torno de 2°C a mais que as temperaturas superficiais da parede exposta e da parede atrás do sistema ventilado. (GOULART, 2021).

Entre agosto de 2017 e fevereiro de 2020 a geração solar da edificação evitou a emissão de 21,51 tCO₂, e gerou 148% da energia necessária para uso da edificação. Sendo assim, o laboratório pode ser considerado um PEB (*Positive Energy Building*), pois não apenas produz o que consome, como os ZEB (*Zero Energy Building*), mas possuem um saldo positivo de energia. (ZOMER et al., 2020).

4 MÉTODO

Este capítulo mostra os métodos empregados na avaliação termo energética da edificação objeto de estudo, e a avaliação do potencial da geração de energia dos sistemas fotovoltaico colocadas na fachada da edificação. As análises foram feitas por meio de simulação computacional, com o auxílio do *software EnergyPlus*, e a leitura dos resultados foi feita usando planilhas do Excel. As versões dos *softwares* utilizados são: *EnergyPlus* 9.4.0 e Excel 2013.

4.1 Objeto de estudo

O objeto de estudo deste trabalho é o estudo volumétrico para o novo bloco do Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACC) do Instituto Federal de Santa Catarina, em Florianópolis (IFSC). Como ainda não há definição de forma e altura para o projeto, considerou-se o layout desenvolvido por Quevedo (2019). O novo bloco será implantado na frente do atual bloco do DACC, nos fundos do terreno do IFSC – Campus Florianópolis como mostra a Figura 16.

Figura 16 – Implantação novo bloco DACC

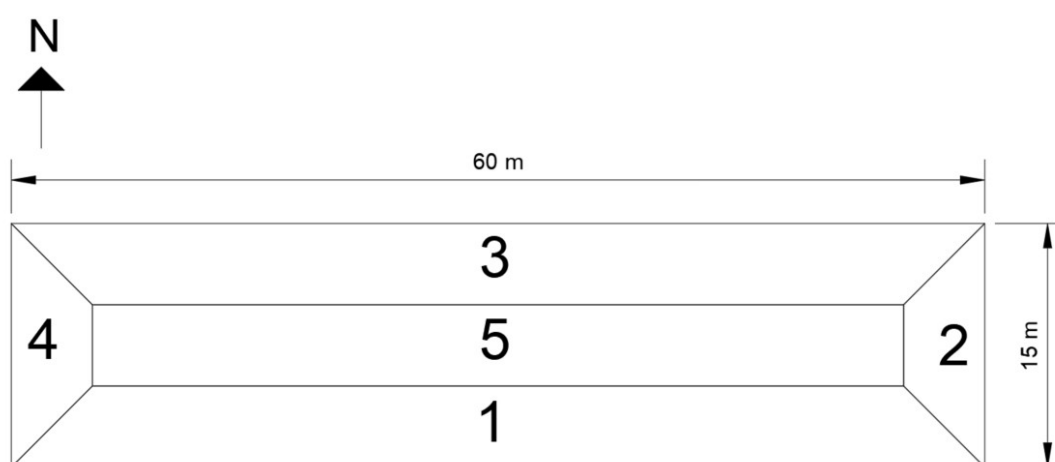


Fonte: adaptado de Google Maps

As maiores fachadas da nova edificação serão voltadas para norte/sul, orientações onde há maior e menor incidência de radiação solar anual, respectivamente. O projeto considerado teve suas dimensões definidas de acordo com o plano diretor interno do IFSC Campus Florianópolis, com dimensões 15 por 60 metros. Além disso, a altura foi definida de acordo com o Plano Diretor de Florianópolis, a Lei 482 de 2014, adotou-se então uma altura de 22 metros, sendo o pavimento térreo com 4 metros de pé direito e 6 pavimentos tipo com 3 metros de pé direito cada (QUEVEDO, 2019).

A planta do modelo adotado é dividida em zonas periféricas/perimetrais e uma zona do núcleo da edificação. As zonas perimetrais são diretamente influenciadas pela envoltória do edifício, já o núcleo não sofre influência significativa das fachadas, por isso pode ser uma zona única (ASHRAE *standard* 90.1 2016 - Apêndice G). A Figura 17 representa o zoneamento em uma planta esquemática do pavimento tipo do objeto de estudo. As zonas 1, 2, 3 e 4 são as zonas perimetrais, e a zona 5, o núcleo.

Figura 17 – Esquema da planta do modelo adotado



Fonte: Adaptado de Quevedo (2019).

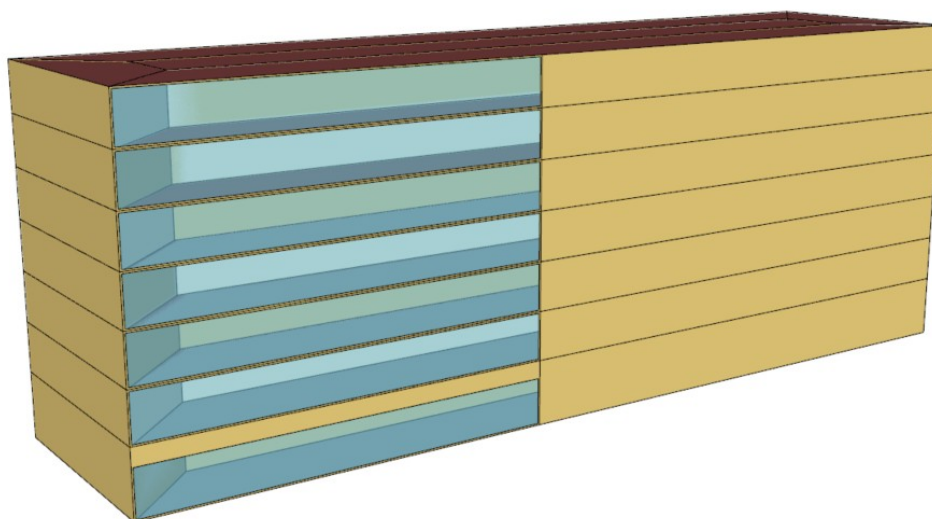
Dentre todos os modelos simulados na pesquisa de Quevedo (2019), foi escolhido um modelo que resultou em nível “A” de acordo com os parâmetros da Instrução Normativa Inmetro – Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C). O modelo desenvolvido por Quevedo (2019) serviu como base para adaptações feitas para o desenvolvimento desse trabalho. Os modelos desenvolvidos a partir desse caso base são explicados no item a seguir.

4.1.1 Modelos de simulação

A partir do modelo de Quevedo (2019) foram elaborados 3 casos para o desenvolvimento desse trabalho: (a) um caso base, que é um dos modelos com resultado “nível A”, porém sem sombreamento; (b) um modelo com sistema fotovoltaico aplicado em fachada simples; (c) um modelo com sistema fotovoltaico aplicado em fachada dupla ventilada. Nos dois casos onde há sistema fotovoltaico,

esse será aplicado apenas na fachada norte, assim como o sistema de fachada dupla ventilada. Os modelos possuem 6300 m² de área total, sendo 4550 m² de área condicionada. A Figura 18 representa o modelo base.

Figura 18 – Modelo geométrico do objeto de estudo



Fonte: Autora (2021).

Uma das adaptações feitas no modelo foi a mudança de posição das janelas, mantendo o percentual de abertura da fachada de 30%. Essa troca foi feita para viabilizar a configuração da parede ventilada e dos painéis fotovoltaicos no *EnergyPlus*, uma vez que é preciso conectar uma superfície a esses objetos. Com a nova modelagem, a área de fachada opaca é uma superfície única por pavimento, evitando ter que dividir a fachada em diversas superfícies diferentes.

4.2 Diretrizes dos modelos avaliados

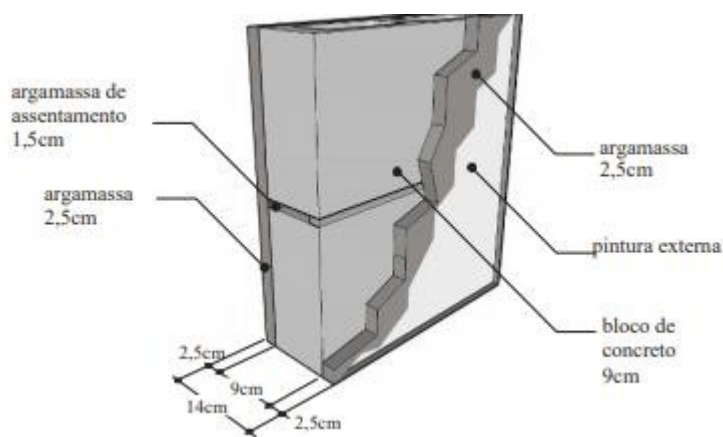
Os sistemas construtivos da edificação serão os mesmos nos três casos, e os parâmetros considerados foram propostos no trabalho de Quevedo (2019), e serão apresentados a seguir.

O percentual de abertura de fachada (PAF) é de 30%, e o vidro é um dos mais usados na construção civil, simples claro, de 6 mm de espessura e fator solar de 0,84. A parede dupla ventilada será com pele externa de painéis fotovoltaicos,

com uma câmara de ar de 10 cm entre o sistema e a parede interna. A cobertura da edificação é formada por uma laje nervurada com fechamento em telha sanduíche, resultando em uma transmitância térmica $U = 0,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e absorptância solar de 0,2.

O sistema de vedação vertical consiste em blocos de concreto com reboco e pintura internos e externos, como ilustra a Figura 19. A absorptância solar da pintura é de 0,5 e a transmitância térmica “U” é de $1,9 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Figura 19 – Ilustração do sistema de vedação vertical de bloco de concreto



Fonte: BRASIL (2013).

Os parâmetros considerados para densidade de iluminação, ocupação, equipamentos internos e infiltração de ar das zonas estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Cargas internas

Parâmetro	Valor
Ocupação	1,5 m ² por pessoa
Iluminação	15,5 W/m ²
Equipamentos internos	9,7 W/m ²

Fonte: Adaptado de Quevedo (2019).

4.3 Simulação computacional

Foram realizadas 3 simulações, correspondentes aos três casos propostos. As adaptações na geometria foram feitas no *Sketchup* aliado ao *plugin*

Euclid, que converte as informações geométricas do *Sketchup* para a extensão e linguagem usada no *EnergyPlus* (QUEVEDO, 2019).

O padrão de ocupação, acionamento do sistema de iluminação e funcionamento do ar condicionado foi criado para reproduzir os horários de aula do IFSC: das 7:30h às 11:30h, das 13:30h às 17:30h e das 18:30h às 22:30h, em dias de semana.

A simulação foi definida para o período de um ano, de 01 de janeiro a 31 de dezembro, desconsiderando feriados e o período de férias. Como a edificação é localizada em Florianópolis, foi usado um arquivo climático SWERA da cidade. O SWERA foi escolhido pois fornece dados sobre fontes de energia renováveis e os instrumentos necessários para sua aplicação (NAVARRO; VALADÃO, 2017).

O piso térreo da edificação está em contato com o solo, por isso, utilizou-se o objeto *Ground Domain: Slab* no *EnergyPlus* para calcular as trocas de calor com o solo.

Para modelagem do sistema de ar condicionado foi usado um objeto *template* do *EnergyPlus* do tipo PTHP para as zonas ocupadas, ligado durante os horários de aula do IFSC. O *setpoint* utilizado foi de 22°C para aquecimento e 24°C para resfriamento, e o COP é 2,6.

Para a modelagem do sistema fotovoltaico no *EnergyPlus* são necessários 4 objetos diferentes, são eles: *Generator: Photovoltaic*, *Photovoltaic Performance: Simple*, *Electric Load Center: Generators*, *Electric Load Center: Inverter: Simple* e *Electric Load Center: Distribution*.

O primeiro objeto, *Generator: Photovoltaic*, descreve a matriz dos módulos fotovoltaicos. Nesse objeto foram definidas as superfícies onde estão instalados os módulos e o tipo de objeto para representar a performance desses painéis. Outra opção desse objeto é o modo de integração de transferência de calor, que pode ser preenchido como *Integrated Exterior Vented Cavity*, ou seja, uma cavidade ventilada atrás dos painéis. Essa opção se encaixa no último modelo de simulação, com parede ventilada, porém com o uso do objeto mais simples de performance dos painéis essa configuração deixa de ser considerada pelo

programa. Como esse trabalho é uma análise preliminar do projeto e não existe definição do tipo de painel que pode ser usado, não foi considerado para os sistemas fotovoltaicos a ventilação natural atrás do sistema, o que melhoraria sua eficiência.

No objeto mais simples de performance, *Photovoltaic Performance: Simple*, definiu-se a fração da superfície com módulos ativos e a eficiência das células, que foi considerado um valor fixo. O objeto *Electric Load Center: Generators* lista os geradores de energia elétrica que foram considerados na simulação.

O inversor é configurado no objeto *Electric Load Center: Inverter: Simple*, onde é definido uma escala de disponibilidade e a eficiência do inversor. Por último, as informações do painel e inversor configurados nos outros objetos são conectadas no objeto *Electric Load Center: Distribution*. A Tabela 4 mostra os parâmetros considerados na configuração dos objetos do sistema fotovoltaico.

Tabela 4 – Dados de entrada da caracterização do sistema fotovoltaico

Campo	Valor
Fração da área com módulos ativos	1
Eficiência das células	0,12
Eficiência do inversor	1

Fonte: EnergyPlus (2020).

Já para a configuração da fachada ventilada no *EnergyPlus* são necessários dois objetos: *Surface Property: Other Side Conditions Model* e *Surface Property: Exterior Natural Vented Cavity*. O primeiro configura as modificações do outro lado de uma superfície, trabalhando junto com outros objetos. Para fachadas ventiladas o segundo objeto é específico para descrever uma superfície com uma cavidade naturalmente ventilada. Para definir quais superfícies têm essas características, é preciso mudar a condição do limite externo no objeto *Building Surface: Detailed*, selecionando a opção *Other Side Conditions Model*, e o objeto configurado para tal característica.

Todas as informações necessárias para a configuração da fachada ventilada no *EnergyPlus* estão apresentadas na Tabela 5. Esses valores foram baseados na monografia de Netto (2018), com algumas adaptações para o modelo

desse trabalho. A absorção e a rugosidade da parede exterior foram alteradas para condizer com os painéis solares da pele externa.

Tabela 5 - Dados de entrada da caracterização da fachada ventilada

Campo	Valor
Fração da área de aberturas	0,1
Emissividade térmica do material da parede exterior	0,9
Absorção solar da parede exterior	0,92
Escala de altura para ventilação	0,5
Espessura efetiva da cavidade atrás da parede exterior	0,1
Razão da área de superfície real para área de superfície projetada	0,9
Rugosidade da superfície exterior	Muito liso
Eficácia das aberturas em relação ao vento	0,6
Coefficiente de descarga para aberturas	0,65

Fonte: Adaptado de Netto (2018).

Alguns dos parâmetros apresentados na Tabela 5 são: a fração de área de aberturas é a fração de área para a parte do defletor que consiste em aberturas; a escala de altura para ventilação é a altura do ponto médio da abertura inferior ao nível de pressão neutra; a razão da área de superfície real para área de superfície projetada é o fator que leva em consideração a área de superfície extra resultante de uma superfície defletora irregular; a eficácia das aberturas em relação ao vento é o valor para o coeficiente usado para determinar as trocas de ar naturais do vento; e o coeficiente de descarga para aberturas é o valor usado para determinar as trocas de ar naturais da fluabilidade, dependendo da geometria da abertura. (ENERGYPLUS, 2020).

4.4 Seleção do método de simulação

O sistema de fachada dupla ventilada pode ser modelado de duas formas no software *EnergyPlus*, com o objeto “*SurfaceProperty: ExteriorNaturalVentedCavity*” ou utilizando os objetos “*AirflowNetwork*”. Inicialmente foram modelados edifícios teste para estudo dos dois modos de simulação, para posterior escolha de qual método adotar.

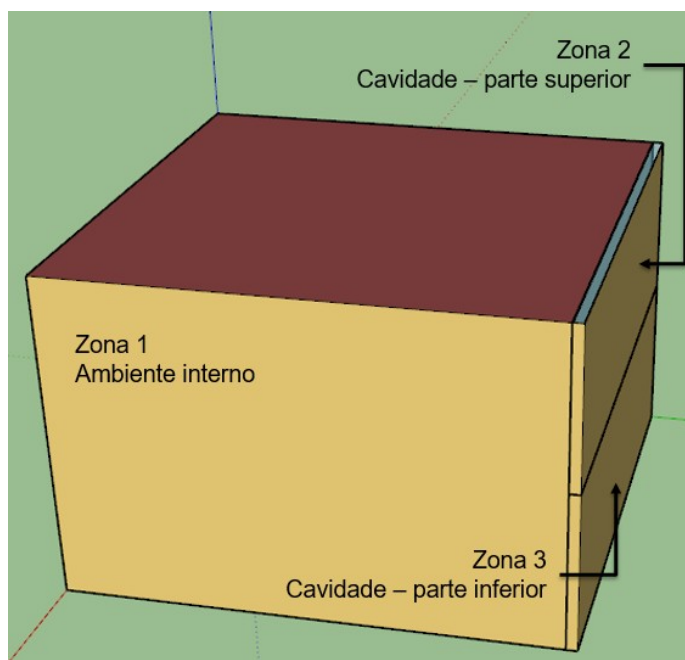
O modelo teste possui dimensões 4,5 m x 4,5 m e pé direito de 3 m. Todas as paredes, piso e cobertura foram configurados como concreto de 15 cm e como superfícies adiabáticas, com exceção da fachada que será ventilada. O modelo não tem janelas nem cargas internas. Esse teste foi desenvolvido dessa forma com o objetivo de avaliar apenas a superfície equivalente a fachada ventilada, sem outras interferências.

Três simulações foram desenvolvidas a partir do modelo de teste: o Modelo 1, sem parede ventilada; o Modelo 2, com parede ventilada utilizando o objeto “*SurfaceProperty: ExteriorNaturalVentedCavity*”; e o Modelo 3, com parede ventilada usando os objetos “*AirflowNetwork*”. Em ambos os modelos com sistema de fachada dupla, a câmara ventilada possui 10 cm de espessura.

Foram extraídos dados de temperatura externa e temperatura interna média do ar da zona, para comparar os resultados dos três modelos. A simulação foi rodada para o dia típico de verão para Florianópolis, além de usar o arquivo climático SWERA da mesma cidade.

Os Modelos 1 e 2 não exigem ajustes geométricos no modelo, já para o Modelo 3 é necessário adicionar duas zonas equivalentes à cavidade ventilada, conforme mostra a Figura 20. Esses ajustes foram realizados no software *Sketchup* aliado ao *plug-in Euclid*.

Figura 20 – Modelo de teste *Air-flow Network*



Fonte: Autora (2021).

As zonas foram modeladas com o tamanho real da cavidade, e além disso, foram adicionadas janelas, que foram usadas no modelo de ventilação do “*AirflowNetwork*”.

Os modelos foram simulados com base em dois trabalhos que utilizaram os objetos citados, são eles: o estudo de Kim *et al.* (2018) que usou o *EnergyPlus* para investigar os efeitos térmicos de uma fachada dupla ventilada com persianas internas e externas com a classe “*Airflow network*” para configurar a fachada ventilada; e o trabalho de Netto (2018) que descreveu em seu trabalho um modelo para cavidades naturalmente ventiladas formadas por defletores leves no exterior de fachadas opacas utilizando do objeto “*SurfaceProperty: ExteriorNaturalVentedCavity*”.

Porém essas simulações teste não foram conclusivas devido às poucas informações do modelo de simulação que usava a classe “*Airflow Network*”, que não permitiu a configuração dos objetos com precisão para representar uma fachada ventilada. Além disso, a limitação de tempo para desenvolver o TCC impediu a busca por mais referências e estudos sobre o uso dessa classe para simulação de fachadas ventiladas. Por isso, optou-se pelo uso do objeto “*SurfaceProperty:*

ExteriorNaturalVentedCavity”, uma vez que o objeto foi desenvolvido especificamente para a simulação de superfícies ventiladas, e ainda há informações suficientes de outros estudos para a configuração do objeto.

4.5 Determinação dos parâmetros avaliados

O consumo e balanço de energia dos três modelos foi determinado por um dado de saída da simulação no *EnergyPlus*. Os resultados são anuais em kWh. A geração de energia pelo sistema fotovoltaico é um dado de saída da simulação do *EnergyPlus*.

A carga térmica foi calculada dividindo as perdas e ganhos de calor (kWh) pela área total da edificação (m^2). Esses cálculos foram feitos com auxílio do *Excel*, e os dados para calcular foram retirados da simulação do *EnergyPlus*.

O balanço térmico foi calculado para analisar os ganhos e perdas de calor através dos componentes opacos da edificação. Os relatórios de saída do *EnergyPlus* fornecem os dados de ganho/perda de calor referente a cada superfície, e o ganho por convecção referente à iluminação, equipamentos, pessoas e infiltração. (MELO; LAMBERTS, 2008). Os resultados são obtidos em kWh por mês.

A temperatura de ponto de equilíbrio foi definida pelo método gráfico. Para isso, extraiu-se os dados de consumo diário de energia em kWh e as temperaturas externas através da simulação computacional. A partir desses dados montou-se o gráfico para obter a temperatura de ponto de equilíbrio. Para montar o gráfico foram excluídos dados de consumo do final de semana e do período de férias, considerando que nesses dias não haverá uso de condicionamento de ar e nem ganhos significativos de calor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo foram analisados os resultados das simulações dos três casos. Foram avaliados dados do balanço de energia, carga térmica, geração de energia e temperatura de ponto de balanço.

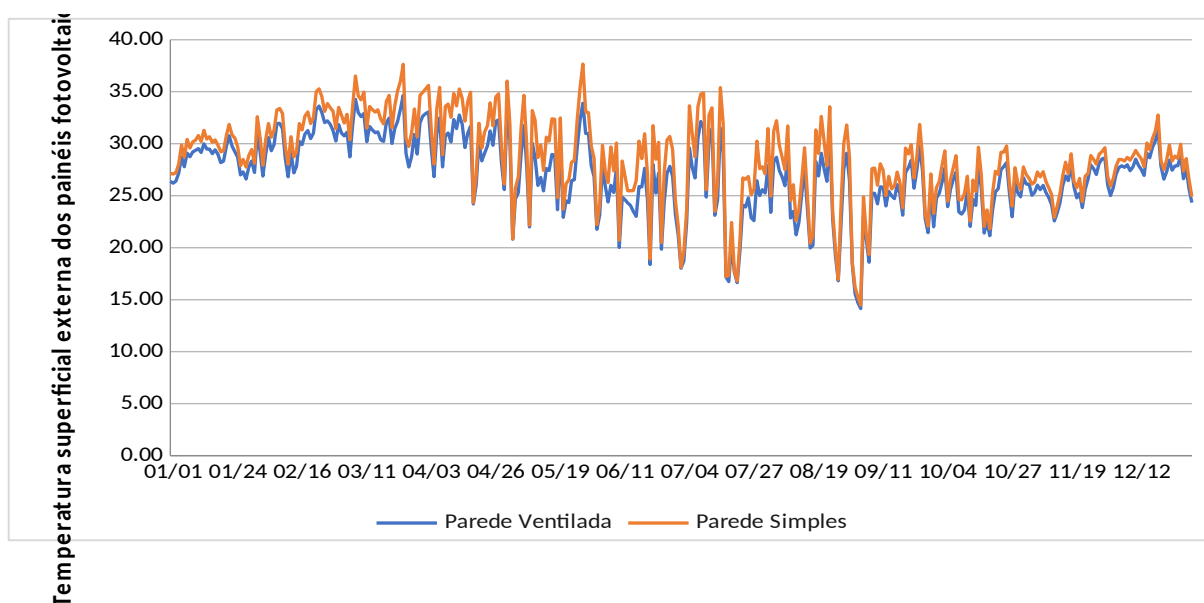
5.1 Análise da geração de energia dos sistemas fotovoltaicos

A geração de energia dos sistemas fotovoltaicos em kWh foram calculados através da simulação do *EnergyPlus*. O sistema fotovoltaico está presente nos modelos com fachada simples + PV aplicado e com fachada dupla ventilada + PV integrado.

A área de aplicação do sistema fotovoltaico nos dois modelos é a mesma, cerca de 760 m² de área de painéis fotovoltaicos. Como foi usado o modelos simples de simulação no *EnergyPlus*, os dois modelos apresentaram a mesma geração de energia na simulação: 94.766 kWh. Esse valor foi utilizado para os dois modelos em todos os resultados deste trabalho.

O Gráfico 1 mostra a diferença de temperatura na superfície externa dos painéis fotovoltaicos nos modelos com fachada simples e ventilada.

Gráfico 1 – Temperatura superficial dos painéis fotovoltaicos nas fachadas



Fonte: Autora (2021).

Observa-se pelo Gráfico 1 que as temperaturas superficiais dos painéis fotovoltaicos no modelo não ventilado são mais altas do que no modelo com parede dupla ventilada. A temperatura superficial média anual do painel não ventilado é 28,66°C, e a do painel ventilado é 27,05°C. Essa diferença de 1,61°C pode fazer

com que, na prática, o sistema fotovoltaico integrado na fachada dupla ventilada tenha um aumento da eficiência, uma vez que a câmara de ar diminui a temperatura das células.

Considerando a informação pessoal cedida por Goulart (2021), de que através de dados de medição real, os painéis fotovoltaicos na fachada ventilada do Laboratório Fotovoltaica da UFSC, geram cerca de 10% a mais de energia do que os painéis não ventilados, a geração do modelo com fachada dupla ventilada + PV ficaria em torno de 104.242 kWh. Porém nos resultados deste trabalho não foi considerada essa diferença de temperatura, sendo assim, considerou-se a mesma geração de energia nos dois casos citados.

5.2 Análise do balanço de energia dos modelos

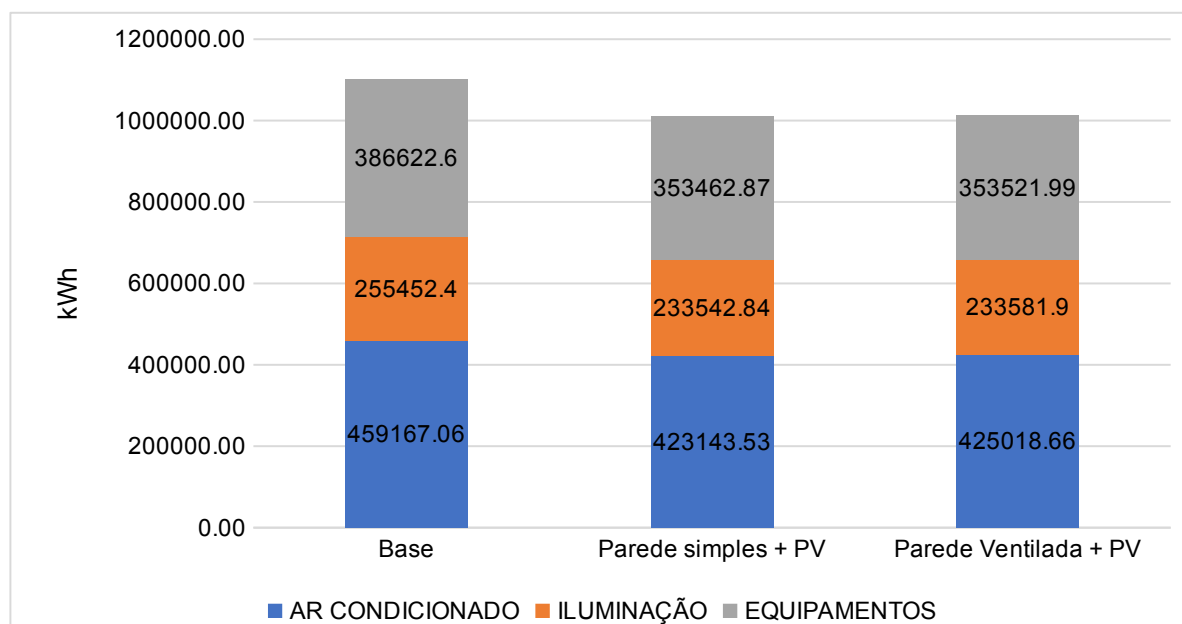
O balanço de energia em kWh de cada modelo foi calculado através da simulação do *EnergyPlus*. Esses valores são resultados do saldo energético calculado levando em consideração o consumo de energia dos três casos, e a geração de energia dos modelos com sistema fotovoltaico. O balanço foi calculado subtraindo a geração de energia pelo sistema fotovoltaico (94.766 kWh) do consumo final do modelo. Os valores do balanço estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Balanço de energia em kWh

Usos	Base	Parede Simples + PV	Parede Ventilada + PV
Consumo total	1.101.242,06	1.010.149	1.012.123
Geração de energia	0	94.766	94.766
Balanço de energia final	1.101.242	915.383	917.357

Fonte: Autora (2021).

O Gráfico 2 mostra os resultados do balanço de energia por uso final dos três modelos, em kWh.

Gráfico 2 – Balanço de energia

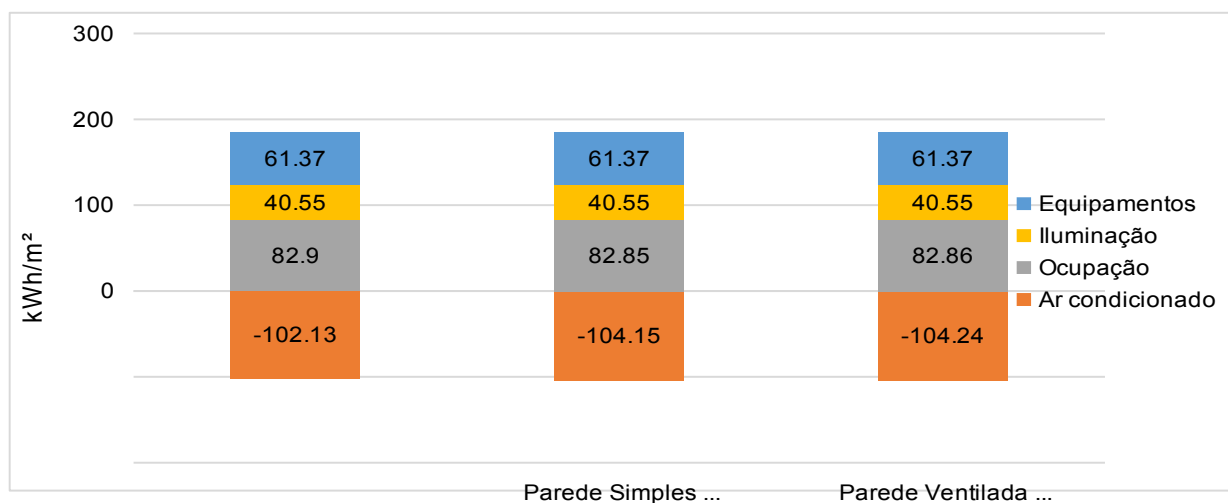
Fonte: Autora (2021).

Com o balanço de energia considerando a geração dos sistemas fotovoltaicos, o modelo que obteve o maior consumo de energia da rede foi o base, uma vez que os demais modelos possuem um percentual de auto geração de energia. O modelo com parede ventilada com PV obteve o segundo maior consumo da rede, e o modelo com menor consumo da rede foi o com parede simples e sistema fotovoltaico aplicado.

5.3 Análise da carga térmica

A partir dos ganhos e perdas de energia e da área do objeto de estudo foram calculadas as cargas térmicas equivalentes a cada uso de cada modelo. Os resultados estão apresentados no Gráfico 3 em kWh/m².

Gráfico 3 – Carga térmica



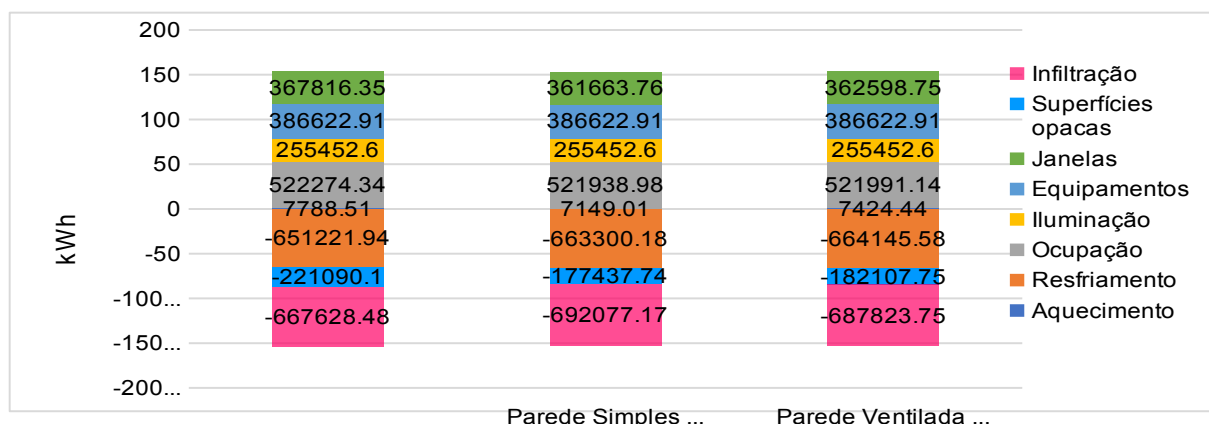
Fonte: Autora (2021).

Percebe-se que as cargas térmicas de ar condicionado nos modelos com PV são mais elevadas que o caso base. As cargas térmicas de iluminação, equipamentos e ocupação foram equivalentes para os três modelos. Os valores para os modelos com sistema fotovoltaico foram muito próximos, porém a carga térmica de ar condicionado para o modelo com parede ventilada é um pouco maior que o caso com parede simples + PV.

5.4 Análise do balanço térmico

O balanço térmico dos três casos está demonstrado através dos resultados anuais de ganhos e perdas térmicas pela simulação do *EnergyPlus*. Os resultados são apresentados no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Balanço térmico anual



Fonte: Autora (2021).

A perda de calor pelas superfícies opacas foi maior no caso base, e o caso com parede ventilada + PV obteve a menor perda pelas superfícies. Isso ocorre pois a parede ventilada aumenta o isolamento, impedindo que parte do calor seja perdido por essas superfícies.

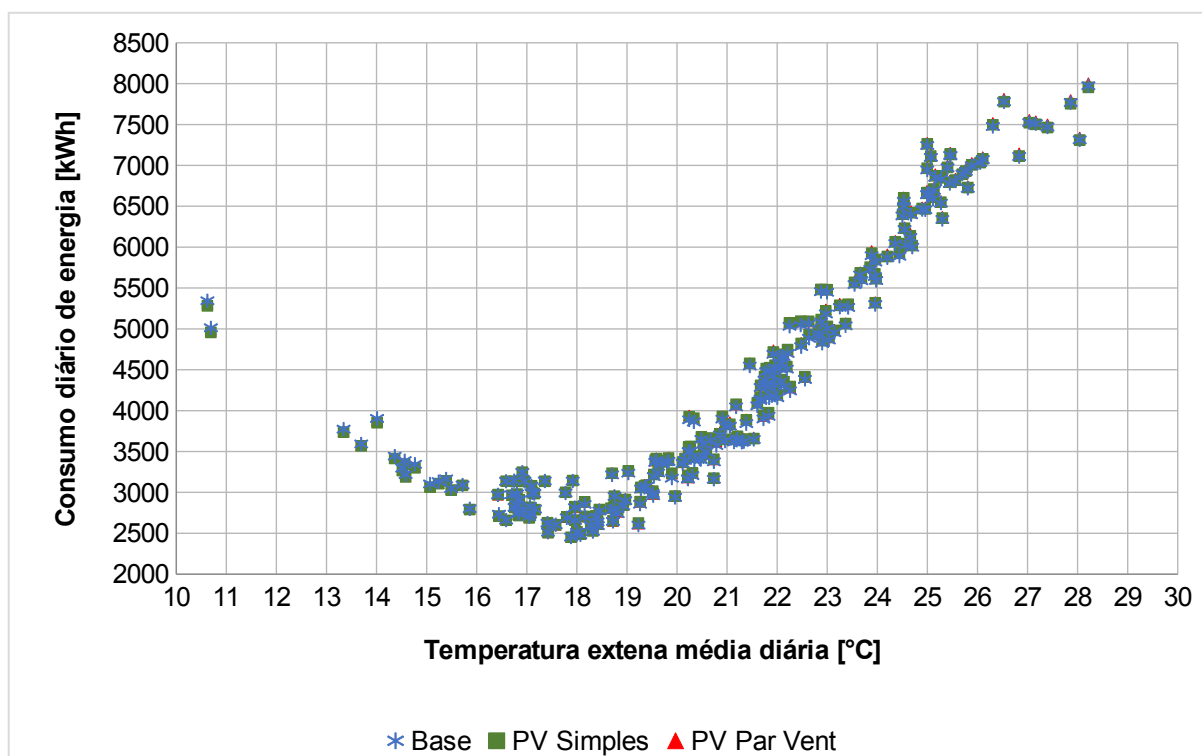
O caso com parede simples + PV também obteve menor perda de calor pelas superfícies do que o caso base, mas obteve um desempenho um pouco melhor do que a parede ventilada.

5.5 Temperatura de ponto de equilíbrio

Os valores de consumo diário de energia e temperatura externa média diária foram retirados das simulações do *EnergyPlus*. Esses dados foram usados para montar o gráfico da temperatura de ponto de equilíbrio, mostrado no Gráfico 5.

Os dados apresentados no gráfico são referentes aos dias onde há uso da edificação, ou seja, foram excluídos finais de semana e os períodos de férias.

Gráfico 5 – Temperatura de ponto de equilíbrio



Fonte: Autora (2021).

Para definir as temperaturas de ponto de equilíbrio foi gerado uma equação de regressão polinomial de ordem quatro, que melhor se ajustou aos dados. A temperatura de equilíbrio é uma raiz da derivada da equação de regressão. As Equações 3, 4 e 5 representam as equações de regressão do caso base, caso com parede simples + PV e caso com parede dupla ventilada + PV, respectivamente.

$$y = -0.5262x^4 + 38.526x^3 - 970.32x^2 + 9836.8x - 29358 \quad (3)$$

$$y = -0.5166x^4 + 37.709x^3 - 945.88x^2 + 9539.8x - 28158 \quad (4)$$

$$y = -0.5167x^4 + 37.723x^3 - 946.05x^2 + 9532.5x - 28042 \quad (5)$$

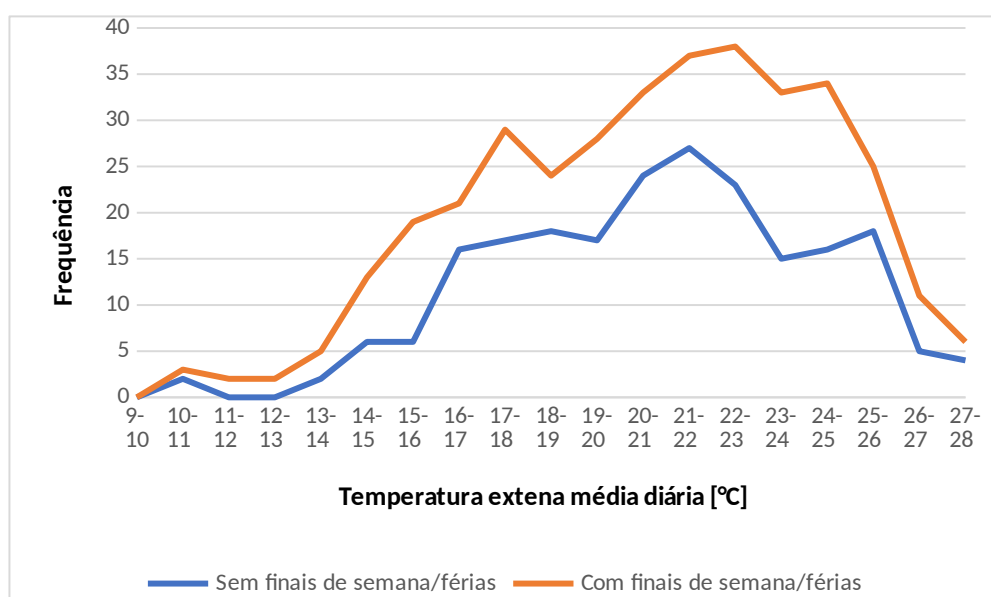
As temperaturas de ponto de equilíbrio calculadas para os casos são: 17,55°C para o caso base; 17,47°C para o caso com painéis fotovoltaicos na fachada simples; e 17,49°C para o caso com parede dupla ventilada com painéis fotovoltaicos integrados.

Essas temperaturas de ponto de equilíbrio são as temperaturas externas nas quais não é necessário o uso de aparelhos para resfriamento ou aquecimento

do ambiente interno. Ou seja, numa temperatura externa média diária, em torno de 17,5°C, a temperatura de equilíbrio calculada, e para os critérios adotados de simulação, possivelmente não haverá consumo de energia para resfriamento ou aquecimento do ambiente.

Observa-se que, aproximando algumas partes do gráfico, o modelo com parede dupla ventilada + PV tem um aumento em torno de 31 kWh no consumo para as temperaturas mais altas, porém em temperaturas mais baixas, o fato de adicionar os painéis fotovoltaicos reduz-se o consumo de energia. Por isso foi feito um gráfico de frequência de ocorrência das temperaturas médias diárias a cada 1°C, apresentado no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Distribuição frequência ocorrência das temperaturas médias externas

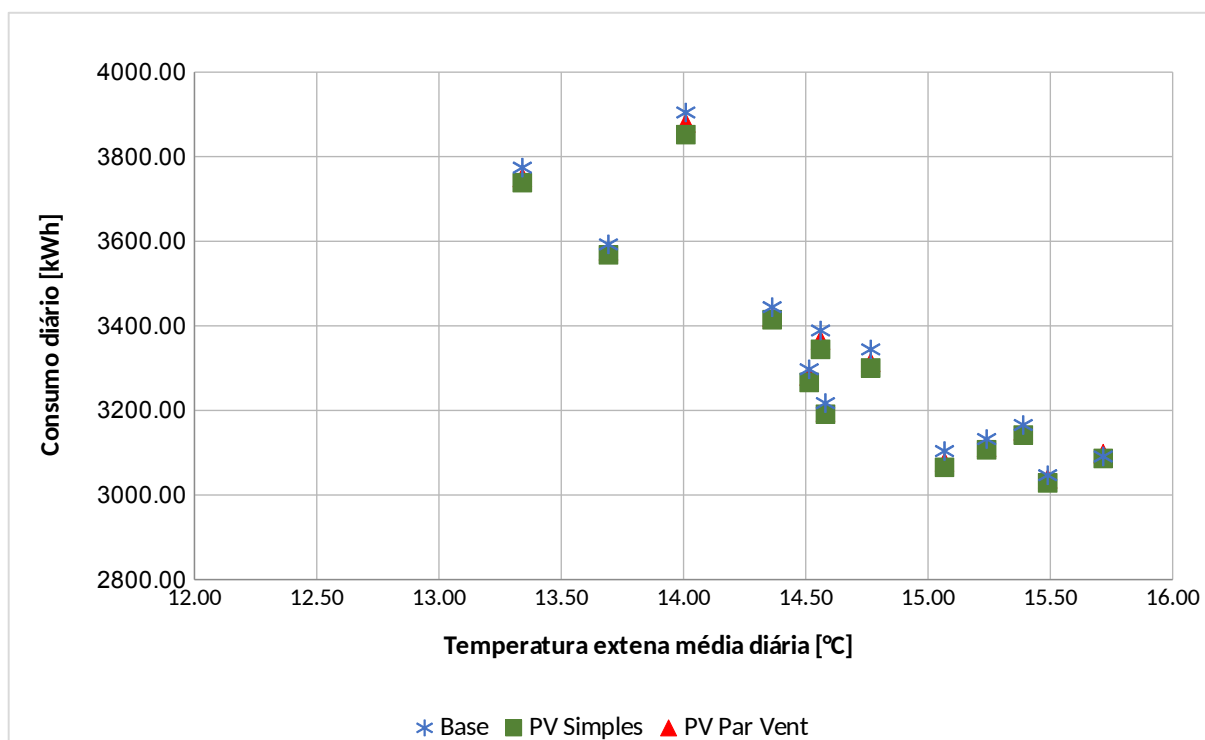


Fonte: Autora (2021).

A maior parte das temperaturas médias diárias calculadas são mais altas, acima de 20°C. O que explica o desempenho não tão superior do caso com parede dupla ventilada em relação ao caso base, visto que nas temperaturas mais elevadas, o caso com BIPV apresenta um consumo energético superior.

A seguir serão apresentados algumas ampliações do gráfico de temperatura de ponto de equilíbrio para determinadas temperaturas, para que possa ser feita uma análise mais precisa do resultado. O Gráfico 7 apresenta os resultados para temperaturas externas no intervalo de 12°C a 16°C.

Gráfico 7 – Temperatura de ponto de equilíbrio – 12°C a 16°C

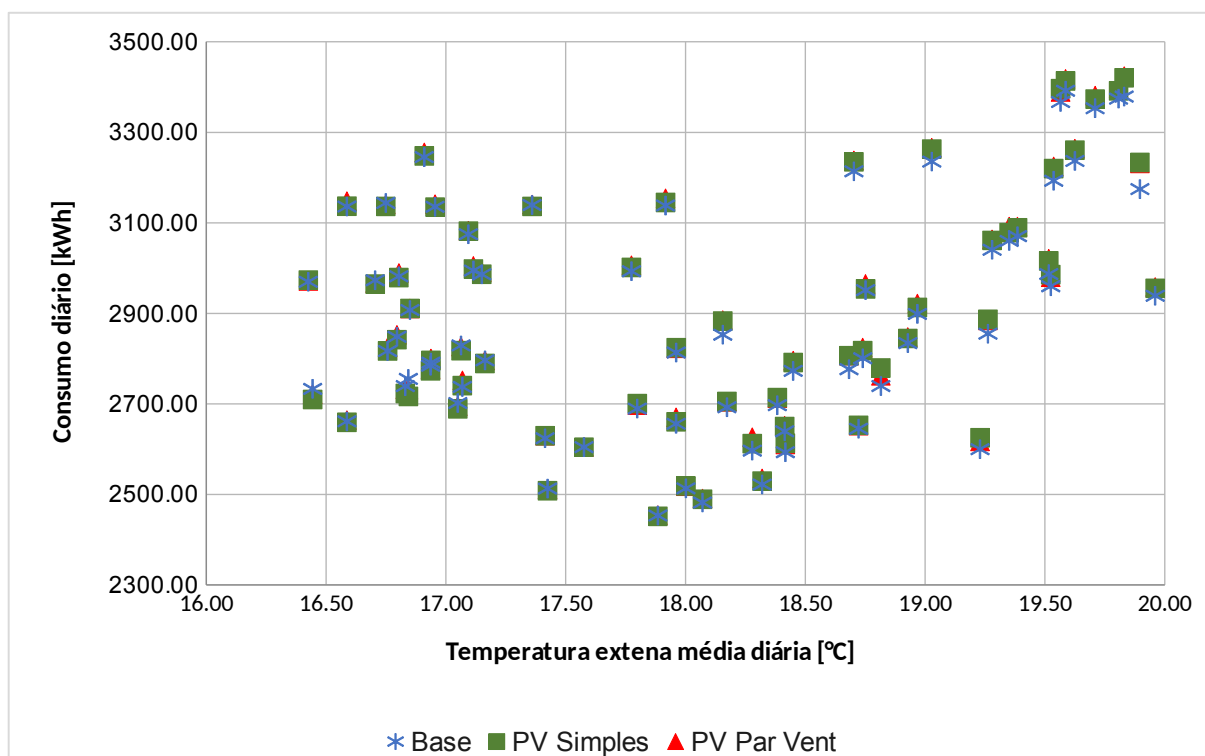


Fonte: Autora (2021).

Na faixa de temperaturas externas mais baixas, entre 12°C e 15,5°C, apresentada no Gráfico 7, os modelos com fachadas com sistema fotovoltaico apresentaram o consumo um pouco mais baixo, em torno de 24 kWh, quando comparadas ao modelo base.

Já entre as temperaturas 17°C e 18°C, o aumento da absorção solar e diminuição da transmitância térmica pelo painel fotovoltaico praticamente não alteram o consumo em relação ao caso base, como mostra o Gráfico 8.

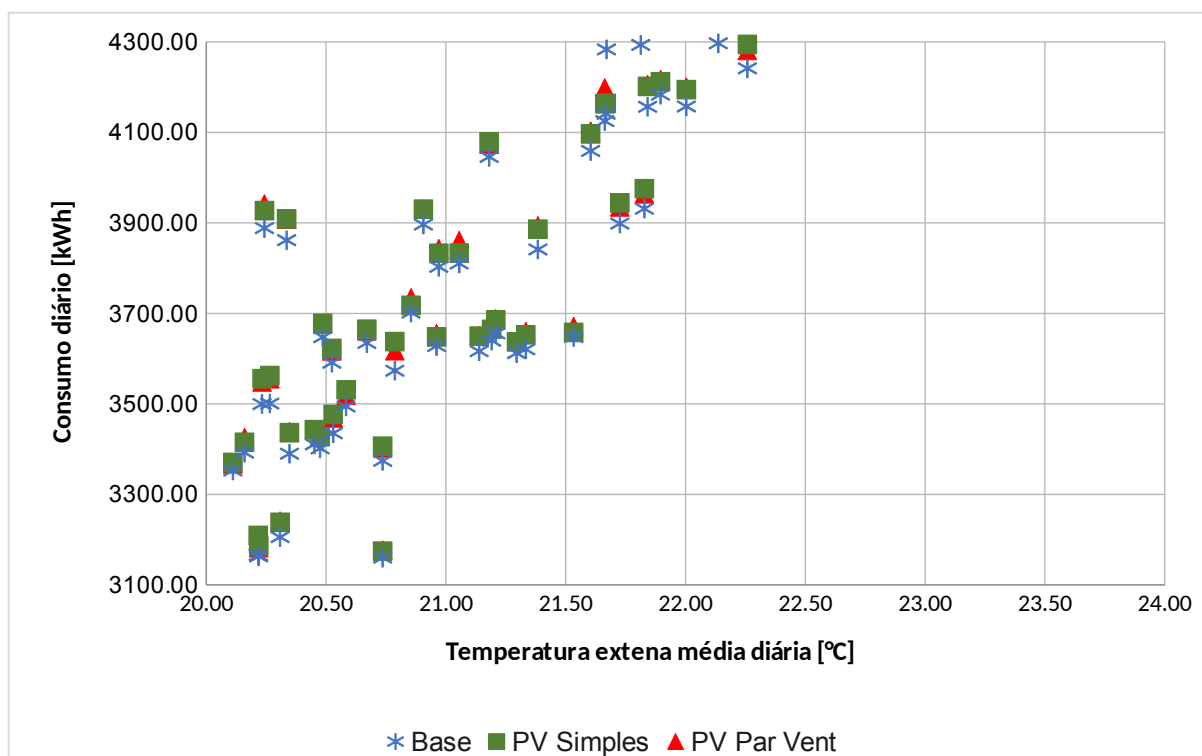
Gráfico 8 – Temperatura de ponto de equilíbrio –16°C a 20°C



Fonte: Autora (2021).

Porém, a partir da temperatura externa de 18°C os casos com sistema fotovoltaico na fachada passam a consumir mais do que o caso base. Entre 20°C e 24°C o consumo dos dois modelos com PV são quase iguais, porém superiores ao caso base, como mostra o Gráfico 9.

Gráfico 9 – Temperatura de ponto de equilíbrio –20°C a 24°C



Fonte: Autora (2021).

No intervalo de 24°C e 28°C o modelo com parede dupla ventilada e sistema fotovoltaico é o que apresenta o maior consumo, e em alguns casos a parede simples + PV e o caso base possuem um consumo muito parecido. A parede ventilada está atuando como um isolante térmico, e evita a perda do calor interno para o ambiente externo. Nos dias com temperaturas externas mais elevadas, a parede dupla ventilada aumenta a necessidade do uso de ar condicionado.

Outra questão que pode ocasionar o aumento no consumo de energia dos casos com PV é a absorvância elevada dos painéis fotovoltaicos (0,92) instalados na fachada norte. Uma possibilidade seria adotar painéis fotovoltaicos coloridos, que tivessem uma absorvância solar mais baixa.

6 CONCLUSÃO

A busca por construções sustentáveis vem crescendo cada vez mais, independentemente do tipo de uso da edificação. Uma das primeiras ações de um projeto sustentável, é a utilização da estratégia passiva de adoção de um sistema construtivo da envoltória adequado ao clima local, que mantenha um bom desempenho termo energético da edificação, diminuindo o uso de sistemas ativos de condicionamento de ar, por exemplo.

Estudos feitos nas etapas iniciais de projeto de diferentes estratégias passivas, ativas e proativas, visando um bom desempenho termo energético da edificação, podem ser feitos com gastos mínimos. A simulação computacional é uma ferramenta que ajuda a prever e avaliar o comportamento da edificação, podendo comparar tipos de sistemas, por exemplo.

Neste trabalho foram realizadas simulações computacionais referentes a estudos iniciais de uma edificação de uso educacional, comparando três casos de sistemas de vedação diferentes: um caso base, com parede simples e características para obtenção de ENCE Nível “A”; um caso com parede simples e painéis fotovoltaicos aplicados sobre a fachada norte; e o último com parede dupla ventilada na fachada norte, sendo o revestimento externo de painéis fotovoltaicos.

Foram avaliados balanço de energia, carga térmica, geração de energia do sistema fotovoltaico, temperatura de ponto de equilíbrio e balanço energético.

Os sistemas fotovoltaicos dos dois casos avaliados foram o mesmo, aplicado na mesma área, sendo assim a geração de energia dos dois casos foi a mesma, resultando em 94.766 kWh. Porém há diferença na temperatura superficial dos painéis nos dois casos, os painéis do modelo ventilado têm temperatura superficial em média 1,6°C mais baixa que os painéis no modelo com fachada simples. Essa diferença pode resultar em uma maior eficiência dos painéis com menor temperatura, entretanto essa ventilação no painel não foi considerada nesse trabalho.

O modelo base obteve o menor consumo total de energia, porém, é o modelo que mais consome energia da rede pública. Os dois modelos com painéis

fotovoltaicos na fachada obtiveram um aumento no consumo de energia, porém como um percentual dessa energia vem da auto geração, esses modelos acabam por consumir menos energia da rede.

Através dos gráficos de temperatura de ponto de equilíbrio foi possível verificar que para temperaturas externas mais baixas (até 18°C) o consumo de energia dos modelos com sistema fotovoltaico foi mais baixo quando comparado com o caso base. Porém a partir dos 18°C, os casos com PV passam a consumir mais energia que o caso base. Percebe-se portanto que a parede ventilada pode estar atuando como um isolante ao ponto de aumentar a necessidade do uso de ar condicionado, o que faz com o que o consumo aumente em dias com temperatura externa mais elevada.

Outra questão que pode ocasionar o aumento no consumo de energia dos casos com PV é a absorvância elevada dos painéis (0,92) instalados na fachada norte, sendo que no caso base as paredes tem valor de absorvância solar de 0,3.

Observa-se, portanto, que a adoção de painéis fotovoltaicos na fachada, tanto aplicada na parede simples, quanto integrada na parede dupla ventilada, piorou o desempenho da vedação vertical, havendo a necessidade de maior consumo de ar condicionado para resfriamento.

Porém, mesmo que o modelo com parede dupla ventilada tenha apresentado pior desempenho, com a consideração da geração de energia esse modelo consome menos energia da rede que o caso base.

6.1 Limitações do trabalho e sugestões para trabalho futuros

Por se tratar de um projeto preliminar, diversas informações ainda não estão definidas nesse momento. Este trabalho abordou diferentes estratégias visando a melhoria do desempenho termo energético, por isso diversos outros estudos podem derivar deste trabalho.

Uma das limitações foi a não definição do tipo de painel fotovoltaico a ser usado, o que impediu a análise da diferença de desempenho dos painéis ventilados

e não ventilados. Para próximos trabalhos pode-se testar diferentes tipos de sistemas, e comparar seus desempenhos com ventilação na parte posterior dos painéis. Além disso ainda há a possibilidade de adicionar painéis também na cobertura e na fachada leste, para aumentar ainda mais a geração de energia.

Neste trabalho foi estudado apenas um tipo de uso de sistema fotovoltaico integrado, nas fachadas. Para trabalhos futuros pode-se testar outras formas de integração como em brises e outros elementos de sombreamento, e até mesmo painéis fotovoltaicos com cores de mais baixa absorvância solar, que também não foram considerados nas simulações deste presente trabalho.

Apenas um tipo de material de pele interna da parede dupla foi simulado, ou seja, apenas um valor de resistência térmica. Porém se a superfície interna for em um material de baixa emissividade numa câmara de ar de uma parede dupla, o valor de resistência térmica aumenta para a mesma espessura. Para próximos trabalhos pode-se simular diferentes tipos de vedação interna e diferentes configurações de câmara de ar.

Por fim, neste trabalho não foi levado em consideração os custos de nenhuma das estratégias estudadas. Portanto sugere-se para trabalhos futuros que seja levantado os custos das estratégias, para que seja possível definir se o sistema considerado neste trabalho tem um bom custo benefício em comparação com um caso base, e avaliando o tempo de retorno do investimento da colocação de painéis fotovoltaicos na fachada e na cobertura do novo bloco educacional do DACC.

REFERÊNCIAS

ABREU, Ana Lúcia Papst de et al. Metodologia De Avaliação Da Energia Solar Antes Dos primeiros esboços. Porto Alegre: **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 2016. v. 16.

AGATHOKLEOUS, Rafaela. A.; KALOGIROU, Soteris A. Double skin facades (DSF) and building integrated photovoltaic (BIPV): A review of configurations and heat transfer characteristics. **Renewable Energy**, 2016. v. 89, p. 743–756.

AGOPYAN, Vahan; JOHN, Vanderley Moacyr. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. São Paulo: Blucher, 2011.

ASBEA - Grupo de Trabalho Sustentabilidade. (2012). Guia sustentabilidade na Arquitetura: diretrizes de escopo para projetistas e contratantes. São Paulo: Prata Design.

ASHRAE (FIRM). **Standard 90.1 user's manual: ANSI/ASHRAE/IES standard 90.1-2016: energy standard for buildings except low-rise residential buildings: I-P and SI**. [S.l.: s.n.], 2016.

ASHRAE Standard 90.1: Energy Standard for Buildings except Low-rise Residential Building. 2016.

ASHRAE. **Advanced Energy Design Guide for Small to Medium Office Buildings 50%**. [S.l.: s.n.], 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220: Desempenho térmico em edificações**. Rio de Janeiro, 2003.

BARBOSA, Sabrina. Thermal performance of naturally ventilated office buildings with double skin façade under Brazilian climate conditions. 2015. n. November, p. 182.

BARBOSA, Sabrina; IP, Kenneth. Predicted thermal acceptance in naturally ventilated office buildings with double skin façades under Brazilian climates. **Journal of Building Engineering**, 2016. v. 7, p. 92–102.

BIGLADDER. Euclid. 2020. Disponível em: <<https://bigladdersoftware.com/projects/euclid/>>. Acesso em: 10 ago. 2021.

BLAZIUS, Carina Maccari; ABREU, Ana Lúcia Papst de; BETIOLI, Andrea Murillo. Sistema de Vedação Vertical em Fachada Ventilada Opaca: estudo de caso sobre empreendimentos brasileiros. **Revista Vértices**, 2020. v. 22, n. 3, p. 610–625.

BLOEM, J. J. et al. An outdoor Test Reference Environment for double skin applications of Building Integrated Photovoltaic Systems. **Energy & Buildings**, 2012. v. 50, p. 63–73.

BRASIL. Ministério Do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional De Metrologia, Qualidade E Tecnologia-INMETRO. **Anexo V da Portaria nº50, de 01 de fevereiro de 2013**. Brasília, 2013.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Secretaria de Logística e Tecnologia da Informação. **Instrução Normativa no 02, de 04 de junho de 2014**. Dispõe sobre regras para a aquisição ou locação de máquinas e aparelhos consumidores de energia pela Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional, e uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) nos projetos e respectivas edificações públicas federais novas ou que recebam retrofit.

BUI, D. et al. Enhancing building energy efficiency by adaptive façade: A computational optimization approach Adaptive façade design. 2020. v. 265, n. March.

BURGER, B.; RÜTHER, R. Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature. **Solar Energy**, 2006. v. 80, p. 32–45.

CB3E. Novo método para a classificação da eficiência energética com base em energia primária de edificações comerciais, de serviços e públicas. 2020.

CHATZIPANAGI, A., FRONTINI, F., VIRTUANI, A. "BIPV-temp: A demonstrative Building Integrated Photovoltaic installation", **Applied Energy**, v. 173, n. December 2018, p. 1–12, 2016. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.03.097. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.097>.

CHENG, V.; NG, E.; GIVONI, B. Effect of envelope color and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate. **Solar Energy**, 2004. v. 78, p. 528–534.

CHIVELET, N. M.; SOLLA, I. F. **Técnicas de Vedação Fotovoltaica na Arquitetura**. Porto Alegre: Bookman, 2010.

CRONEMBERGER, J.; CAAMAÑO-MARTÍN, E.; SÁNCHEZ, S. V. Assessing the solar irradiation potential for solar photovoltaic applications in buildings at low latitudes – Making the case for Brazil. **Energy and Buildings**, 2012. v. 55, p. 264–272.

D'AGOSTINO, D.; MAZZARELLA, L. What is a nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions. **Journal of Building Engineering**, 2019. v. 21, n. May 2018, p. 200–212.

D'ANTONIO, P. Zeroing In on Net-Zero Buildings. 2020. Disponível em: <<https://www.hpac.com/industry-perspectives/article/21145387/zeroing-in-on-netzero-buildings>>. Acesso em: 17 ago. 2021.

DEBBARMA, Mary; SUDHAKAR, K.; BAREDAR, Prashant. Comparison of BIPV and BIPVT: a review. **Resource-Efficient Technologies**, [S.L.], v. 3, n. 3, p. 263-271, set. 2017. National Research Tomsk Polytechnic University. <http://dx.doi.org/10.1016/j.reffit.2016.11.013>.

DOE. US Department of Energy: A Common Definition for Zero Energy Buildings. 2015. n. September, p. 22.

EDIFICA, P. Sobre o PBE Edifica. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/sobre>>. Acesso em: 10 ago. 2021.

ENEEL. Sistema de Informações de Geração. 2021.

ENERGY PLUS. **Getting Started with EnergyPlus Basic Concepts Manual - Essential Information You Need about Running**. 2020.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus Engineering Reference**. U.S. Department of Energy. 2020.

ENERGYPLUS: Exemple Files. **GeneratorswithPV**. Versão 9.4.0. [S. l.]: EnergyPlus, 2020. Disponível em: <https://energyplus.net/downloads>. Acesso em: 3 ago. 2021.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional. Relatório Síntese / ano base 2020. Rio de Janeiro: 2021. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>. Acesso em 17 ago. 2021.

EYRAS, I. et al. Integración arquitectónica de sistemas de energía solar en nueva fábrica de paneles solares isofotón. Málaga, España. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, 2006. v. 10, p. 29–35.

FALLAHI, A.; HAGHIGHAT, F.; ELSADI, H. Energy performance assessment of double-skin façade with thermal mass. **Energy and Buildings**, 2010. v. 42, p. 1499–1509. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.020>>.

GAVIRIA, L. R.; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay; MIZGIER, M. O. Influência da configuração urbana na geração fotovoltaica com sistemas integrados às fachadas. **Ambiente Construído**, 2013. v. 13, n. 4, p. 07–23.

GONÇALVES, H.; CABRITO, P. **Edifício SOLAR XXI: Um edifício energeticamente eficiente em Portugal**. Lisboa: LNEG-Laboratório Nacional de Energia e Geologia, 2005.

GOULART, Solange. **Relatório do meu trabalho**. Destinatário: Ana Lúcia Papst de Abreu. [S.l.], 16 jun. 2021. 1 e-mail.

GRAÇA, J. M. O **Edifício Solar XXI um exemplo de sustentabilidade na construção**.

GRACIA, A. De et al. Numerical modelling of ventilated facades: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2013. v. 22, p. 539–549.

HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. Introduction to building performance simulation. **Building performance simulation for design and operation**. New York: Spon Press, 2011, p. 1–15.

INMETRO. **RTQ-R: Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais**.

KRESE, G. et al. Determination of a Building's balance point temperature as an energy characteristic. **Energy**, 2018. v. 165, p. 1034–1049.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O.R. **Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro: 2014.

LIMA, L. et al. Sustainability in the construction industry: A systematic review of the literature. **Journal of Cleaner Production**, 2021. v. 289, p. 125730.

MEDEIROS, Jonas Silvestre; SABBATINI, Fernando Henrique. **Tecnologia e Projeto de Revestimentos Cerâmicos de Fachadas de Edifícios**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1999.

MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto. O Método do Balanço Térmico Através de Simulação Computacional no Programa EnergyPlus. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2008.

MENDES, N. et al. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. Porto Alegre: **Ambiente Construído**, 2005. v. 5, n. 4, p. 47–68.

MUN, S. H. et al. Limitations of EnergyPlus in analyzing energy performance of semi-transparent photovoltaic modules. **Case Studies in Thermal Engineering**, 2020. v. 22, p. 100765. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100765>>.

NASCIMENTO, L. R. Do; RUTHER, R. A avaliação de longo prazo de um sistema fotovoltaico integrado à edificação urbana e conectado à rede elétrica pública. **Revista Brasileira de Energia Solar**, 2014. v. V, p. 73–81.

NAVARRO, Lucas Aryel; VALADÃO, Júlia Barros. Tipos de arquivos climáticos existentes e suas especificidades. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA, 2017, Ponta Grossa. **Artigo**. Ponta Grossa: 2017.

NETTO, H. W. **Simulação Computacional do Desempenho Térmico de Uma Edificação com uso de fachada ventilada**. Curitiba: [s.n.], 2018.

OMORI, M. Y. **Estudo de Edificação Utilizando Container para Fins Comerciais: Cálculos para Controle da Temperatura Interna**. Campo Mourão: [s.n.], 2018.

PALMER, C. M.; GENTRY, T. A better distinction for standard specifications of low-e coatings for diverse climate conditions. **PLEA. Anais... North Carolina at Charlotte USA**, 2012.

PBE EDIFICA. **Nova Instrução Normativa Inmetro**. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/nova-ini>. Acesso em: 05 out. 2021.

PECI-LÓPEZ, F.; ADANA, M. R. De. Sensitivity study of an opaque ventilated façade in the winter season in different climate zones in Spain. **Renewable Energy**, 2015. v. 75, p. 524–533.

PEDRINI, ALDOMARSZOKOLAY, S. Recomendações para o desenvolvimento de uma ferramenta de suporte às primeiras decisões projetuais visando ao desempenho energético de edificações de escritório em clima quente. **Ambiente Construído**, 2004.

PENG, C.; HUANG, Y.; WU, Z. Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China. **Energy and Buildings**, 2011. v. 43, n. 12, p. 3592–3598.

PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos; ABREU, Samuel Luna de; RÜTHER, Ricardo. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. 60 p.

PETTER, B.; BREIVIK, C.; DROLSUM, H. Building integrated photovoltaic products : A state-of-the-art review and future research opportunities. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 2012. v. 100, p. 69–96.

POIRAZIS, H. Double-skin façades - A literature review. **IEA SHC Task 34**, 2007. v. 49, n. 10, p. 70–73.

PROCEL. PROCEL EDIFICA - Eficiência Energética nas Edificações. 2006. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS623FE2A5ITEMIDC46E0FFDBD124A0197D2587926254722LUMISADMIN1PTBRIE.htm>. Acesso em: 10 ago. 2021.

QUEVEDO, Tiago de Castro. **Simulações paramétricas para determinação de diretrizes construtivas para desempenho energético de um prédio educacional**. 2019. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

RODRIGUES, C. et al. Os Sistemas Fotovoltaicos no Edifício Solar XXI – Resultados. 2006.

RODRIGUEZ-UBINAS, E. et al. Evaluating the performance of PV modules in buildings (BIPV/BAPV) and the soiling effect in the UAE desert setting. **International Journal of Energy Production and Management**, 2020. v. 5, n. 4, p. 293–301.

ROMÉRO, M. D. A.; REIS, L. B. DOS. **Eficiência energética em edifícios**. Barueri: Manole, 2012.

SANTOS, I. P. Dos. **Desenvolvimento De Ferramenta De Apoio À Decisão Em Projetos De Integração Solar Fotovoltaica À Arquitetura**. Florianópolis: [s.n.], 2013.

SHELLER, C. et al. **Análise de Arquivos Climáticos para a Simulação do Desempenho Energético de Edificações**. [S.l.]: [s.n.], 2015.

SCHNEIDER, K.; SORGATO, M. J.; RÜTHER, R. Viabilidade Técnica e Econômica da Aplicação de Módulos Fotovoltaicos (FV) De Telureto de Cádmio (Cdte) Em. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, 17 a 20 de abril de 2018**, 2018.

SHIRINBAKHSH, M.; HARVEY, L. D. D. Net-zero energy buildings: The influence of definition on greenhouse gas emissions. **Energy and Buildings**, 2021. v. 247. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111118>>.

SOLAR INNOVA. **Catálogo Módulos FV BIPV**. [s.d.]. Disponível em: <<chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A%2F%2Fwww.solcentral.com.br%2Fwp-content%2Fuploads%2F2017%2F01%2Fsi-esf-m-bipv-gg-catalogo-pt.pdf&clen=4306460&chunk=true>>. Acesso em: 25 ago. 2021.

SOLARCENTURY. CIS Tower Solar Skyscraper Retrofit (Manchester, UK). 2009. Disponível em: <[http://www.solaripedia.com/13/117/cis_tower_solar_skyscraper_retrofit_\(manchester,_uk\).html](http://www.solaripedia.com/13/117/cis_tower_solar_skyscraper_retrofit_(manchester,_uk).html)>. Acesso em: 9 jul. 2021.

SUN, X.; GOU, Z.; LAU, S. S. Cost-effectiveness of active and passive design strategies for existing building retro fits in tropical climate: Case study of a zero energy building. **Journal of Cleaner Production**, 2018. v. 183, p. 35–45.

TOUR virtual - Solar Energy Research Laboratory - Fotovoltaica/UFSC. Florianópolis: Fotovoltaica Ufsc, 2020. P&B. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=6g1IFiFA-sE&t=139s>. Acesso em: 09 ago. 2021.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Renewables 2020 Global Status Report. Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector**. [S.l.]: [s.n.], 2020.

URBANETZ, J.; ZOMER, C. D.; RÜTHER, Ricardo. Compromises between form and function in grid-connected, building-integrated photovoltaics (BIPV) at low-latitude sites. **Building and Environment**, 2011. v. 46, p. 2107–2113. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.024>>.

UTZINGER, M.; WASLEY, J. H. **Building Balance Point**. [S.l.]: [s.n.], 1997. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20120612033218/http://arch.ced.berkeley.edu/vitalsigns/res/downloads/rp/balance_point/balance_point_big.pdf>.

WANG, J. C. A study on the energy performance of school buildings in Taiwan. **Energy and Buildings**, 2016. v. 133, p. 810–822. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.036>>.

WELLS, L., RISMANCHI, B., AYE, L. "A review of Net Zero Energy Buildings with reflections on the Australian context", **Energy and Buildings**, v. 158, p. 616–628, 2018. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.10.055. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.055>.

ZOMER, C.; CUSTÓDIO, I.; GOULART, S.; MANTELLI, S.; MARTINS, G.; CAMPOS, R.; PINTO, G.; RÜTHER, R. Energy balance and performance assessment of PV systems installed at a positive-energy building (PEB) solar energy research centre. **Solar Energy**, 2020. v. 212, p. 258–274.