

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS

HENRIQUE WOLLZ NETTO

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA
EDIFICAÇÃO COM USO DE FACHADA VENTILADA.**

MONOGRAFIA

CURITIBA

2018

HENRIQUE WOLLZ NETTO

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA
EDIFICAÇÃO COM USO DE FACHADA VENTILADA.**

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Construções Sustentáveis, do Curso de Pós-graduação Lato Sensu da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Profa. Dra. Líbia Patrícia Peralta Agudelo

CURITIBA

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba, Sede Ecoville
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Curso de Especialização em Construções Sustentáveis



TERMO DE APROVAÇÃO

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA
EDIFICAÇÃO COM USO DE FACHADA VENTILADA.**

Por

HENRIQUE WOLLZ NETTO

Esta monografia foi apresentada em 29 / 06 / 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Construções Sustentáveis. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profa. PhD. Libia Patricia Peralta Agudelo
Orientadora

Prof. M.Sc. Cristian Eduardo Burg León
Membro Titular

Prof. PhD. Eloy Fassi Casagrande Jr
Membro Titular

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso

RESUMO

WOLLZ, Henrique Netto. Compartilhamento da informação e do conhecimento em bibliotecas especializadas. 2018. 58 f. Monografia (Especialização em Construções Sustentáveis) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

Em face os acontecimentos climáticos que vemos agravados nas últimas décadas e considerando a grande quantia de energia consumida pelas edificações no Brasil para manter o interior das residências em um nível adequado de conforto para os seus habitantes, a envoltória da edificação é o elemento capaz de melhorar esse quadro. Dentre as soluções técnicas para a execução da envoltória no mercado, o sistema de fachada ventilada mostra-se como uma opção viável para o contexto brasileiro. As fachadas ventiladas caracterizam-se por sua estrutura que dispõe de um elemento externo destacado alguns centímetros da envoltória, o espaço entre as duas camadas é livre para a movimentação do ar, essa estrutura cria condições específicas de trocas de calor entre o ambiente externo e interno. Para o cálculo dessa condição de câmara de ar ventilada, a bibliografia técnica e as normas vigentes apresentam formas simplificadas para sua determinação, deste modo, para a quantificação do balanço térmico e resultados confiáveis, a simulação térmica é a maneira mais adequada para obter resultados contundentes. Esta monografia tomou como base para análise uma edificação multifamiliar de quatro pavimentos a ser construída na cidade de Curitiba, Paraná. O estudo desenvolveu uma metodologia para as simulações energéticas que possibilitou criar uma massa de dados possíveis de serem comparados. Foram feitos dois modelos teóricos que diferenciam em si apenas pela envoltória, para um modelo foi especificada uma fachada de alvenaria de tijolo cerâmico de seis furos e para o outro, além da fachada de alvenaria, foi especificado o sistema de fachada ventilada para todas as paredes externas. Foram rodadas simulações para outras duas cidades com climas extremos quando comparada com a cidade de Curitiba. Em todas as simulações o sistema de fachada ventilada mostrou-se eficaz para o controle da temperatura interna das residências. Quando simulado apenas com ventilação natural nos ambientes a temperatura tendeu para valores mais amenos e quando simulado com ventilação natural e condicionamento de ar apresentou redução de até 33% no consumo de energia elétrica.

Palavras-chave: Eficiência energética. Simulação energética. Fachada ventilada. Edificação residencial.

ABSTRACT

WOLLZ, Henrique Netto. Information and knowledge sharing in special libraries. 2018. 58 f. Monografia (Especialização em Construções Sustentáveis) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

In view of the climatic events that we have aggravated in the last decades and considering the large amount of energy consumed by the buildings in Brazil to maintain the interior of the residences in an adequate level of comfort for its inhabitants, the enveloping of the building is the element capable of improving this frame. Among the technical solutions for the execution of the envelope in the market, the ventilated façade system is a viable option for the Brazilian context. The ventilated façades are characterized by their structure that has an external element detached a few centimeters from the envelope. The space between the two layers is free for air movement, this structure creates specific conditions of heat exchanges between the external and internal environment. For the calculation of this condition of ventilated air chamber, the technical literature and current regulations present simplified forms for their determination, so, for the quantification of the thermal balance and reliable results the thermal simulation is the most adequate way to obtain strong results. This paper was based on a multifamily four-story building to be built in the city of Curitiba, PR. The study sought a systematization for the energy simulations that made it possible to create a mass of data that could be compared. Two theoretical models have been developed that differentiate in themselves only by the envelope, for a model was specified a masonry facade of six-hole ceramic brick and for the other, besides the facade of masonry, was specified the ventilated facade system for all the walls outside. Simulations were run for two other cities with extreme climates when compared to the city of Curitiba. In all simulations the ventilated façade system proved to be effective for the control of the internal temperature of the dwellings, when simulated only with natural ventilation in the environments the temperature tended to be milder and when simulated with natural ventilation and air conditioning presented a reduction of up to 33% in electricity consumption.

Keywords: Energy efficiency. Energy simulation. Ventilated facade. Residential building.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de fachada ventilada com isolante térmico.	20
Figura 2: Sistema de fachada ventilada sem isolante térmico.	20
Figura 3: Definição da câmara de ar	21
Figura 4: Quadro das resistências superficiais.	21
Figura 5: Quadro de resistência do ar em câmaras de ar não ventilado	22
Figura 6: Condição de ventilação da câmara de ar a partir da fração de abertura.	22
Figura 7: Variação da resistência térmica em função da espessura e emissividade da câmara de ar. ...	23
Figura 8: Valores da resistência térmica superficial interna e externa.	24
Figura 9: Proteção solar de paredes opacas.	25
Figura 10: Croquis explicativos da distribuição das pressões em uma caixa cúbica.	26
Figura 11: Composição dos elementos contidos na condição de cavidade ventilada.	27
Figura 12: Esquema do balanço térmico do elemento externo da fachada ventilada (Defletor).	28
Figura 13: Esquema do balanço térmico da cavidade ventilada.	29
Figura 14: Metodologia de trabalho - 1ª parte.	34
Figura 15: Metodologia de trabalho - 2ª parte.	35
Figura 16: Localização do terreno do edifício em estudo.	36
Figura 17: Softwares utilizados na criação do modelo teórico.	36
Figura 18: Perspectiva da edificação em estudo.	37
Figura 19: Modelo geométrico para simulação.	38
Figura 20: Implantação da edificação.	39
Figura 21: Composição das camadas do modelo de referência e do modelo teórico.	40
Figura 22: Campo onde se define um algoritmo para o funcionamento alternado do ar-cond. e ventilação natural.	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Fatores que influenciam no clima.	14
Quadro 2: Características dos sistemas de fachada ventilada.	19
Quadro 3: Dados de entrada dos materiais.	39
Quadro 4: Composição da fachada convencional.	40
Quadro 5: Composição da fachada ventilada.	40
Quadro 6: Dados de entrada para a condição de fachada ventilada.	41
Quadro 7: Locais onde foi rodado simulações.	43
Quadro 8: Média de temperatura por Zona Bioclimática.	44

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Consumo energético para fachada de alvenaria convencional.....	45
Gráfico 2: Consumo energético para fachada ventilada.....	45
Gráfico 3: Consumo energético para fachada de alvenaria convencional.....	46
Gráfico 4: Consumo energético para fachada ventilada.....	46
Gráfico 5: Consumo energético para fachada de alvenaria convencional.....	46
Gráfico 6: Consumo energético para fachada ventilada.....	47
Gráfico 7: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada.....	47
Gráfico 8: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada.....	48
Gráfico 9: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada.....	48
Gráfico 10: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada.....	48
Gráfico 11: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada.....	49
Gráfico 12: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada.....	49
Gráfico 13: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada por pavimento.....	50
Gráfico 14: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada por pavimento.....	50
Gráfico 15: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada por pavimento.....	50
Gráfico 16: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada por pavimento.....	51
Gráfico 17: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada por pavimento.....	51
Gráfico 18: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada por pavimento.....	51
Gráfico 19: Comparação de temperatura entre fachada convencional e ventilada.....	52
Gráfico 20: Comparação de temperatura entre fachada convencional e ventilada.....	52
Gráfico 21: Comparação de temperatura entre fachada convencional e ventilada.....	53
Gráfico 22: Comparação de temperatura entre fachada convencional e ventilada.....	53
Gráfico 23: Comparação de temperatura entre fachada convencional e ventilada.....	54
Gráfico 24: Comparação de temperatura entre fachada convencional e ventilada.....	54

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
1.1. Contexto	7
1.2. Problema	7
1.3. Objetivos	7
1.4. Justificativa	8
2. REFERENCIAL TEÓRICO	9
2.1. Sustentabilidade	9
2.2. Conforto térmico, construções sustentáveis e eficiência energética.	14
2.3. Envoltória	18
3. METODOLOGIA	34
3.1. Objeto de estudo	35
3.2. Simulações computacionais	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5. CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS	57

1. INTRODUÇÃO

1.1.Contexto

Em face dos acontecimentos climáticos que vemos agravados nas últimas décadas e considerando a grande quantidade de energia consumida pelas edificações no Brasil, para manter o interior das residências em um nível adequado de conforto para os seus habitantes, quais ferramentas legais e normativas existem para nortear o projeto arquitetônico com o objetivo de manter o conforto térmico das edificações, e ainda, como as novas tecnologias de modelagem podem contribuir para a elaboração destes projetos?

1.2.Problema

No contexto da indústria da construção civil observa-se que, de forma geral, existe falta de entendimento e conhecimento dos envolvidos da construção sobre a definição do que é a sustentabilidade, levando à mistificação de que este conceito, quando aplicado, apenas onera o custo de execução e manutenção da edificação, quando comparado com técnicas convencionais de construção. Nesse sentido, é papel da academia difundir o que é sustentabilidade, como influencia a esfera social, política e econômica e qual o impacto no indivíduo quando analisado dentro do âmbito da moradia.

1.3.Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Analisar quantitativamente o desempenho térmico de um projeto arquitetônico para a cidade de Curitiba, Paraná, confrontando-o com as normatizações vigentes sob o aspecto do conforto térmico.

1.3.2. Objetivos Específicos

Estudar os métodos de análise térmica para edifícios residenciais de acordo com a legislação vigente.

Utilizar o software *EnergyPlus* como ferramenta para simulação energética.

Avaliar a envoltória de um edifício residencial unifamiliar comparando diferentes tipos de soluções técnicas.

Analisar o impacto que a solução arquitetônica causa nas unidades habitacionais.

Analisar o consumo energético para resfriamento e aquecimento para a edificação.

Analisar o desempenho de duas variações de fachadas para a edificação, sendo elas: fachada ventilada com alvenaria comum de tijolo cerâmico e alvenaria comum de tijolo cerâmico.

1.4. Justificativa

Este estudo justifica-se devido à crescente demanda dentro da construção civil em produzir material técnico e teórico sobre as novas tecnologias e processos construtivos que comprovem o conforto térmico, devido à Norma Brasileira de Desempenho Térmico de Edificações (NBR 15220) de 2014, aprovada pela ABNT e ao Regulamento Técnico da Qualidade Para o Nível de eficiência Energética Edificação Residencial (RTQ-r) aprovado pela Portaria n.º 18, de 16 de janeiro de 2012 do INMETRO, as edificações deverão seguir parâmetros que abordam os sistemas de vedação, piso e cobertura da edificação que atendam níveis aceitáveis de eficiência.

O entendimento e análise do conforto térmico no ambiente construído fazem-se necessário para tornar possível o projeto de habitações que atendam às legislações vigentes e aos próprios ocupantes.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Sustentabilidade

Dimensionar o impacto das ações humanas sobre a natureza tem sido tarefa cada vez mais disseminada e valorizada para além dos círculos dos ambientalistas. Tudo aquilo que é construído e fabricado, que consome recursos naturais, que produz resíduos, desde a alimentação diária até um grande projeto de arquitetura, causa impacto no meio ambiente de maneira cumulativa. A somatória de todas essas ações mundo afora tem resultado em situações alarmantes e projetado para o futuro consequências graves para o planeta.

A fim de diminuir esses impactos, mesmo produzindo e fazendo uso de tudo que é necessário para a vida em sociedade, algumas alternativas surgiram nos últimos anos dando forma à concepção da sustentabilidade, que, em suma, quer dizer utilizar-se dos recursos naturais, produzir e consumir de forma que se sustente, que não agrida e destrua, mas que colabore para a manutenção e reprodução da natureza, ou que ao menos repare ao máximo os danos causados. A sustentabilidade se firmou como um princípio a nortear ações de governos, empresas, comunidades e indivíduos, com o compromisso principal de não comprometer os recursos naturais das gerações futuras.

Nesse sentido, a sustentabilidade busca a harmonia entre quatro esferas: a social, a econômica, a energética e a ambiental. A energética cumpre um papel importantíssimo, tanto porque a energia é condição sem a qual a sociedade atual não sobrevive, quanto porque a exploração dos recursos naturais para geração de energia é uma das principais causadoras de impactos à natureza. Por isso, dentro do debate sobre sustentabilidade também nasceu a possibilidade do uso de fontes renováveis de energia, como a eólica e a solar, que utilizam o vento e a luz do sol sem causar danos ao meio ambiente. Apesar disso, a demanda por energia é muito maior do que as fontes eólica e solar conseguem suprir, então não basta apresentar outras formas de geração, é preciso melhorar o uso da energia já produzida.

O consumo da energia gerada, que chega até as fábricas, prédios e casas, também pode ser feito com vistas à sustentabilidade e é nesse ponto que se discute a chamada eficiência energética. Esse conceito é dinâmico e se associa a elementos econômicos, como crescimento e produtividade, bem como à proteção do meio ambiente e ao desenvolvimento sustentável (BOMBARDO & NOGUEIRA, 2014).

A eficiência energética é encarada como elemento estratégico, tanto para maximizar resultados quanto para diminuir custos, mas definir seu significado é tarefa complexa. São

ações de diversas naturezas que têm como objetivo reduzir a energia necessária para atender as demandas da sociedade com relação à luz, calor e frio, acionamentos, transportes e uso em processos. Em síntese, o objetivo é atender as necessidades da economia com menor uso de energia primária e com isso diminuir também o impacto à natureza (MME, 2011).

Energia primária é aquela disponível na natureza, tanto de origem renovável (hidráulica, eólica, solar, cana de açúcar e madeira) quanto não renovável (petróleo, gás natural, carvão mineral e nuclear). O serviço de energia depende de uma cadeia de transformações, transporte e estocagem, originadas nessas fontes primárias. Ao longo dessa cadeia é possível exercer modificações ou aperfeiçoamentos que aumentem a eficiência energética do serviço, culminando também em melhor organização, conservação e gestão energética por parte das entidades que compõem a cadeia, objetivando ainda privilegiar ações que tenham um custo inferior ao necessário para suprir a demanda de energia (MME, 2011).

A preocupação com a eficiência energética teve início nas primeiras crises do petróleo na década de 1970, chamou a atenção da comunidade internacional a necessidade de buscar novas fontes de energia, bem como de aproveitar melhor aquela energia já produzida. Nesse sentido, as cidades cumprem um papel central, uma vez que aproximadamente dois terços da demanda global por energia primária e 70% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) têm sua origem nas áreas urbanas (MONZONI & VENDRAMINI, 2017).

Como as cidades concentram a maior parte da demanda, o consumo de energia elétrica está concentrado nas edificações, sendo o setor dos edifícios comerciais o que mais cresceu em consumo energético. Já o consumo residencial se divide em 10% para climatização (ar-condicionado), 11% para iluminação, 17% para aparelhos eletrônicos, 20% para aquecimento de água por meio de chuveiros e torneiras elétricas e 42% para refrigerador e freezer. Algumas variáveis influenciam este consumo, como o clima e a região, a arquitetura da construção com seus sistemas de ventilação e iluminação natural, o rendimento dos aparelhos eletrônicos e os costumes dos moradores, influenciados pelo tamanho da família e da casa, renda e estilo de vida (BOMBARDO & NOGUEIRA, 2014).

Considerando essas variáveis no consumo, a eficiência energética pode ser entendida como o atendimento de todas essas necessidades com menor gasto e melhor aproveitamento da energia. Por isso a construção civil exerce um papel muito importante na implementação de medidas de eficiência energética, que busca tanto a economia de energia quando o menor impacto ao meio ambiente, sem comprometer o conforto térmico, acústico e de luminosidade.

O setor da construção civil é um grande consumidor de recursos naturais e energia, bem como gera muitos resíduos. Para produzir e manter uma construção utiliza-se de mais da

metade dos recursos naturais extraídos do planeta e essas edificações respondem por 30 a 40% do consumo global de energia, emissões de GEE e geração de resíduos. As edificações no Brasil representam 18,7% do consumo total de eletricidade no país (dados de 2012), trazendo para o setor da construção um papel fundamental nesta agenda (MONZONI & VENDRAMINI, 2017).

Dentre toda essa gama de fatores, é preciso considerar que os edifícios, sejam eles residenciais ou comerciais, devem proporcionar um ambiente confortável a quem os habita e esse conforto deve considerar variáveis térmicas, acústicas, de luminosidade e de qualidade do ar. O edifício precisa comportar condições de manter esse conforto ao longo das estações do ano, tanto em climas mais severos como em mais amenos.

A arquitetura sempre cumpriu essa função. A prática da arquitetura regionalista adequava a edificação ao clima e à paisagem do local, contudo, os avanços tecnológicos, principalmente depois da Revolução Industrial, deram origem ao estilo internacional, que não mais considerava as condições ambientais e que passou a adequar as edificações por meio de mecanismos artificiais, e consumidores de energia. A partir da década de 1970, da já mencionada crise do petróleo e da conseqüente necessidade de buscar outras fontes de energia, de economizar a energia gerada e de criar menos impacto ao meio ambiente, essa forma de construir passou a ser questionada também (MME, 2011).

As ideias sobre desenvolvimento sustentável, que incorporam a preservação ambiental às necessidades de produção e consumo, atingiram também a arquitetura, que para se inserir nesse novo paradigma deve produzir um espaço confortável, que seja adequado ao clima local, energeticamente eficiente e com custo de manutenção baixo. A necessidade de conforto do habitante deve ser projetada sem contar com a necessidade de consumir mais energia. Conforto térmico e eficiência energética são as premissas desse novo modelo construtivo (MME, 2011).

O Brasil é o 22º país do mundo em consumo de energia e vem seguindo uma tendência crescente. Dentro dos parâmetros da busca por um consumo mais eficiente, observou-se que o custo médio por MWh (Megawat/hora) de projetos de eficiência energética na indústria brasileira foi calculado em R\$79/MWh, valor abaixo daqueles alcançados pelos leilões de expansão da matriz elétrica no país, que chegaram a R\$125/MWh. Isso quer dizer que, considerando a operação do setor elétrico no limite de sua capacidade, as medidas de eficiência energética são mais baratas do que a geração de mais energia necessária para suprir um aumento de demanda (MONZONI & VENDRAMINI, 2017).

Com vistas a essas possibilidades, o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf), traz várias ações a serem desenvolvidas para aumentar a conservação de energia nos setores industrial, de edificações, de transportes, de iluminação pública, de saneamento, de educação. Com relação às edificações, o PNEf aponta a necessidade de investir em capacitação técnica na área de eficiência energética para profissionais da construção civil, bem como incorporar aos estudos de planejamento urbano os conceitos de eficiência energética. Também aborda a questão das certificações de edifícios que atendam esses princípios. Edifícios públicos federais já são obrigados a se adequarem para receber a certificação, que logo também será aplicada aos edifícios públicos estaduais e municipais, residências e comércios (ALTOÉ et al, 2017).

O potencial autônomo trazido pelo PNEf depende de um planejamento próprio que implemente o uso racional de insumos de energia pelos diferentes setores econômicos e pela população. Esse potencial autônomo se refere às adequações demandadas pela evolução normal do mercado. Ao governo é possível um avanço ainda maior, uma vez que o potencial técnico é muito superior podendo dar-se por meio de políticas públicas de incentivo (ALTOÉ et al, 2017), que vão desde programas de conscientização da população até normativas e exigências específicas. A sustentabilidade e a eficiência energética podem ser alcançadas por esforços variados de diferentes frentes, tanto privadas quanto públicas, tendo em vista a manutenção e o melhoramento da qualidade de vida e a preservação do meio ambiente.

Ao longo das últimas décadas, o termo *desenvolvimento sustentável* foi evoluindo desde sua menção no Relatório de Brundtland, na década de 80. Desde então foram dadas novas interpretações a este termo, em geral existe um denominador comum entre todas as definições, encontram-se referências e questionamentos sobre: sua dependência no tempo, em diferentes escalas de espaço, múltiplas esferas de conhecimento e sua dependência social (BERARDI, 2013. pág. 73).

A dependência no tempo, de forma mais abrangente que no Relatório de Brundtland, questiona que o desenvolvimento sustentável não deve ser tido como uma meta, mas que deve ser buscado continuamente, considerando o conhecimento disponível no momento em que é avaliado. O segundo aspecto sobre desenvolvimento sustentável aborda a dependência espacial, no sentido de que a sustentabilidade possui valores intrínsecos à localidade e que esses valores não podem ser tidos como globais. No entanto, as localidades possuem interações entre si, de maneira que, no desenvolvimento sustentável, existe uma relação entre o local e o global que deve ser respeitada (BERARDI, 2013. pág. 73).

Como destaca Berardi (2013), o terceiro denominador pode ser dividido em três esferas: ambiental, social e econômica. Observa ainda que esta separação causa desentendimento na compreensão do termo, contudo a sustentabilidade reside na inter-relação destes três aspectos.

O último aspecto considera os múltiplos entendimentos do termo sustentabilidade por diferentes indivíduos, visto que, cada indivíduo possui um ponto de vista diferente de outro, é correto afirmar que o aspecto social tem um grau de incerteza inerente a ele. A sustentabilidade, deste modo, fica definida de forma mais adequada quando analisada “como um ponto de vista relativo para avaliações em longo prazo e não como um *status* rígido e fixado no tempo, que é considerado de forma definitiva” (BERARDI, 2013. pág. 73).

2.2. Conforto térmico, construções sustentáveis e eficiência energética.

Este capítulo trata de três assuntos complementares em escala, inicia-se na escala local, passa pela regional e alcança a escala nacional. O primeiro aborda os aspectos que influenciam no clima e os fatores que interagem com o indivíduo, o segundo expõe as possíveis abordagens que o arquiteto e o engenheiro podem ter na construção das edificações sustentáveis e, por último, é apresentado um panorama da terceira escala, produto da relação das duas primeiras.

2.2.1. Conforto térmico

O conforto sentido pelo indivíduo em um ambiente está ligado à escala local, e cabe à arquitetura “tanto amenizar as sensações de desconforto impostas por climas muito rígidos, tais como os de excessivo calor, frio ou ventos, como também propiciar ambientes que sejam, no mínimo, tão confortáveis como os espaços ao ar livre em climas amenos” (FROTA & SCHIFFER, 2014, pag. 53). Os fatores climáticos que atuam em determinada localidade advém de diversos aspectos, Frota e Schiffer (2014) os definem conforme o Quadro 1.

Quadro 1: Fatores que influenciam no clima.

Radiação solar	Varia de acordo com a época do ano e latitude.
Movimento aparente do sol	Está relacionado à época do ano e também em função da hora do dia.
Latitude	Quanto maior a latitude, menor será o ângulo de incidência do raio de sol e consequentemente, menor será a absorção de radiação solar pelas superfícies horizontais.
Brisas terra-mar	Percebidas nos litorais, pelas variações do sentido das brisas em relação ao dia e noite.
Topografia	Pode gerar barreiras para os ventos ou favorece-los.
Revestimento do solo	Através das diferenças de umidade de solo que influencia em sua condutibilidade

	térmica.
Umidade atmosférica	Umidade do ar elevada favorece baixas amplitudes térmicas no ambiente, bem como baixos índices de umidade favorecem o amplitudes térmicas altas.
Ponto de orvalho	Relacionado à capacidade do ar em reter água e sua temperatura.
Precipitação atmosférica	Varia conforme a região
Nebulosidade	Se a camada de nuvens for suficientemente pode barrar uma quantia significativa das radiações solares.
Ventos	Ocasionados pelas diferenças de temperatura e pressão no globo.

Fonte: Adaptado de FROTA & SCHIFFER (2014).

Um aspecto que o autor ressalta sobre o Brasil refere-se aos ventos alíseos que são os mais representativos, “são originários nas regiões subtropicais de alta pressão, nos dois hemisférios situados entre 30° e 35° de latitude, dirigindo-se para *SO* no hemisfério norte e *NO* no hemisfério sul” (FROTA & SCHIFFER, 2014, pag. 63).

Estes fatores influenciam diretamente na arquitetura e no conforto percebido no interior dos espaços projetados. Como pontua Frota e Schiffer (2014), “a arquitetura deve contribuir para minimizar a diferença entre as temperaturas externas e internas do ar”, principalmente em regiões de clima quente. Frota e Schiffer (2014) afirmam ainda que:

“Um desempenho térmico satisfatório da arquitetura, com a utilização apenas de recursos naturais, pode não ser possível em condições climáticas muito rígidas... Mesmo nesses casos devem-se procurar propostas que maximizem o desempenho térmico natural, pois, assim, pode-se reduzir a potência necessária dos equipamentos de refrigeração ou aquecimento, visto que a quantidade de calor a ser retirada ou fornecida ao ambiente resultará menor.”

(FROTA & SCHIFFER, 2014, pag. 66)

Assim, a interface que separa o meio externo do interno na arquitetura, representa um elemento significativo no que tange o conforto percebido pelo indivíduo, pela necessidade ou não do uso de equipamentos reguladores de temperatura e pelos materiais e técnicas

utilizadas. Assim, dado que o objeto de estudo será uma edificação e, mais especificamente, o comportamento térmico de uma edificação, os tópicos que à frente buscam contextualizar os aspectos e propriedades dos componentes que atuam nesse mecanismo de trocas térmicas entre o meio interno com o externo.

2.2.2. Construções sustentáveis

Antes de discutir eficiência energética na arquitetura é preciso entender que este é apenas um tópico dentro do que é uma construção sustentável, como vimos acima sustentabilidade é um termo amplo com diversas variáveis. Berardi (2013) demonstra que a própria classificação de um edifício com sustentável é um trabalho difícil, muitas tentativas tem sido feitas e a definição de fato tem ficado à cargo dos sistemas de avaliação de sustentabilidade que são apresentados no mercado como o Referencial AQUA e LEED, por exemplo. Berardi (2013), de forma resumida, faz uma lista dos aspectos mais frequentes quando analisada a sustentabilidade de uma edificação:

- Consumo de recursos não renováveis;
- Consumo de água;
- Consumo de materiais;
- Implantação;
- Impactos na ecologia do local;
- Questões urbanísticas;
- Emissão de gases estufa;
- Resíduos sólidos e emissão de efluentes;
- Conforto interno, qualidade do ar, iluminação e acústica;
- Longevidade, adaptabilidade e flexibilidade;
- Operação e manutenção;
- Gestão de *facilities*;
- Questões sociais;
- Considerações econômicas;
- Percepções e influências culturais.

Esses itens variam de região em um sentido mais amplo, as construções são próprias de suas localidades, bem como os materiais empregados, as legislações que as regem, as apropriações do espaço, os critérios de conforto e de consumo, etc. Avaliar o que é

sustentável e rotular uma edificação como sustentável deve ser um trabalho contínuo e meticuloso. (BERARDI, 2013. pág. 77).

2.2.3. Eficiência energética

Dentre os aspectos citados acima, este estudo enfatiza o conforto da habitação, relacionando a solução arquitetônica de forma geométrica e escolhas de materiais com a sua eficiência energética quando avaliado o consumo de energia para o condicionamento de ar. Pois, como pontua Lamberts et al, (2014), é intrínseco a relação entre arquitetura e energia:

“A eficiência energética na arquitetura pode ser entendida como um atributo inerente à edificação representante de seu potencial em possibilitar conforto térmico, visual e acústico aos usuários com baixo consumo de energia. Portanto, um edifício é mais eficiente energeticamente que outro quando proporcionar as mesmas condições ambientais com menos consumo de energia.”

(LAMBERTS et al, 2014, pag. 3)

Observa-se que, o consumo de energia elétrica nas residências brasileiras representa um montante significativo no total de energia gerada no país a Empresa de Pesquisas Energética (EPE) estima que de 2015 a 2020 o consumo de energia no Brasil vai saltar de 464.510 GWh para 554.129 GWh, desse montante, em 2015 a classe residencial passou a representar 28,2% e a projeção para 2020 é de 28,7% (EPE, 2015. Pag. 53). Dessa energia consumida pelo setor residencial estimas- se que 20,0% é pelo uso de condicionamento de ar, chegando a representar 40,0% na região norte e 32,0% na região sul (ELETROBRÁS 2007, pag. 16).

Aliado aos dados acima, é projetado um crescimento do número de domicílios de 66.435 mil para 71.076 mil, ou seja, um crescimento de 4.641 mil no número de habitações no Brasil (EPE, 2015. Pag. 6). Ainda no que diz respeito à habitação, a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC) estima que o déficit habitacional seja de 6.189.503 (CBIC, 2017). Deste modo, pode-se prever uma demanda de aproximadamente 10.000.000 de habitações para 2020.

Associando o aumento do consumo energético, com o déficit habitacional e a projeção de crescimento do número de domicílios, esboça-se um cenário em que a residência pode

influenciar fortemente na redução do consumo de energia elétrica, tendo em vista o montante energético do consumo de energia para climatizar as residências.

2.3. Envoltória

Com o exposto acima, observa-se que as faces que envolvem a edificação são objetos fundamentais no estudo do conforto térmico, essa faces, conforme o RTQ-r é o “conjunto de planos que separam o ambiente interno do ambiente externo, tais como fachadas, empenas, cobertura, aberturas, assim como quaisquer elementos que os compõem. Não estão incluídos pisos, estejam eles ou não em contato com o solo” (INMETRO, 2012. Pag. 9). Já as fachadas são “superfícies externas verticais ou com inclinação superior a 60° em relação à horizontal. Inclui as superfícies opacas, translúcidas, transparentes e vazadas.” (INMETRO, 2012. Pag. 10), Nesse sentido, este estudo terá foco em dois elementos das fachadas:

Aberturas: Todas as áreas da envoltória do edifício, abertas ou com fechamento translúcido ou transparente (que permitam a entrada da luz e/ou ar) incluindo, por exemplo, janelas, portas de vidro (com mais da metade da área de vidro), paredes de blocos de vidro e aberturas zenitais. A área da abertura exclui os caixilhos (INMETRO, 2012. Pag. 4).

Paredes externas: Superfícies opacas que delimitam o interior do exterior da edificação. Esta definição exclui as aberturas (INMETRO, 2012. Pag. 12).

2.3.1. Sistema de fachada ventilada

Como explica Mizgier e Penso (2016), as fachadas ventiladas são sistemas que permitem o fluxo de ar por meio da cavidade entre a alvenaria e o revestimento, este sistema deve ser avaliado conforme o clima onde será aplicado, uma vez que seu desempenho energético envolve trocas térmicas complexas, além da influência da cor, absorvância solar das superfícies e dos aspectos referentes à geometria da edificação.

Do ponto de vista do envelope térmico, a presença de uma cavidade ventilada no exterior da envoltória modifica as condições experimentadas pelas superfícies subjacentes de

transferência de calor. Esta cavidade exterior atua como um defletor de radiação e convecção situado entre o ambiente exterior e a face externa da superfície de transferência de calor subjacente. A superfície externa real é referida como o "defletor" (DOE. 2017).

As configurações desse sistema podem ser variadas, alternando-se o tipo de revestimento, o sistema de fixação, tipos de juntas, quanto à operabilidade da própria câmara de ar e sua própria espessura. De forma mais detalhada, essas configurações, são encontradas de acordo com o Quadro 2.

Quadro 2: Características dos sistemas de fachada ventilada.

Elementos	Variações
Revestimento externo	Placas de pedra natural; Placas cerâmicas; Placas de grés porcelânico; Placas de alumínio composto; Cortina de vidro opaco; Placas cimentícias.
Sistema de fixação	Suportes metálicos visíveis ou ocultos.
Tipos de juntas	Juntas abertas; Juntas fechadas.
Operabilidades da câmara de ar	Ventilação constante de piso a topo; Ventilação entre pavimentos; Aberturas operacionalizáveis. Aberturas de placa à placa, etc.
Espessura da câmara de ar	5 a 30 cm.
Isolamento Térmico	Lã de rocha, lã de vidro, Lã de PET, etc.

Fonte: Adaptado de MIZGIER & PENSO (2016).

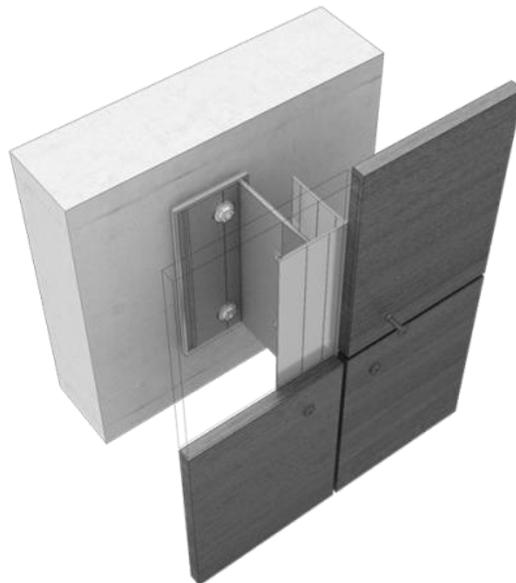
O mercado oferece ainda opções de fachada ventilada com uma camada adicional de isolante térmico entre o revestimento externo e a parede. Esse isolamento é fixado diretamente na parede, conforme a Figura 1 e 2.

Figura 1: Sistema de fachada ventilada com isolante térmico.



Fonte: ALUPROF, 2018.

Figura 2: Sistema de fachada ventilada sem isolante térmico.



Fonte: INNWOOD, 2018.

No caso de fachadas com revestimento externo e juntas abertas, o ar dentro do espaço criado entre a fachada e o revestimento externo possui movimento ascendente ou descendente, gerado por efeitos como a pressão dos ventos na fachada, temperatura externa, efeito chaminé, etc, tornando a dinâmica da troca de calor entre o ambiente interno e externo, diferenciada. Para calcular as trocas térmicas nesse sistema de fachada, a literatura apresenta algumas formas de quantificar o balanço térmico quando a envoltória apresenta uma câmara

de ar ventilada subjacente à parede convencional. A seguir estão descritas quatro formas de quantificar as trocas térmicas nestes sistemas de vedação.

Santos e Matias (2006) definem a intensidade da ventilação da câmara de ar em três categorias: se não existe ventilação, se a ventilação é fraca ou se a ventilação é forte, essa classificação, é feita conforme a Figura 3.

Figura 3: Definição da câmara de ar

Espaço de ar confinado	Onde a relação de abertura pelo comprimento (s/L) da parede é menor que 500mm ² /m
Espaços de ar fracamente ventilado	Onde a relação de abertura pelo comprimento (s/L) da parede é maior que 500mm ² /m e igual ou inferior a 1500 mm ² /m.
Espaços de ar fortemente ventilado	Onde a relação de abertura pelo comprimento (s/L) da parede é maior que 1500mm ² /m.

Fonte: Adaptado de SANTOS & MATIAS, 2006. Pag. 8-9.

A intensidade da ventilação da câmara de ar influencia diretamente o comportamento térmico do material. Santos e Matias (2006) afirmam que, quando fraca, a resistência do ar no interior da câmara é a metade do valor indicado na Figura 5 para R_{ar} e se o elemento localizado na face externa da câmara de ar possuir uma resistência térmica superior a 0,15 (m².°C)/W a resistência térmica do espaço de ar deve assumir o valor de 0,15 (m².°C/W). Já para intensidade de ventilação forte, tanto a resistência do ar dentro câmara como também a do elemento externo à câmara de ar é nula, e ainda, a resistência do ar externo (R_{se}) assume o mesmo valor da resistência do ar interno (R_{si}) indicado na Figura 4 (SANTOS & MATIAS, 2006. Pag. 8-9).

Figura 4: Quadro das resistências superficiais.

Sentido do fluxo de calor	Resistência térmica superficial [(m ² .°C)/W]	
	exterior R_{se}	interior R_{si}
Horizontal ⁽¹⁾	0,04	0,13
Vertical ⁽²⁾	ascendente	0,10
	descendente	0,17

1 - Paredes (até +/- 30° com a vertical)

2 - Coberturas e pavimentos (até +/- 60° com a horizontal)

Fonte: SANTOS & MATIAS, 2006. ANEXO I.11

Figura 5: Quadro de resistência do ar em câmaras de ar não ventilado

Sentido do fluxo do calor	Espessura do espaço de ar ⁽¹⁾	Resistência térmica ⁽²⁾
	[mm]	R_{ar} [(m ² ·°C)/W]
Horizontal ⁽³⁾	< 5	0,00
	5	0,11
	10	0,15
	15	0,17
	25 a 300	0,18
Vertical ⁽⁴⁾ ascendente	< 5	0,00
	5	0,11
	10	0,15
	15 a 300	0,16
Vertical ⁽⁴⁾ descendente	< 5	0,00
	5	0,11
	10	0,15
	15	0,17
	25	0,19
	50	0,21
	100 300	0,22 0,23

1 – Para espaços de ar realizados *in situ* só se considera a respectiva resistência térmica se a espessura for igual ou superior a 15 mm.

2 – Ambas as superfícies confinantes do espaço de ar com emitância elevada ($\epsilon \approx 0,9$), o que corresponde às superfícies dos materiais correntes.

3 – Paredes (até $\pm 30^\circ$ com a vertical).

4 – Coberturas e pavimentos (até $\pm 60^\circ$ com a horizontal).

Fonte: SANTOS & MATIAS, 2006. ANEXO I.11.

Santos e Matias (2006) e a ABNT (2014), defendem formas semelhantes de cálculos da resistência térmica da parede. Contudo, a norma, diferente do caso anterior, define duas condições de ventilação e não três classificações, como podem ser vistas na Figura 6.

Figura 6: Condição de ventilação da câmara de ar a partir da fração de abertura.

Posição da câmara de ar	Câmara de ar	
	Pouco ventilada	Muito ventilada
Vertical (paredes)	$S/L < 500$	$S/L \geq 500$
Horizontal (coberturas)	$S/A < 30$	$S/A \geq 30$

Onde:
S é a área total de abertura de ventilação, em cm²;
L é o comprimento da parede, em m;
A é a área da cobertura.

Fonte: ABNT, 2014. Pag. 5.

A ABNT (2014) considera que a intensidade da ventilação na câmara de ar apenas influencia na resistência térmica quando existe perda de calor do ambiente interno para o externo e nos demais casos, quando o ambiente interno tem ganho de calor em relação ao ambiente externo, usam-se os valores presentes na Figura 7.

Figura 7: Variação da resistência térmica em função da espessura e emissividade da câmara de ar.

Natureza da superfície da câmara de ar	Espessura "e" da câmara de ar cm	Resistência térmica R_{ar} $m^2 \cdot K/W$		
		Direção do fluxo de calor		
		Horizontal	Ascendente	Descendente
Superfície de alta emissividade $\varepsilon > 0,8$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,14	0,13	0,15
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,16	0,14	0,18
	$e > 5,0$	0,17	0,14	0,21
Superfície de baixa emissividade $\varepsilon < 0,2$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,29	0,23	0,29
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,37	0,25	0,43
	$e > 5,0$	0,34	0,27	0,61

Notas:
 1 ε é a emissividade hemisférica total.
 2 Os valores para câmaras de ar com uma superfície refletora só podem ser usados se a emissividade da superfície for controlada e previsto que a superfície continue limpa, sem pó, gordura ou água de condensação.
 3 Para coberturas, recomenda-se a colocação da superfície refletora paralelamente ao plano das telhas (exemplo C.6 do anexo C); desta forma, garante-se que pelo menos uma das superfícies - a inferior - continuará limpa, sem poeira.
 4 Caso, no processo de cálculo, existam câmaras de ar com espessura inferior a 1,0 cm, pode-se utilizar o valor mínimo fornecido por esta tabela.

Fonte: ABNT, 2014. Pag. 8.

Em condições de inverno, de perda de calor, distinguem-se dois casos:

- Câmara pouco ventilada: a resistência térmica da câmara será igual à da câmara não ventilada, conforme a Figura 7;
- Câmara muito ventilada: a camada externa à câmara não será considerada e a resistência térmica total deve ser calculada pela expressão: $R_T = 2 \cdot R_{si} + R_t$

Onde:

R_t – Resistência térmica da camada interna do componente construtivo. No caso de coberturas, é a resistência térmica do componente localizado entre a câmara de ar e o ambiente interno – forro;

R_{si} – Resistência térmica da camada de ar adjacente à superfície interna de um componente que transfere calor por radiação e/ou convecção.

Os valores usados para R_{si} São dados pela Figura 8.

Figura 8: Valores da resistência térmica superficial interna e externa.

R_{si} (m ² .K)/W			R_{se} (m ² .K)/W		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
⇒	⇐	⇓	⇒	⇐	⇓
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Fonte: ABNT, 2014. Pag. 7.

Por outro lado, Frota e Schiffer (2014, pag. 41) defendem que “os elementos das edificações, quando expostos aos raios solares diretos ou difusos, ambas as radiação de alta temperatura, podem ser classificados como: a) opacos; b) transparentes ou translúcidos.” A determinação da intensidade de fluxo térmico para paredes externa opaca é obtida a partir da soma de dois componentes de ganho de calor, sendo eles:

- Ganho de calor solar, expresso por: $U \alpha \frac{I_g}{h_e}$ (W/m²);
- Ganho ou perda de calor por variação de temperatura, expresso pela fórmula:
 $U(te - ti)$ (W/m²).

Sendo:

U – Coeficiente global de transmissão térmica (W/m² ° C);

T_e – Temperatura do ar externo (° C);

T_i – Temperatura do ar interno (° C);

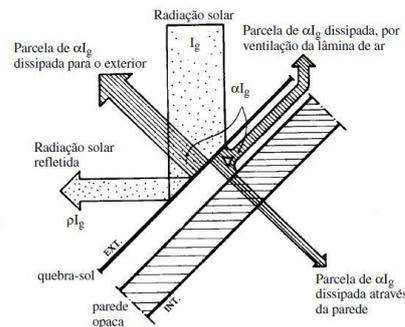
α – Coeficiente de absorção da radiação solar;

I_g – Intensidade de radiação solar incidente global (W/m²);

h_e – Coeficiente de condutibilidade térmica superficial externa (W/m² ° C).

Os autores complementam que, “A presença de uma placa quebra-sol (“brise-soleil”) diante de uma parede opaca vai ocasionar uma série de mecanismos de trocas (FROTA & SCHIFFER, 2014). Conforme a Figura 9 representa.

Figura 9: Proteção solar de paredes opacas.



Fonte: Frota e Schiffer, 2014.

Deste modo, os autores afirmam que, quando a parede externa dotada de uma proteção externa separada por uma cavidade de ar, o valor de α deve ser substituído por um valor equivalente. Deste modo, “o valor de α^* será função das características da proteção solar e varia inclusive com a orientação da parede a ser protegida, com a latitude do local onde está situado o edifício e com a época do ano” (FROTA & SCHIFFER, 2014). Assim, os valores para α^* :

- Quebra-sol contínuo, vertical, diante de parede vertical, a 30 cm, sem características especiais do material e acabamentos: 0,20 a 0,25;
- Quebra-sol contínuo, vertical, diante de parede vertical, a 30 cm, com $R \cong 0,6 \text{ m}^2\text{C/W}$, face externa branca e face interna pouco emissiva: 0,15 a 0,10;
- Quebra-sol de lâminas verticais colocados diante de parede vertical: variável
- Beirais e quebra-sol de lâminas horizontais: variável;
- Cobertura com sombreamento de um quebra-sol contínuo, a 30 cm: 0,15 a 0,20;
- Cobertura com sombreamento de quebra-sol contínuo, a 30 cm, face externa clara, face interna pouco emissiva, material isolante: 0,05;

Por último, o método de cálculo para as transferências de calor entre o meio externo e interno adotada pelo software *EnergyPlus* relaciona aspectos que considera o material externo à câmara de ar, a própria câmara de ar e as diversas trocas térmicas de convecção e radiação que ocorrem no sistema, bem como da própria circulação de ar no interior da cavidade, dada pelo efeito chaminé, Frota e Schiffer (2014, pag. 135) descrevem esse efeito considerando que:

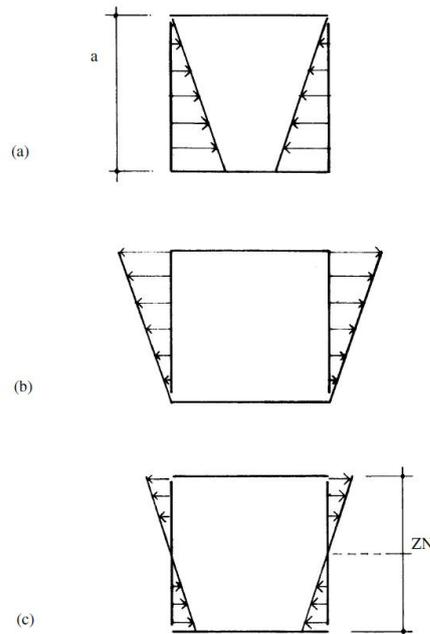
“O estudo da ventilação por efeito chaminé é feito considerando apenas as diferenças de pressões originadas das diferenças de temperaturas do ar interno e externo ao edifício. Os ganhos de calor a que um edifício está submetido ocasionam a elevação de temperatura do ar contido no seu interior. O ar aquecido torna-se menos denso e com uma tendência natural à ascensão.”

(FROTA & SCHIFFER, 2014, pag. 135)

Os autores complementam que “No que se refere ao fluxo de ar, a fórmula básica advém da analogia hidráulica, admitindo-se para a massa específica do ar um valor correspondente a uma temperatura média do ar externo e interno, e uma diferença de pressão referida às meias alturas das aberturas.” (FROTA & SCHIFFER, 2014). A Figura 10 ilustra como ocorre a distribuição de pressões no interior de uma caixa cúbica, onde a temperatura no seu interior é maior que a temperatura do exterior, em três situações:

- a) Com aberturas próximas ao topo do cubo;
- b) Com aberturas próximas à base do cubo;
- c) Com aberturas próximo à base e ao topo do cubo.

Figura 10: Croquis explicativos da distribuição das pressões em uma caixa cúbica.



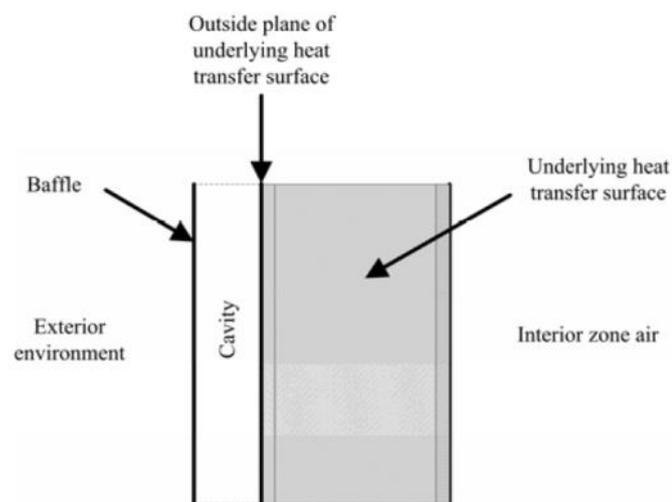
Fonte: Frota e Schiffer, 2014.

Para esses cálculos o software, em sua interface de trabalho, utiliza o campo *Advanced Construction: Surface Property: Exterior Naturally Vented Cavity*. Este campo possui algoritmos que consideram o balanço térmico em duas camadas: A externa, composta pela placa opaca, também chamada de “defletora” e a interface interna situada entre a parede e o defletor, configurando a câmara de ar ventilada ou cavidade ventilada.

Formulação do modelo teórico para o cálculo da condição externa da cavidade ventilada:

O campo *Exterior Naturally Vented Cavity* é disponibilizado como um caso especial para as condições de envoltórias opacas quando elas configuram um exterior caracterizado por multicamadas. A Figura 11 mostra a configuração geral. Do ponto de vista do envelope térmico, a cavidade ventilada no exterior da superfície modifica as condições de transferência de calor pelas superfícies subjacentes. Esta cavidade exterior atua como uma defletora da radiação e convecção situada entre o ambiente externo e a face externa da superfície de transferência de calor subjacente. A modelagem pressupõe que a capacidade térmica no defletor externo pode ser negligenciada, uma vez que é muito menor do que a massa da superfície subjacente. Esta suposição pode não ser válida para sistemas de fachadas exteriores ventilados que utilizam uma camada externa mais maciça, como telhas pesadas, neste caso, esse essa forma de modelo teórico não deve ser usado para esses casos sem modificações adequadas na modelagem (DOE, 2017).

Figura 11: Composição dos elementos contidos na condição de cavidade ventilada.

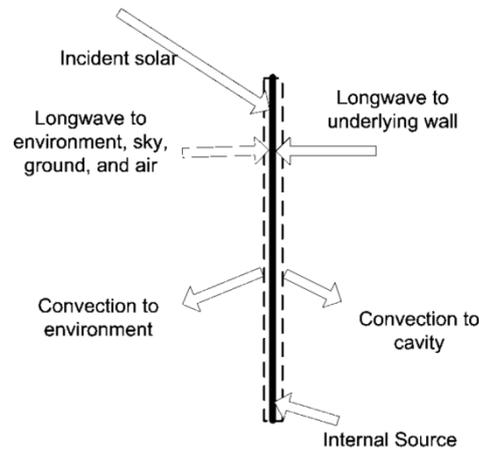


Fonte: DOE, 2017.

Balanço térmico no Defletor:

Conforme o Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (DOE) acredita-se que o defletor seja suficientemente delgado e de alta condutividade para que possa ser modelado usando uma única temperatura para ambos os lados e ao longo da sua área. Esta temperatura é determinada pela formulação de um balanço de calor em um volume de controle que apenas encapsula a superfície do defletor. O defletor deve cobrir completamente a superfície subjacente, de modo que seja opaco para ondas curtas e ondas longas. Esta suposição significa que, mesmo que o defletor tenha alguma área aberta para ventilação, nenhuma energia solar passa por essas aberturas (DOE, 2017). O balanço térmico está diagramado na Figura 12.

Figura 12: Esquema do balanço térmico do elemento externo da fachada ventilada (Defletor).



Fonte: DOE, 2017.

O balanço térmico na superfície do defletor é dado pela seguinte formula:

$$q''_{asol} + q''_{rad,Amb} + q''_{conv,Amb} + q''_{rad,Cav} + q''_{conv,Cav} + q''_{fonte} = 0 \quad (1)$$

Sendo:

q''_{asol} – A absorção solar direta e difusa do sol, ou seja, ondas curtas, é calculada usando modelos de condições de céu, como: radiação solar, sombreamentos, reflexões, a localização, orientação e propriedades do material.

$q''_{rad,Amb}$ – O fluxo térmico de radiações de ondas longas do ar externo e dos arredores, do solo, atmosfera, dado por $q''_{rad,Amb} = h_{r,atm} \times$

- $(T_{amb} - T_{defletor}) + h_{r,céu} \times (T_{céu} - T_{defletor}) + h_{r,solo} \times (T_{amb} - T_{defletor})$.
- $q''_{conv,Amb}$ – O fluxo térmico através da convecção com o ar externo dado por $q''_{conv,Amb} = h_{c,e} \times (T_{amb} - T_{defletor})$.
- $q''_{rad,Cav}$ – O fluxo térmico da radiação de ondas longa emitida pela superfície da parede, dado por $q''_{rad,Cav} = h_{r,par} \times (T_{par} - T_{defletor})$.
- $q''_{conv,Cav}$ – O fluxo térmico através da convecção com o ar da cavidade, dado por $q''_{conv,Cav} = h_{c,cav} \times (T_{cav} - T_{defletor})$.
- q''_{fonte} – A energia gerada quando o defletor é um dispositivo híbrido, como um módulo fotovoltaico ou um coletor térmico ativo.

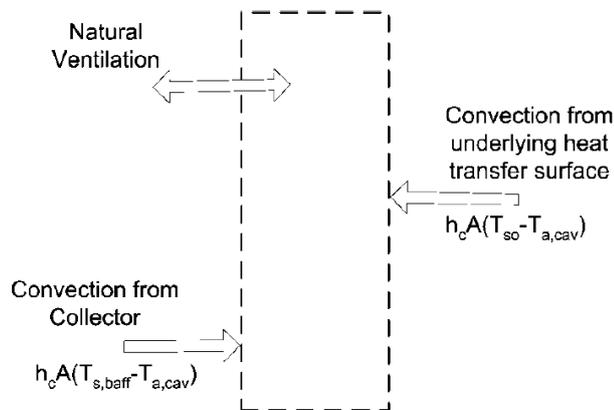
Assim, fazendo a substituição em (1) a temperatura do defletor será:

$$T_{defletor} = \frac{(h_{c,e} \times T_{amb} + h_{r,atm} \times T_{amb} + h_{r,céu} \times T_{céu} + h_{r,solo} \times T_{amb} + h_{r,par} \times T_{par} + h_{c,cav} \times T_{cav} + q''_{fonte})}{(h_{c,e} + h_{r,ar} + h_{r,céu} + h_{r,solo} + h_{r,cav} + h_{c,cav})} \quad (2)$$

Balanco térmico na câmara de ar:

A câmara de ar ou cavidade é o volume de ar localizado entre o defletor e a parede. A temperatura do ar da cavidade, $T_{a,cav}$, é determinado pela formulação de um balanço térmico em um volume de controle de ar exposto na Figura 13 (DOE, 2017).

Figura 13: Esquema do balanço térmico da cavidade ventilada.



Fonte: DOE, 2017.

As trocas térmicas do ar desta cavidade também são consideradas no cálculo, seu balanço térmico se dá pela seguinte expressão:

$$\dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{ce} + \dot{Q}_{c,defletor} = 0 \quad (3)$$

Onde:

\dot{Q}_{vent} – É a quantia de energia adicionada através de ventilação natural, trocada do ar do ambiente externo com o ar da cavidade.

\dot{Q}_{ce} – É a quantia de energia adicionada pelas trocas térmicas superficiais através da convecção pela parede.

$\dot{Q}_{c,defletor}$ – É a quantia de energia adicionada pelas trocas térmicas superficiais através da convecção pelo defletor.

$$T_{a,cav} = \frac{(h_{c,cav} \times A \times T_{par} + \dot{m}_{vent} \times c_p \times T_{amb} + h_{c,cav} \times A \times T_{defletor})}{(h_{c,cav} \times A + \dot{m}_{vent} \times c_p + h_{c,cav} \times A)} \quad (4)$$

Onde:

A – É a área da superfície (m²)

\dot{m} – É o fluxo da massa de ar a partir de forças naturais (kg/s)

$$\dot{m}_{vent} = \rho \times \dot{V}_{tot} \quad (5)$$

Onde:

ρ – É a densidade do ar (kg/m³)

\dot{V}_{tot} – $\dot{V}_{tot} = \dot{V}_{vent} + \dot{V}_{térmico}$ É o fluxo volumétrico total da ventilação de ar dentro e fora da cavidade, conduzidos pelo vento e impulsionados pelo efeito chaminé.

$$\dot{V}_{vent} = C_v \times A_{int} \times U_{\infty} \quad (6)$$

$$\dot{V}_{térmico} = C_d \times A_{abert,efet} \times \sqrt{2g\Delta H_{npl} \left(\frac{T_{a,cav} - T_{amb}}{T_{a,cav}} \right)} \quad (7)$$

(Se $T_{a,cav} > T_{amb}$)

e,

$$\dot{V}_{t\acute{e}rmico} = C_d \times A_{abert,efet} \times \sqrt{2g\Delta H_{npl}} \left(\frac{T_{amb} - T_{a,cav}}{T_{amb}} \right) \quad (8)$$

(Se $T_{amb} > T_{a,cav}$ e o defletor é vertical).

Onde:

- C_v – É a eficácia das aberturas e depende da geometria de abertura e da orientação em relação ao vento. ASHRAE (2009) indica valores de 0,25-0,6. Esse valor é determinado pelo usuário.
- C_d – É o coeficiente de descarga para a abertura e depende da geometria de abertura. Esse valor é determinado pelo usuário.
- $A_{abert,efet}$ – Os argumentos de continuidade de massa levam a modelar a área das aberturas como metade da área total das aberturas então se tem:

$$A_{abert,efet} = \frac{A_{abert,total}}{2}$$
- g – É a constante gravitacional tomada como 9,81 (m/s²).
- ΔH_{npl} – É a altura do ponto médio da abertura inferior ao nível de pressão neutra. Esse valor é determinado pelo usuário.

Se a cavidade for horizontal e, $T_{amb} > T_{a,cav}$, então $\dot{V}_{t\acute{e}rmico} = 0$, porque esta é uma situação estável.

Note-se que o modelo envolve a previsão das taxas que o ar ambiente se move dentro e fora da cavidade. A modelagem exata desses fluxos de ar seria extremamente desafiadora e, por isso, os modelos fornecidos através deste objeto são modelos de engenharia simplistas baseados em coeficientes de descarga que são sensíveis aos efeitos do vento e do barulho. A precisão depende dos valores e da aplicabilidade dos coeficientes de descarga e, infelizmente, pouca pesquisa está disponível para ajudar a caracterizar estes. Os modelos devem ser considerados rudimentares e o usuário é encorajado a explorar diferentes valores dos coeficientes em tentativas de limitar a importância da ventilação natural para as cavidades (DOE, 2017).

Com o descrito acima a respeito dos balanços térmicos do defletor e da cavidade e considerando a interface do software *Energy Plus* os dados de entrada para a simulação energética de uma fachada ventilada são os seguintes:

- a) **Fração da área de aberturas:** Fração de área para qual parte do defletor consiste em aberturas. A área das aberturas irá definir o produto deste campo e a soma da área das superfícies subjacentes.
- b) **Emissividade térmica do material do defletor exterior:** Este campo é usado para inserir a emissividade térmica do defletor. Esta propriedade de superfície é para radiação infravermelha de ondas longas. A propriedade é usada para ambos os lados do coletor. A maioria dos materiais pintados tem uma emissividade de 0,9.
- c) **Absorção solar do defletor exterior:** Esta propriedade da superfície é para ondas curtas, radiação solar. A propriedade é usada para o lado da frente do defletor que defronta o ambiente. As cores mais escuras possuem maior absorção. Enquanto o preto apresenta maior desempenho, outras cores podem ser usadas para combinar o esquema de cores do resto da fachada.
- d) **Escala de altura para a ventilação impulsionada pelo efeito chaminé:** Este campo é usado para inserir uma escala de altura nominal (m) para predição de ventilação induzida pelo efeito chaminé. Esse valor (ΔH_{npl}) é definido como a altura do ponto médio da abertura inferior ao nível de pressão neutra. Aumentar o valor aumentará a taxa de ventilação devido ao efeito chaminé.
- e) **Espessura efetiva da cavidade atrás do defletor exterior:** Este campo é usado para inserir uma espessura de espaço nominal (m) para o coletor. Se o defletor estiver ondulado, usa-se a profundidade média. Quando o coletor está próximo a horizontal este valor de distância só é usado para determinar uma escala de comprimento na direção vertical para cálculos do efeito chaminé. Por exemplo, se o coletor estiver montado em um telhado plano, sua altura ajustada pela inclinação é zero e o programa usará essa espessura de espaço como uma escala de comprimento em vez da altura do campo anterior.
- f) **Razão da área de superfície real para área de superfície projetada:** Este campo é usado para inserir um fator que explica a área resultante de superfície extra de um defletor com face irregular. As ondulações podem estar presentes para ajudar a endurecer o defletor ou as telhas ventiladas podem ter mais superfície para transferência de calor por convecção do que a superfície

subjacente. A área de superfície projetada é obtida pelo programa a partir das superfícies subjacentes (planas). Se o defletor for plano, essa relação é 1,0. Se o defletor for ondulado, então essa relação será maior do que uma com um valor típico pode ser 1.165.

- g) **Rugosidade da superfície exterior:** Este campo é usado para descrever a rugosidade relativa do material do defletor. Este parâmetro influencia apenas os coeficientes de convecção, mais especificamente o coeficiente de convecção exterior. As opções neste campo são: "VeryRough", "Rough", "MediumRough", "MediumSmooth", "Smooth" e "VerySmooth" na ordem das opções mais ásperas às mais suaves.
- h) **Eficácia das aberturas em relação ao vento:** Este campo é usado para inserir um valor para o coeficiente usado para determinar trocas de ar natural do vento. O vento fará com que o ar exterior se mova para dentro e para fora da cavidade. C_v é um coeficiente arbitrário utilizado para modelar a eficácia das aberturas e depende da geometria de abertura e da orientação em relação ao vento. C_v provavelmente deve estar no intervalo de 0,05 a 0,65. Valores altos de C_v aumentará a quantidade de ventilação natural. C_v é assumido como sendo de 0,5 a 0,6 para ventos perpendiculares e 0,25 a 0,35 para ventos diagonais (ASHRAE, cap.16-pag.13. 2009)
- i) **Coefficiente de descarga para aberturas com respeito ao condutor do efeito chaminé:** Este campo é usado para inserir um valor para o coeficiente usado para determinar as trocas de ar natural causados pelo efeito chaminé. O efeito chaminé fará com que o ar exterior se mova dentro e fora da cavidade. C_d é um coeficiente de descarga arbitrário que depende da geometria da abertura. C_d deve estar no intervalo de 0,1 a 1,0. Aumentar C_d aumentará a quantidade de ventilação natural. Se o fluxo de ar através da abertura for unidirecional um coeficiente de descarga de $CD = 0,65$ deve então ser usado (ASHRAE, cap.16-pag.13. 2009).

3. METODOLOGIA

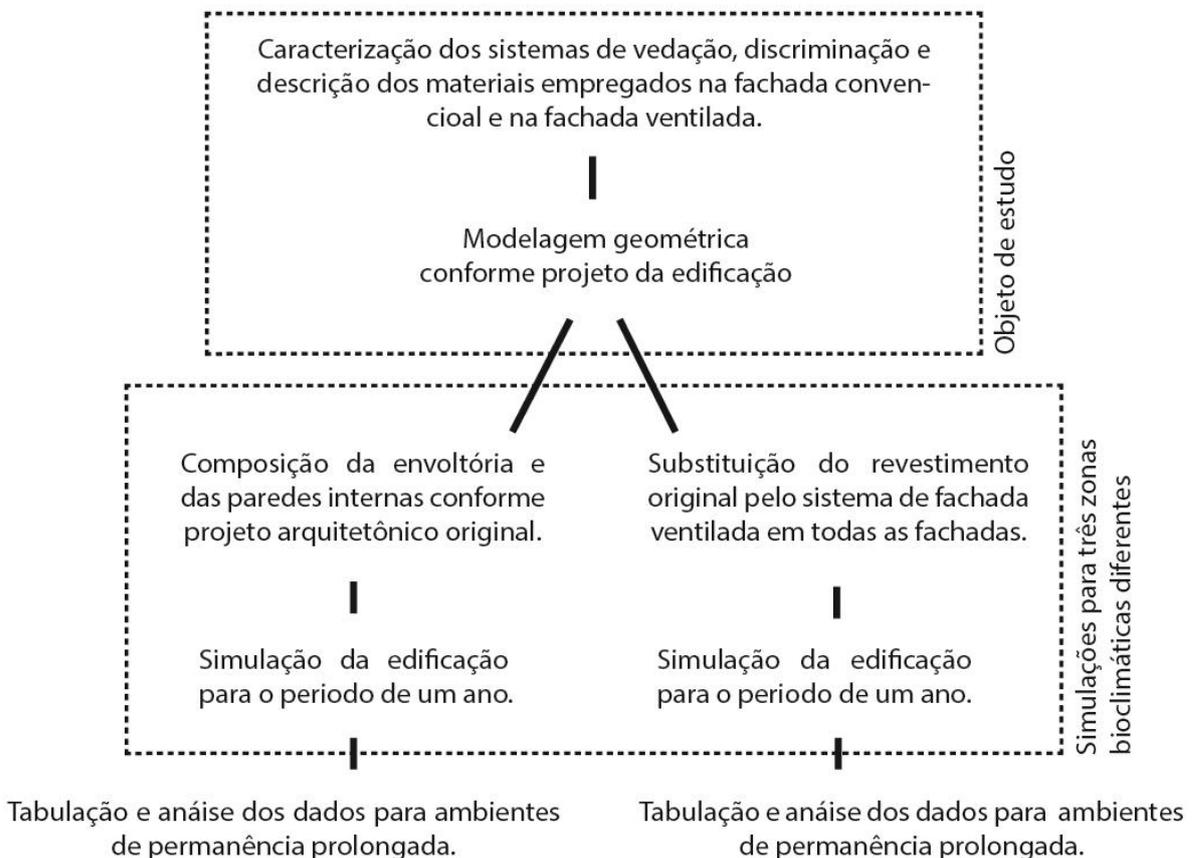
A metodologia abordada nesse estudo funda-se em três etapas complementares entre si, a primeira etapa é com foco no estudo e criação de um modelo energético, especificação de materiais e padrões de uso para os ambientes de permanência prolongada. Na segunda etapa, será feito simulações computacionais para quantificar o consumo energético da edificação em três Zonas Bioclimáticas (ZB) diferentes. Com essas duas etapas concluídas, na última etapa, procederão as fases de análises e comparações, que terão como objetivo avaliar o consumo energético e o desempenho dos dois sistemas de fachada para cada zona analisada.

As três etapas serão detalhadas nos itens:

- Objeto de estudo;
- Simulações computacionais;
- Análise comparativa.

A primeira e segunda etapa será orientada de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 14.

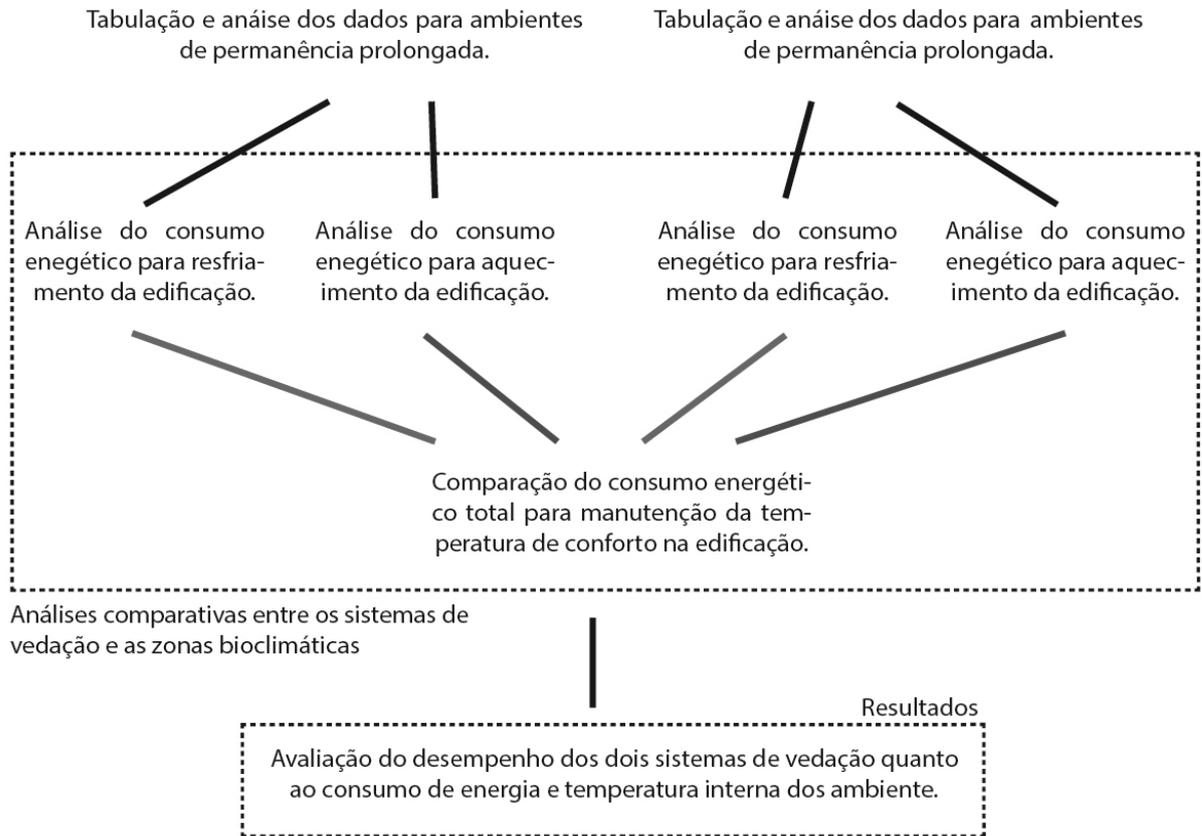
Figura 14: Metodologia de trabalho - 1ª parte.



Fonte: Autor.

A terceira etapa será direcionada conforme a Figura 15.

Figura 15: Metodologia de trabalho - 2ª parte.

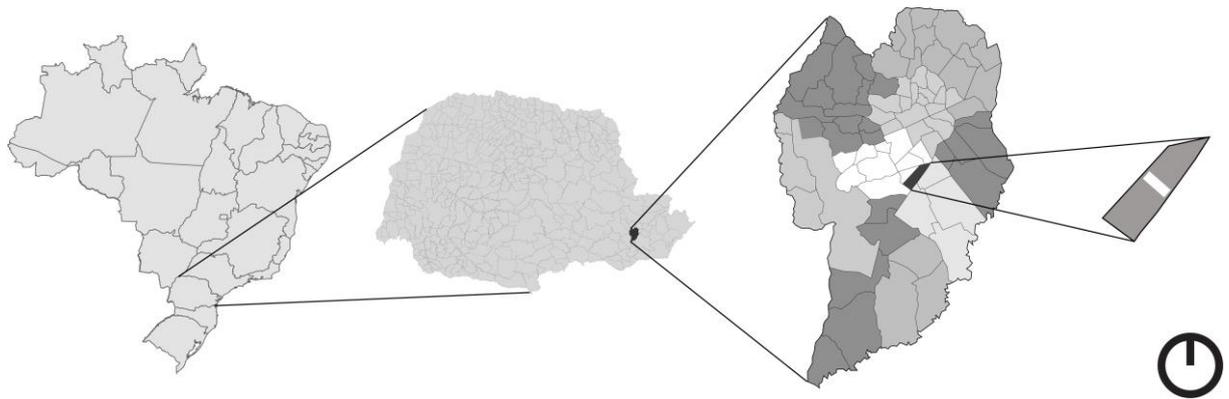


Fonte: Autor.

3.1. Objeto de estudo

O objeto de estudo deste trabalho é um projeto arquitetônico desenvolvido pelo autor. A edificação em estudo é um edifício residencial multifamiliar, localizado ao sul da cidade de Curitiba no bairro Fanny, o eixo longitudinal da edificação possui um desvio azimutal de 45°, em relação ao eixo norte-sul. São quatro pavimentos tipo, cada um com dois apartamentos, dispostos de forma simétrica em relação ao eixo transversal. Os apartamentos possuem dois quartos, dois banheiros, salas de estar e jantar integradas, cozinha integrada com as salas, lavanderia e sacada. A Figura 16 situa o objeto de estudo no mapa.

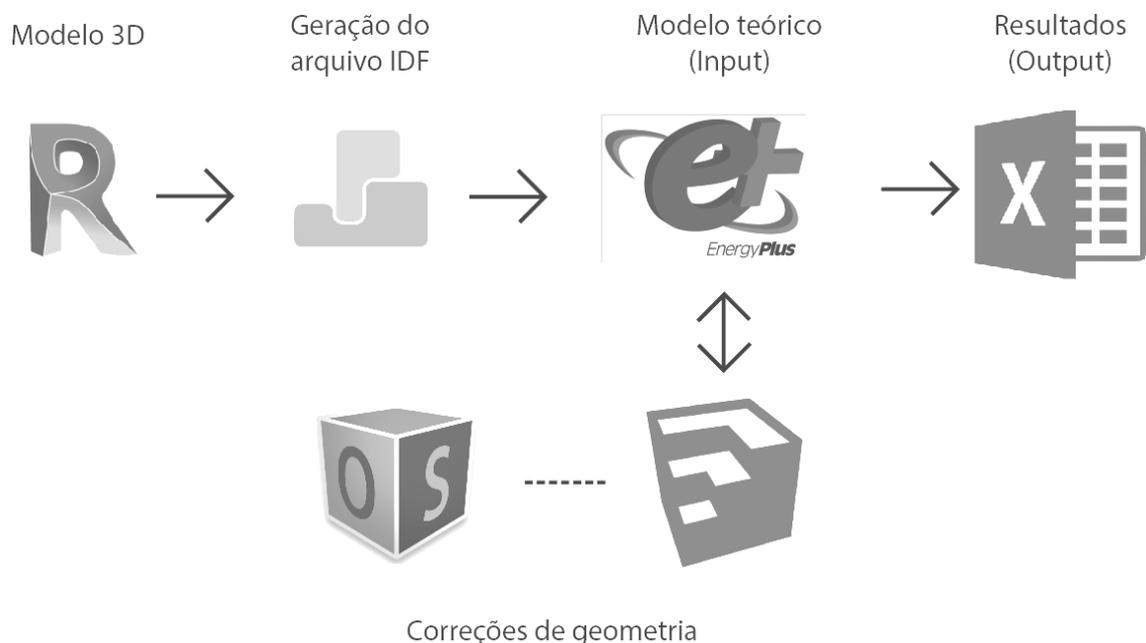
Figura 16: Localização do terreno do edifício em estudo.



Fonte: Autor.

O projeto foi desenvolvido inicialmente no software *Revit*, a partir deste software, para a produção do modelo teórico para simulação, foi exportado para o software *DesignBuilder* para geração do arquivo *.idf*, extensão usada pelo software *EnergyPlus*. O software *SketchUp* em conjunto com o plugin *OpenStudio* foram usados para correções na geometria da edificação, o fluxo de trabalho pode ser visualizado na Figura 17.

Figura 17: Softwares utilizados na criação do modelo teórico.



Fonte: Autor.

Com esse processo inicial foi obtido o modelo geométrico para a complementação dos dados dentro do *EnergyPlus* e assim finalizar modelo teórico. A Figura 18 é uma perspectiva foto realística do projeto em estudo. Algumas características são relevantes para a análise dos

resultados de simulação. A edificação possui 11,20 metros de altura, 6,70 metros de largura e 21,85 de comprimento. Na fachada esquerda da edificação a empena cria elementos de sombreamento nas portas que dão acesso à varanda. As salas, cozinha e área de serviço não possuem divisórias, esse ambiente integrado possui paredes para três fachadas, duas opostas, situadas à esquerda e direita da edificação e uma adjacente à parede fachada esquerda da edificação. A cobertura do último apartamento é composta por uma laje impermeabilizada revestida de cerâmica e possui um elemento arquitetônico que gera sombreamento sobre parte da cobertura. Não foram considerados elementos de sombreamentos no entorno da edificação.

Figura 18: Perspectiva da edificação em estudo.



Fonte: Autor.

Após a adequação da geometria para o programa de simulação, conforme ilustrado na Figura 19 e 20, foram inseridos os dados de entrada para caracterizar todos os aspectos físicos e padrões de uso por parte dos habitantes da edificação no *EnergyPlus*.

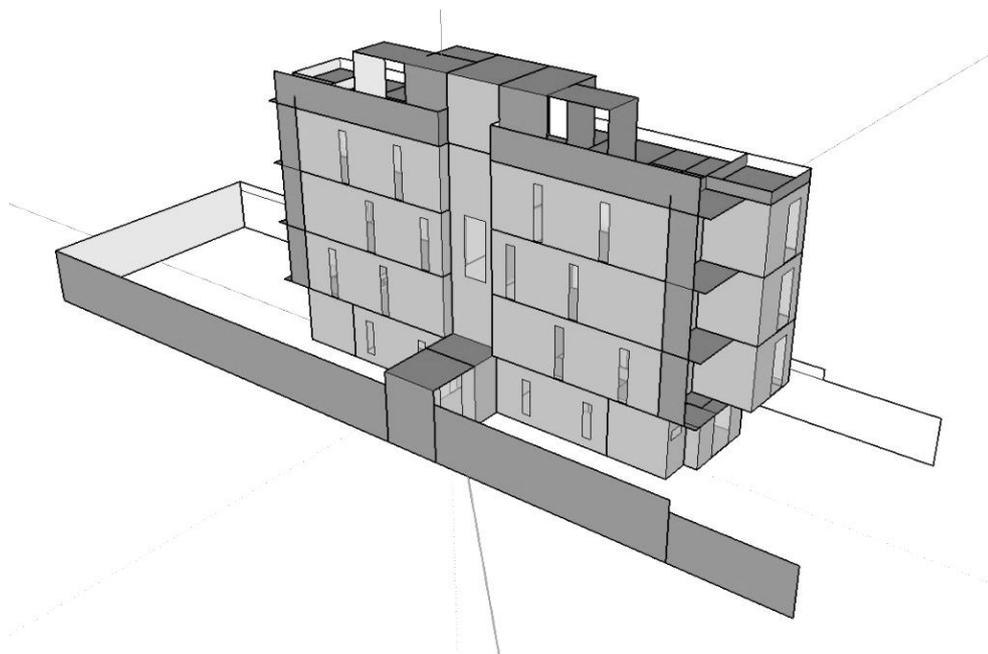
Conforme explica MELO et al, (2009):

“O EnergyPlus é um programa computacional, criado a partir dos programas BLAST e DOE-2 e distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, desenvolvido para simulação de carga térmica e análise energética de edificações e seus sistemas. O programa possui capacidade de simulação diferenciada, tais como “time-step” de cálculo menor que uma hora, sistema modular, possibilidade de cálculo de infiltração de ar diferenciada para cada zona térmica, cálculo de índices de conforto térmico e integração com outros sistemas (fotovoltaico, aquecimento solar, etc...)”

(MELO et al, 2009, pag. 3)

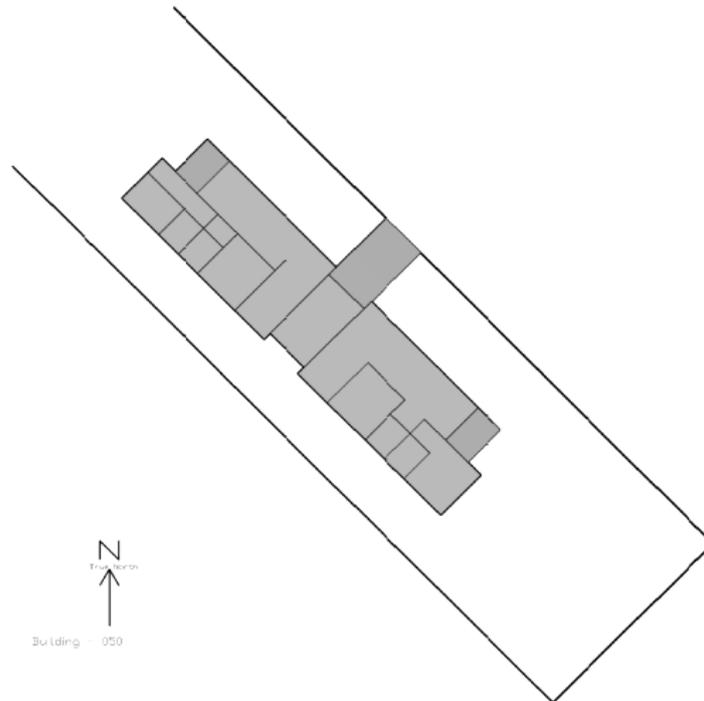
MELO et al (2009) complementa que o programa apresenta características tais como, “técnica de solução baseada no balanço de energia para as cargas térmicas prediais, que permite o cálculo simultâneo dos efeitos radiante e convectivo na superfície interior e exterior, durante cada intervalo de tempo”, e ainda, “condução de calor transiente através dos elementos do prédio como paredes, tetos, pisos, etc, usando funções de transferência; modelo de conforto térmico, baseado na atividade, temperatura de bulbo seco interna, umidade.” Deste modo, as características deste software são essenciais para este estudo.

Figura 19: Modelo geométrico para simulação.



Fonte: Autor.

Figura 20: Implantação da edificação.



Fonte: Autor.

Quanto à parte construtiva, especificamente a envoltória, o projeto original prevê alvenaria de tijolo cerâmico de seis furos, comumente chamada de alvenaria convencional, e pintura externa clara, já o sistema de paredes ventiladas a ser proposto adotará as mesmas camadas da alvenaria convencional, acrescido de uma camada de lâ-de-rocha na face externa seguida da câmara de ar ventilada e de uma placa cerâmica na cor clara.

O Quadro 3 a seguir, detalha os materiais das camadas usadas para compor os dois sistemas de fachada.

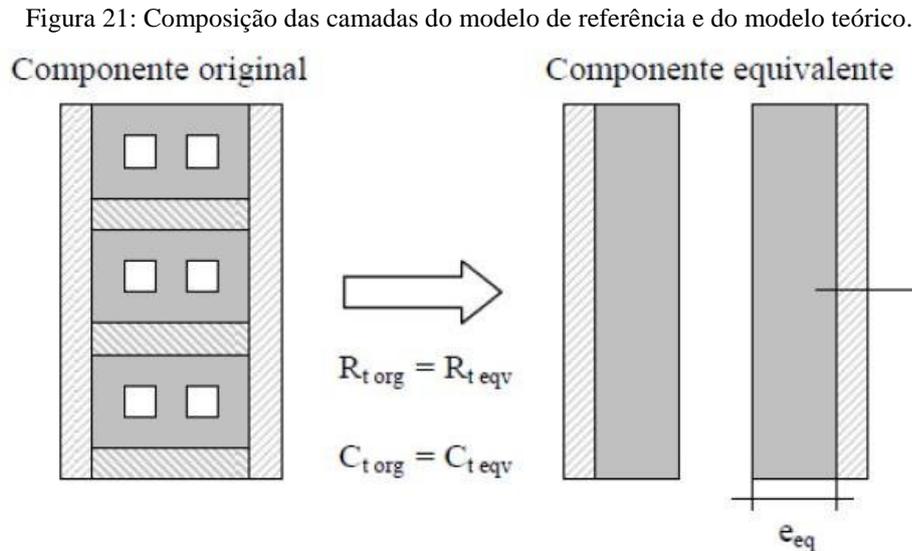
Quadro 3: Dados de entrada dos materiais.

Material	Condutividade e {W/m-K}	Calor específico {J/kg-K}	Densidade {kg/m ³ }	Absorção solar (α)	Espessura (metros)
Lã-de-rocha	0,03	754	100	0,7	0,050
Argamassa	1,25	1000	2000	0,5	0,025
Tijolo cerâmico	0,90	920	1600	0,7	0,0134
Câmara de ar (Tijolo)	0,175	-	-	-	-

Fonte: Autor.

As características dos materiais basearam-se em valores fornecidos por Frota e Schiffer (2014) e WEBER et al (2017). A determinação da condutividade térmica do tijolo

cerâmico de seis furos foi determinada através de um modelo de camadas equivalentes que simula as características geométricas do tijolo de forma equivalente, conforme proposto Weber et al, (2017), a Figura 21 exemplifica, de forma esquemática, a composição do tijolo cerâmico de referência e o seu modelo equivalente.



Fonte: WEBER et al. 2017.

Deste modo, considerado o modelo de equivalência de WEBER et al (2017), para o sistema de vedação convencional (Alvenaria de tijolo cerâmico) as camadas foram agrupadas conforme o Quadro 4.

Quadro 4: Composição da fachada convencional.

Argamassa	Camada externa
Tijolo cerâmico	Camada 3
Câmara de ar (Tijolo)	Camada 4
Tijolo cerâmico	Camada 5
Argamassa	Camada interna

Fonte: Autor.

De igual maneira, para o sistema de vedação ventilado, as camadas foram agrupadas de acordo com o Quadro 5.

Quadro 5: Composição da fachada ventilada.

Placa cerâmica (1x1m)	Camada externa
Câmara de ar ventilada	Camada 2
Lã-de-rocha	Camada 3
Argamassa	Camada 4

Tijolo cerâmico	Camada 5
Câmara de ar (Tijolo)	Camada 6
Tijolo cerâmico	Camada 7
Argamassa	Camada interna

Fonte: Autor.

O software *EnergyPlus* define, para as paredes escolhidas pelo usuário, a condição de parede ventilada, deste modo na configuração da camada externa e da câmara de ar é necessário definir em outro campo específico como será essa condição.

Os valores definidos para a condição da câmara ventilada estão descritos no Quadro 6.

Quadro 6: Dados de entrada para a condição de fachada ventilada.

Fração da área de aberturas	0,1
Emissividade térmica do material do defletor exterior	0,9
Absorção solar do defletor exterior	0,3
Escala de altura para a ventilação	0,5
Espessura efetiva da cavidade atrás do defletor exterior	0,1
Razão da área de superfície real para área de superfície projetada	0,9
Rugosidade da superfície exterior	Rugosidade média
Eficácia das aberturas em relação ao vento	0,6
Coefficiente de descarga para aberturas	0,65

Fonte: Autor.

Os padrões de uso dos habitantes da edificação e os dados de entrada no software foram modelados conforme o INMETRO, o regulamento prevê que seja especificado os padrões de uso para os quartos e salas, ou seja, os ambientes de permanência prolongada. Os períodos de ocupação dos ambientes, de acionamento dos equipamentos e manuseio de abertura foram definidos conforme INMETRO (2012):

- Período de ocupação dos ambientes;
- Período em que é acionada a iluminação artificial;
- Período em que são acionados os equipamentos elétricos;
- Período em que a abertura e fechamento das janelas são acionados;
- Período em que o condicionamento do ar é acionado.

Os algoritmos que definem as condicionantes de acionamento foram definidos conforme apresentado por CB3E (2018), estes algoritmos permitem a integração entre o acionamento do ar-condicionado com a abertura e fechamento da janela, sem que ocorra o conflito entre as duas estratégias de resfriamento do ambiente:

- Condicionante de acionamento do ar condicionado;
 - Se a temperatura do ambiente estiver fora do intervalo de 16°C e 26 °C;

- Se o ambiente estiver ocupado;
- Condicionante de acionamento da ventilação natural através das janelas;
 - Se a temperatura do ambiente estiver dentro do intervalo de 16°C e 26°C;
 - Se a temperatura do ambiente for acima da temperatura externa, considerando que a temperatura externa é acima de 19°C.

A Figura 22 é um exemplo do algoritmo elaborado conforme demonstrado por CB3E (2018) para um ambiente do edifício, ao todo são quarenta ambientes que atuam isoladamente, portanto, é necessário que seja feita uma sequência de linhas de códigos para cada ambiente.

Figura 22: Campo onde se define um algoritmo para o funcionamento alternado do ar-cond. e ventilação natural.

Field	Units	Obj1
Name		33
Program Line 1		SET Temp_Conf = ((Temp_Quarto33 >= 26) (Temp_Quarto33 <= 16))
Program Line 2		IF (Ocup_Quarto33 > 0) && (Temp_Conf == 1)
A4		Set Controle_HVAC_Qt = 1
A5		Set Controle_VN_Qt = 0
A6		Set Controle_Cortina_Qt = 1
A7		ELSEIF ((Ocup_Quarto33 > 0) && (Sensor_HVAC_Qt > 0))
A8		Set Controle_HVAC_Qt = 1
A9		Set Controle_VN_Qt = 0
A10		Set Controle_Cortina_Qt = 1
A11		ELSEIF ((Ocup_Sala21 > 0) (Ocup_Quarto33 > 0))
A12		Set Controle_HVAC_Qt = 0
A13		IF ((Temp_Ext < Temp_Ar_Qt33) && (Temp_Ext > 19))
A14		Set Controle_VN_Qt = 1
A15		Set Controle_Cortina_Qt = 0
A16		ELSEIF ((Temp_Ext > Temp_Ar_Qt33) && (Temp_Ext > 19))
A17		Set Controle_VN_Qt = 0
A18		Set Controle_Cortina_Qt = 1
A19		ELSEIF (Temp_Ext < 19)
A20		Set Controle_VN_Qt = 0
A21		Set Controle_Cortina_Qt = 1
A22		ENDIF
A23		ELSEIF (Ocup_Quarto33 == 0) && (Ocup_Sala21 == 0)
A24		Set Controle_HVAC_Qt = 0
A25		Set Controle_VN_Qt = 0
A26		Set Controle_Veneziana_Qt = 1
A27		ENDIF

Fonte: Autor.

3.2. Simulações computacionais

O modelo teórico foi submetido à simulação em três ZB's distintas a fim de obter variações significativas no comportamento térmico da edificação. A partir disso, além da cidade de Curitiba, pertencente à ZB1, foi feita simulações para a cidade de Belém, capital do estado do Pará, pertencente à ZB8 e para a Cidade europeia de Berlin capital da Alemanha.

Tendo em vista que a nomenclatura de Zonas Bioclimática conforme a ABNT (2014) diz respeito apenas às cidades brasileiras, nesse estudo será adotado, respectivamente, a nomenclatura de Zona Bioclimática A (ZBa), Zona Bioclimática B (ZBb), Zona Bioclimática C (ZBc) para as cidades escolhidas. Portanto, as simulações agrupam-se em dois conjuntos:

- Simulação do edifício conforme projeto original:
 - Zona bioclimática A;
 - Zona bioclimática B;
 - Zona bioclimática C;

- Simulação do edifício com fachada ventilada:
 - Zona bioclimática A;
 - Zona bioclimática B;
 - Zona bioclimática C;

Deste modo, a nomenclatura das ZB's relacionada com as cidades e suas latitudes está apresentado no Quadro 7.

Quadro 7: Locais onde foi rodado simulações.

Zonas	País	Cidade	Latitude
ZBa	Brasil	Curitiba	25° 25' 40" S
ZBb	Alemanha	Berlim	52°31'27" N
ZBc	Brasil	Belém	01° 27' 21" S

Fonte: Autor.

Preliminarmente, para as simulações da cidade de Curitiba, foram usados três arquivos climáticos diferentes disponibilizados via internet no site do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina e da empresa Roriz Engenharia Bioclimática. Adotou-se o arquivo que apresentou médias anuais semelhantes aos registrados pelo Sistema Meteorológico Do Paraná (SIMEPAR, 2013).

As alterações em todas as simulações se estenderam unicamente no âmbito do clima e localização geográfica. O Quadro 8 apresenta as médias mensais calculadas por simulação para cada ZB.

Quadro 8: Média de temperatura por Zona Bioclimática.

Zonas	Arquivos climáticos	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Ano
ZBa	CuritibaTRY1969_05CV ¹	20.64	20.75	19.56	16.35	14.59	13.11	12.51	13.63	15.35	14.18	17.99	17.77	16.37
ZBb	DEU_Berlin.103840_IWEC ²	1.88	0.28	5.42	8.32	14.01	17.58	19.09	18.47	14.98	10.23	4.43	2.43	9.76
ZBc	PA_Belem ³	26.51	26.98	27.36	26.62	27.19	27.09	27.18	27.39	27.74	27.51	27.48	26.84	27.16

¹ Fonte: Labee, 2018.

² Fonte: EnergyPlus, 2018.

³ Fonte: RORIZ, 2018.

A média de temperatura anual entre as três cidades apresenta uma diferença significativa, entre a ZBb e ZBa é próximo à -7°C, já a diferença entre ZBa e ZbBc é acima de 10°C.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

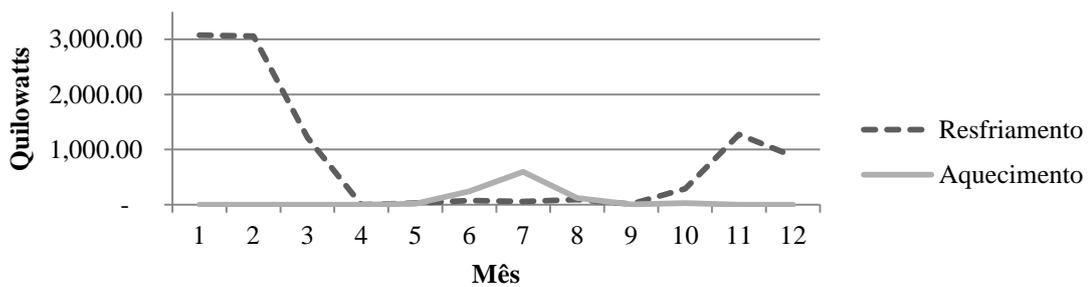
As análises buscaram esclarecer qual o comportamento das duas soluções de fachada para a edificação nas três condições bioclimáticas através de resultados que demonstram a energia consumida para o aquecimento e resfriamento dos ambientes.

Os Gráficos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 representam a média de consumo por mês dos dois sistemas de vedação em quilowatts para cada ZB estudada, o consumo apresentado corresponde a toda edificação.

Para a ZBa:

- Fachada de alvenaria convencional

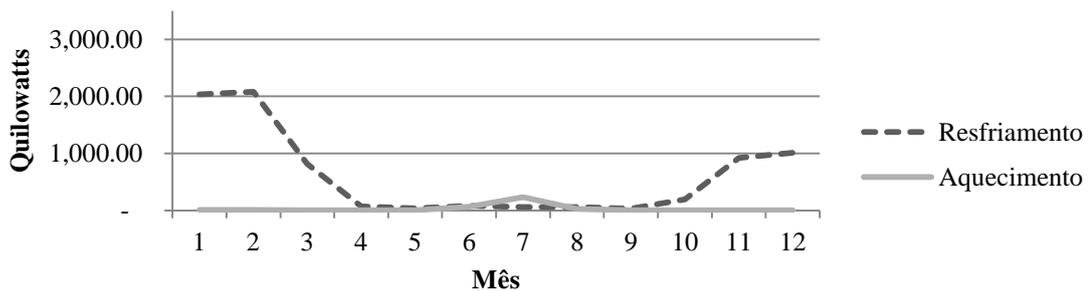
Gráfico 1: Consumo energético para fachada de alvenaria convencional.



Fonte: Autor.

- Fachada ventilada

Gráfico 2: Consumo energético para fachada ventilada.

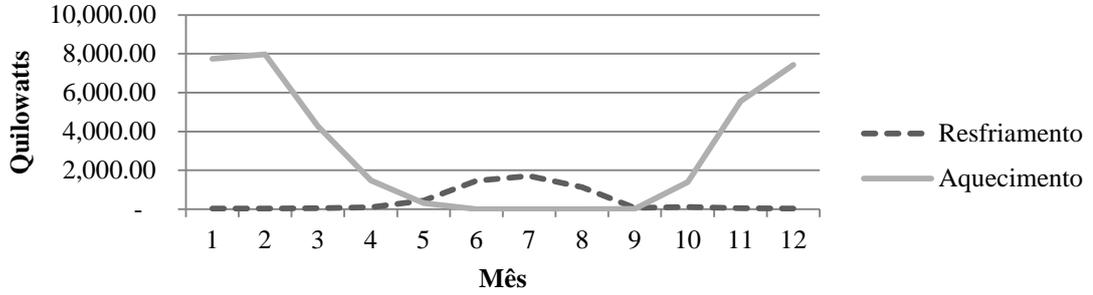


Fonte: Autor.

Para a ZBb

- Fachada de alvenaria convencional

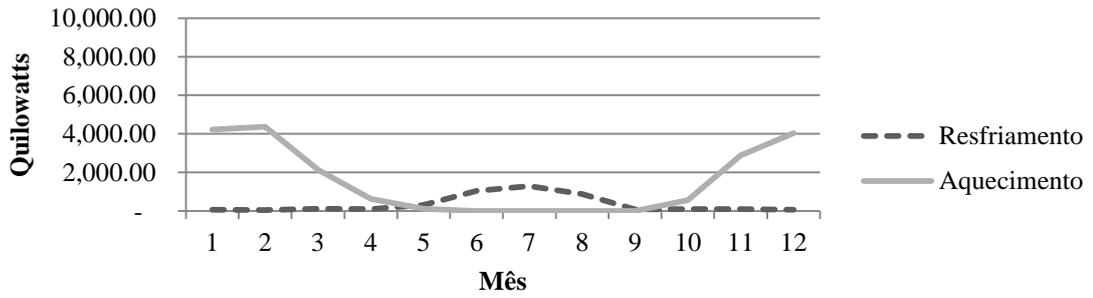
Gráfico 3: Consumo energético para fachada de alvenaria convencional.



Fonte: Autor.

- Fachada ventilada

Gráfico 4: Consumo energético para fachada ventilada.

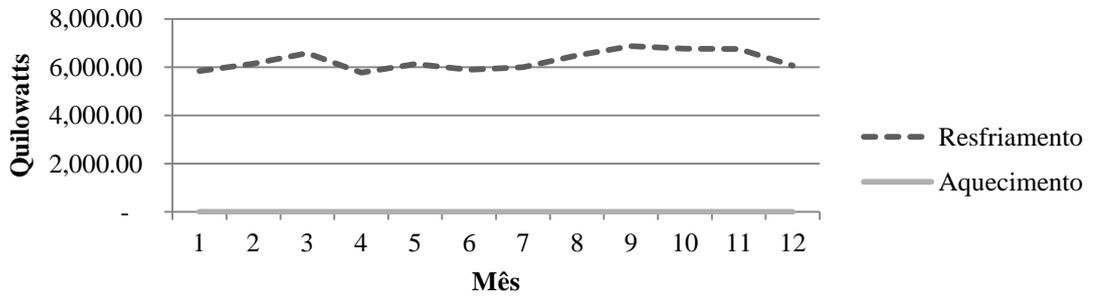


Fonte: Autor.

Para a ZBc:

- Fachada de alvenaria convencional

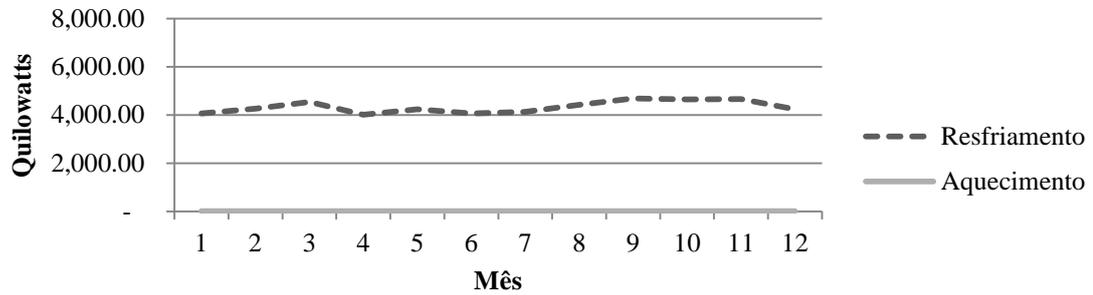
Gráfico 5: Consumo energético para fachada de alvenaria convencional.



Fonte: Autor.

- Fachada ventilada

Gráfico 6: Consumo energético para fachada ventilada.



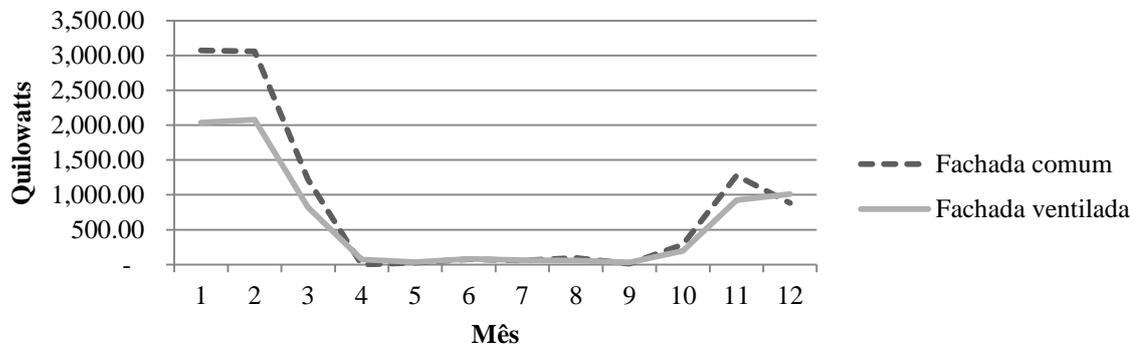
Fonte: Autor.

Os resultados em primeira análise demonstram significativas reduções no consumo de energia elétrica para a edificação tanto em situações de resfriamento quanto no aquecimento dos ambientes. Os Gráficos 7, 8, 9, 10, 11 e 12 reforçam a redução no consumo de energia quando comparado isoladamente o consumo para aquecimento e para resfriamento:

Para resfriamento:

- ZBa

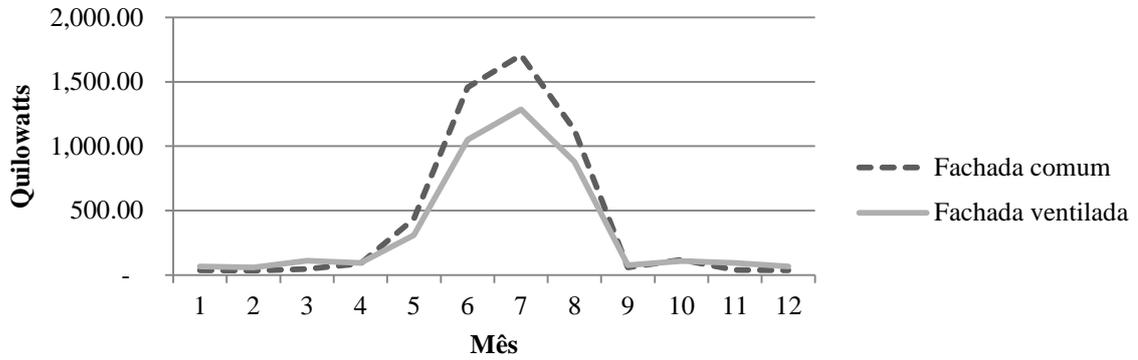
Gráfico 7: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada



Fonte: Autor.

▪ ZBb

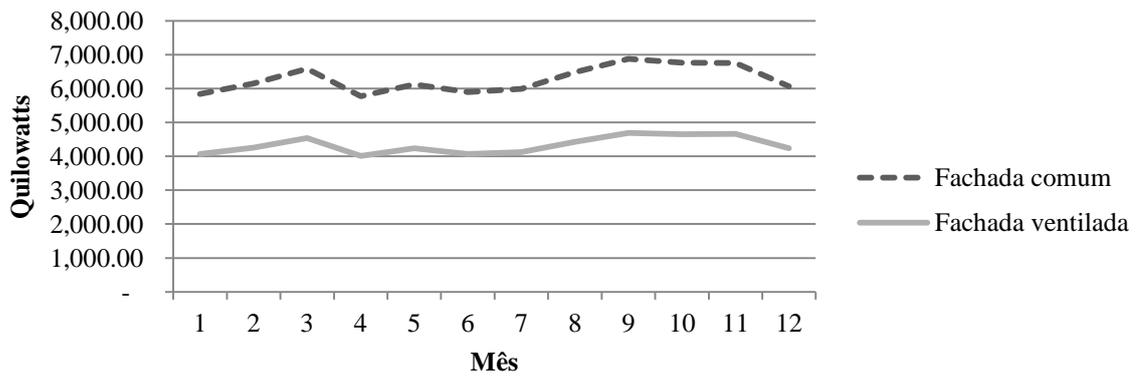
Gráfico 8: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada



Fonte: Autor.

▪ ZBc

Gráfico 9: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada

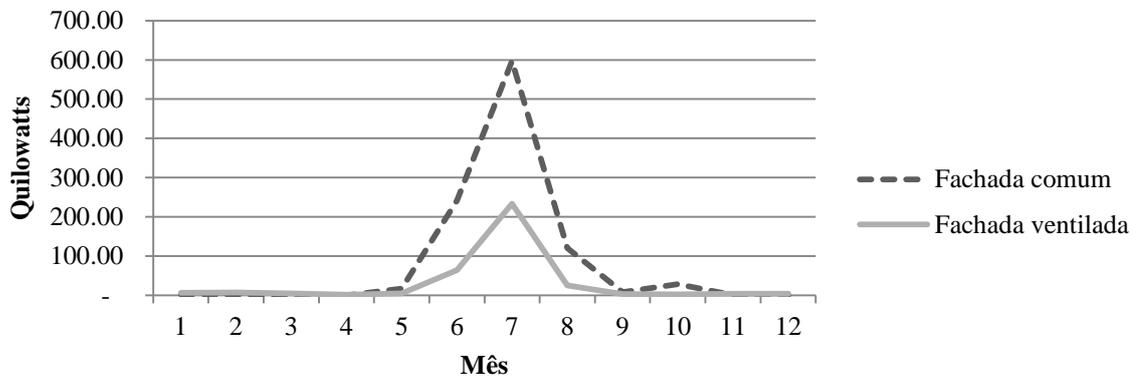


Fonte: Autor.

Para aquecimento:

▪ ZBa

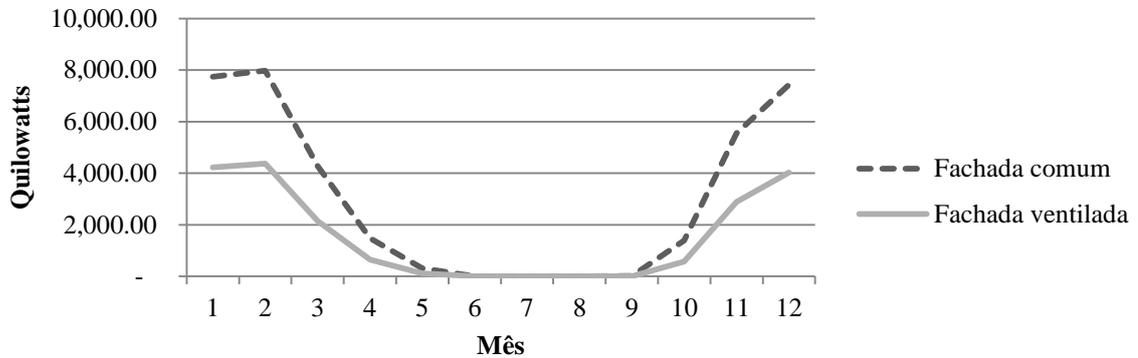
Gráfico 10: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada



Fonte: Autor.

▪ ZBb

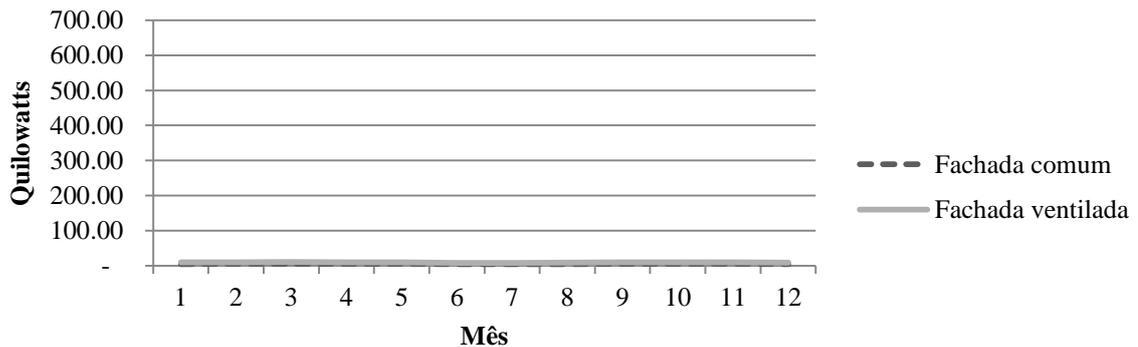
Gráfico 11: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada



Fonte: Autor.

▪ ZBc

Gráfico 12: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada



Fonte: Autor.

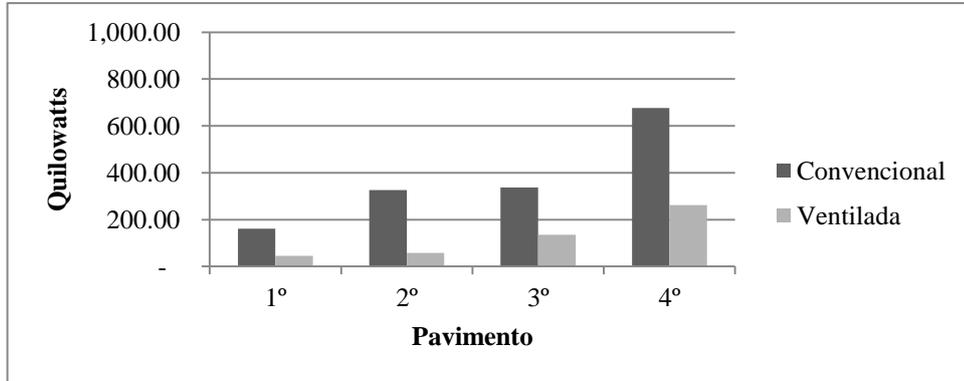
Em todas as situações, exceto na última, a fachada ventilada demonstrou desempenho favorável quanto ao consumo de energia. Na ZBc a fachada ventilada não se mostrou mais eficiente em relação à fachada comum pois o consumo de energia foi desprezível, com valores médios de 0,5 W/mês por ambiente de permanência prolongada.

Nos Gráficos 13, 14, 15, 16, 17 e 18 estão apresentadas as comparações de consumo entre os dois sistemas de fachada para aquecimento e resfriamento para cada ZB, de forma mais detalhada, os dados estão apresentados separados por pavimento:

Para aquecimento:

- ZBa

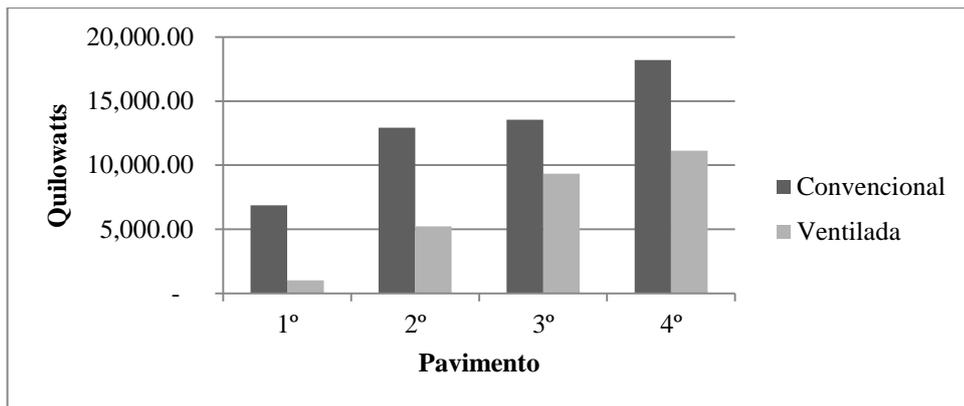
Gráfico 13: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada por pavimento.



Fonte: Autor.

- ZBb

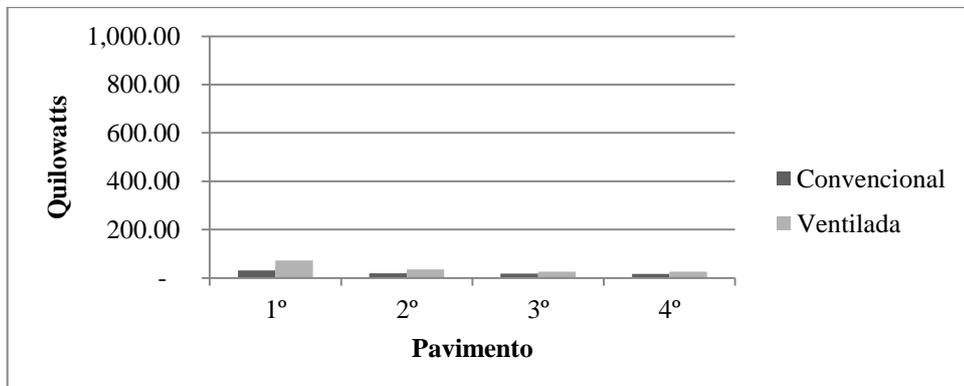
Gráfico 14: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada por pavimento.



Fonte: Autor.

- ZBc

Gráfico 15: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada por pavimento.

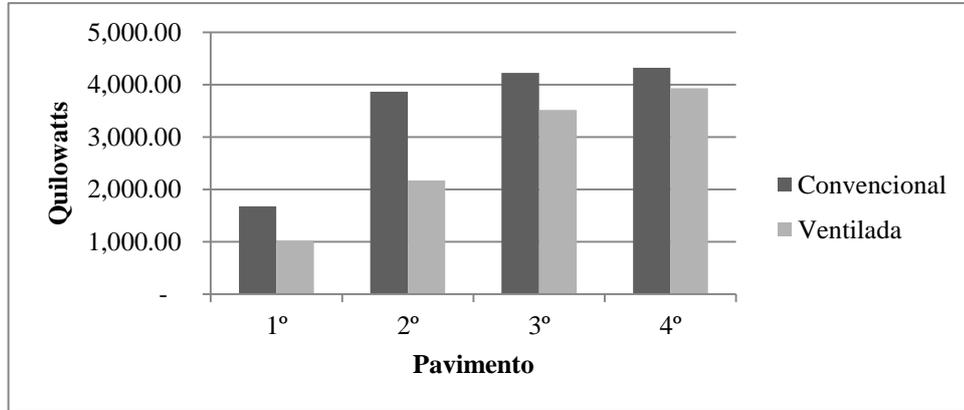


Fonte: Autor.

Para resfriamento:

- ZBa

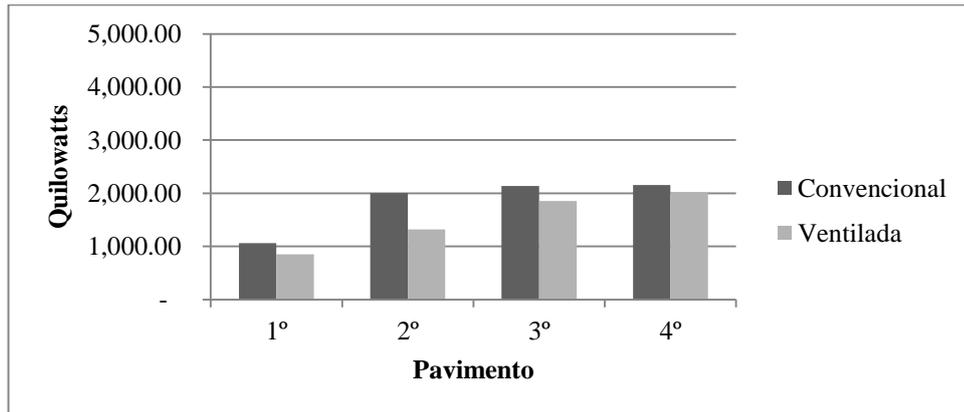
Gráfico 16: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada por pavimento.



Fonte: Autor.

- ZBb

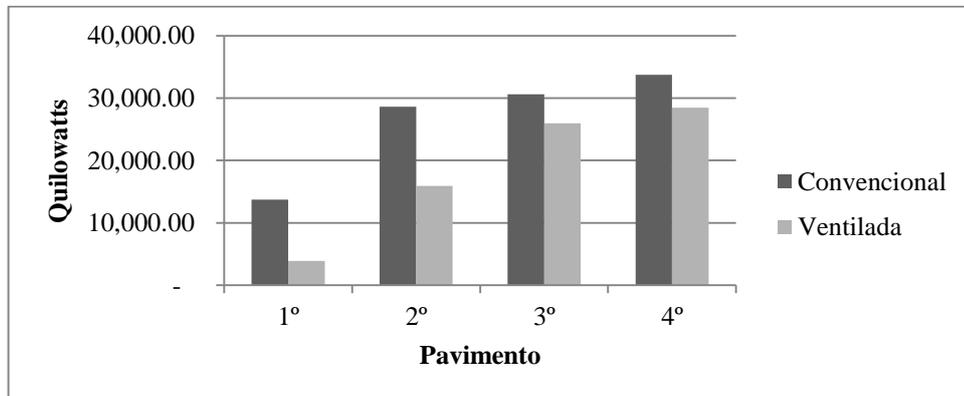
Gráfico 17: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada por pavimento.



Fonte: Autor.

- ZBc

Gráfico 18: Comparação de consumo energético entre sistemas de fachada por pavimento.



Fonte: Autor.

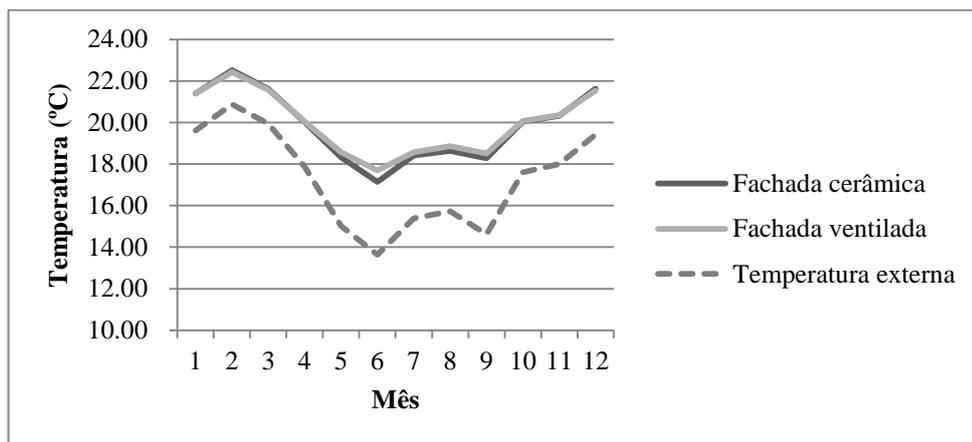
Os gráficos acima, de forma geral, demonstram consumo maior conforme mais elevado o pavimento, pode-se atribuir o baixo consumo no primeiro pavimento em consequência do contato com o solo, visto que sua amplitude térmica é menor que a do último pavimento em que a cobertura está em contato direto com o meio externo. Outro aspecto importante é a diferença entre consumo para resfriamento e aquecimento, a fachada ventilada apresentou maior eficiência nos períodos de calor.

Adicionalmente ao estudo do consumo energético relacionando a ventilação natural e o ar-condicionado foi feito simulações utilizando apenas parâmetros para ventilação natural com o objetivo de obter a diferença de temperatura nos ambientes dos dois diferentes sistemas de fachada e simulações considerando a não ventilação natural.

Assim, os Gráficos 19, 20 e 21 representam as simulações com ventilação natural:

Para ZBa:

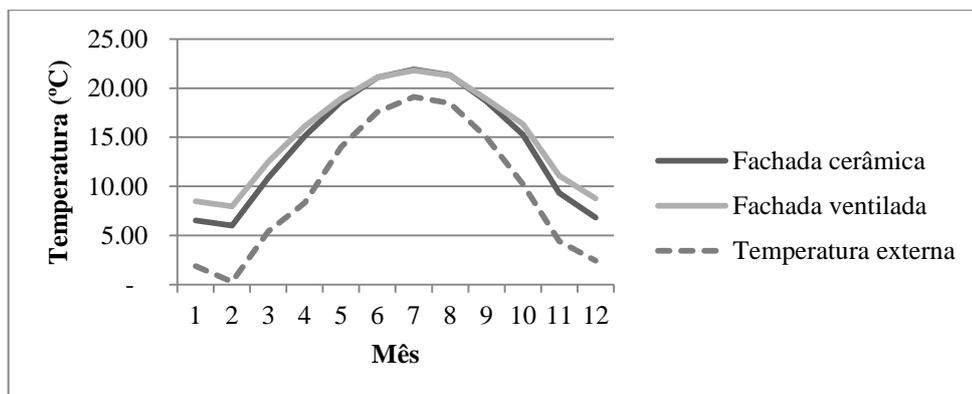
Gráfico 19: Comparação de temperatura entre fachada convencional e ventilada.



Fonte: Autor.

Para ZBb:

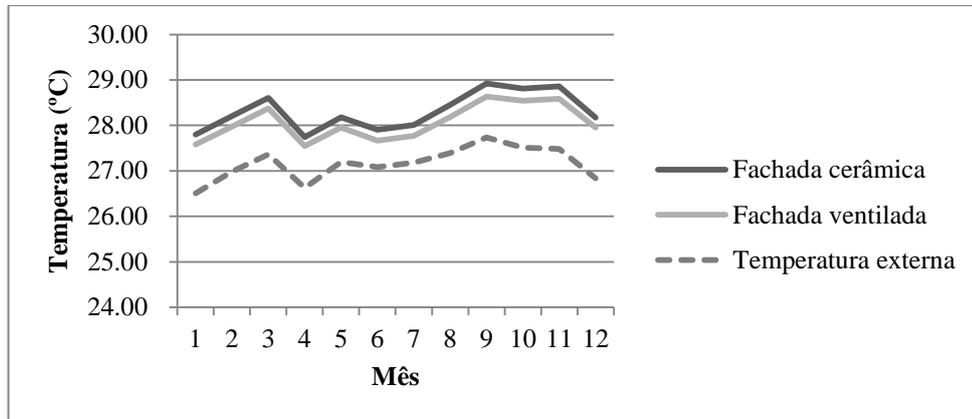
Gráfico 20: Comparação de temperatura entre fachada convencional e ventilada.



Fonte: Autor.

Para ZBc:

Gráfico 21: Comparação de temperatura entre fachada convencional e ventilada.



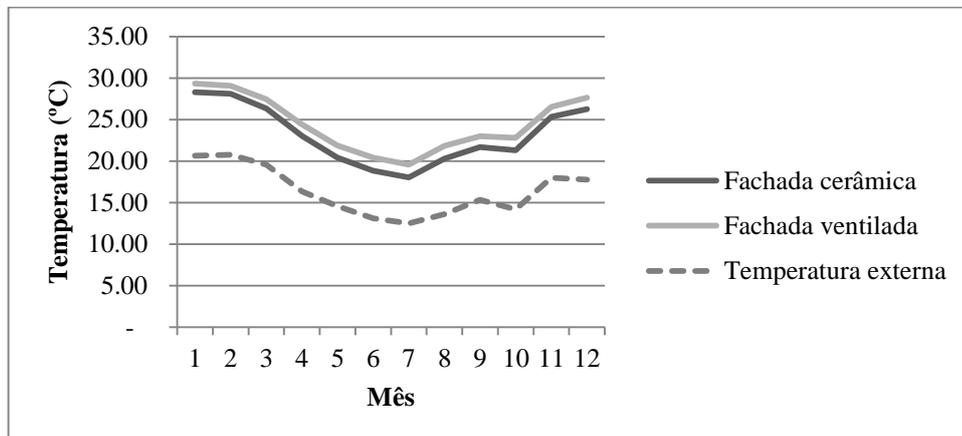
Fonte: Autor.

Os resultados demonstram que o sistema de fachada ventilada tende a manter temperatura de maior conforto nos ambientes ao longo do ano, mantendo mais aquecidos nos meses de menores temperaturas e temperaturas mais baixas nos meses mais quentes.

Os Gráficos 22, 23 e 24 apresentam as simulações sem ventilação natural:

Para ZBa:

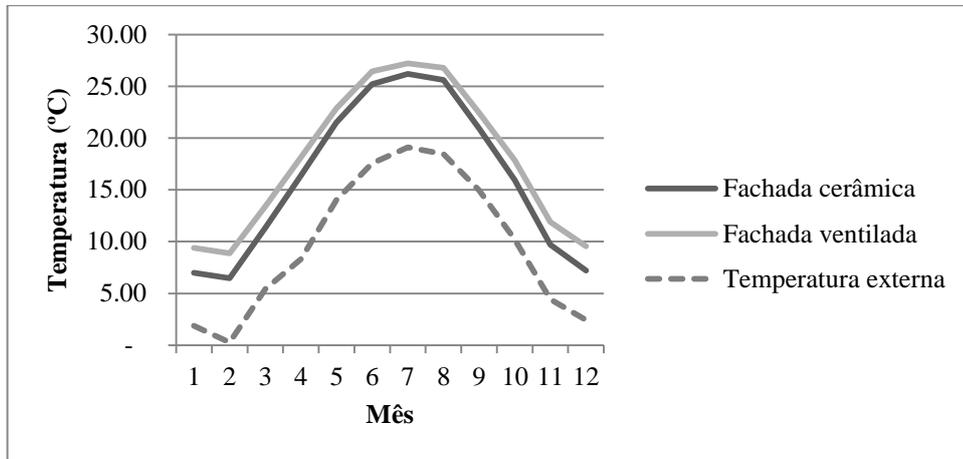
Gráfico 22: Comparação de temperatura entre fachada convencional e ventilada.



Fonte: Autor.

Para ZBb:

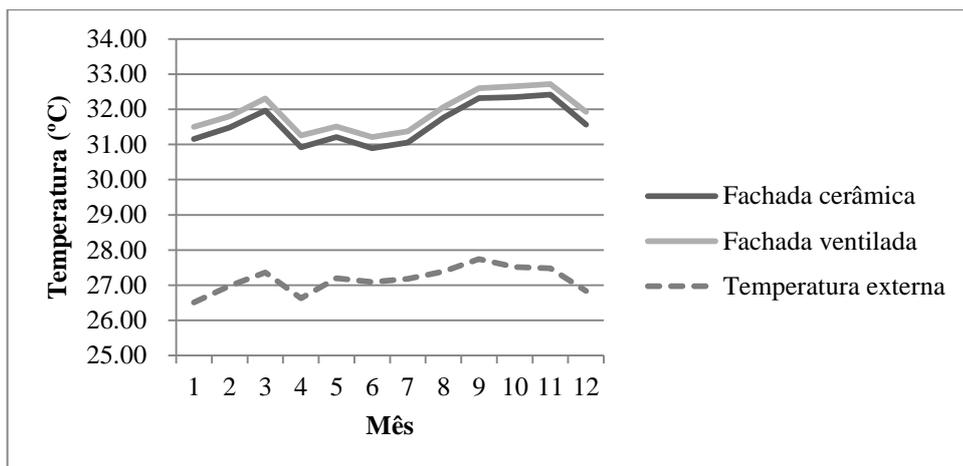
Gráfico 23: Comparação de temperatura entre fachada convencional e ventilada.



Fonte: Autor.

Para ZBb:

Gráfico 24: Comparação de temperatura entre fachada convencional e ventilada.



Fonte: Autor.

Para a situação sem ventilação natural e sem condicionamento de ar as temperaturas internas para o sistema de fachada ventilada mostraram valores superiores aos da fachada convencional. Essa situação ocorre pela criação da condição de estufa no interior da edificação associado ao isolamento térmico adicional do sistema de fachada ventilada, ou seja, os raios ultravioletas do sol atravessam as janelas, aquecem o interior que passa a emitir raio infravermelho e este por sua vez fica aprisionado no interior do ambiente em decorrência da alta resistência térmica.

5. CONCLUSÕES

Este estudo buscou elucidar que outras soluções para o sistema de vedação de edifícios residenciais é viável, que melhorar as técnicas construtivas no Brasil visando o conforto térmico trás benefícios múltiplos ao usuário, além do conforto obtido pela solução técnica, existe o retorno ao longo prazo na redução do consumo de energia. Tanto para climas mais rigorosos quanto para climas amenos no Brasil, a fachada ventilada proporcionou redução no consumo de energia elétrica de aproximadamente 33%. Além da redução do consumo elétrico em situações de condicionamento de ar, o sistema mostrou-se eficaz ao apresentar temperaturas mais amenas quando comparada os dois sistemas de fachada considerando apenas a ventilação natural no interior dos ambientes. Apenas para a situação de não condicionamento de ar e não ventilação natural a fachada ventilada apresentou temperaturas acima das simuladas para fachada convencional, contudo, essa situação pode ser descartada dado a incoerência de um ocupante manter-se em um ambiente fechado mesmo em desconforto.

A análise do consumo de energia para o conforto térmico considerando o padrão de uso residencial conforme o RTQ-R requer análises minuciosas, em um intervalo horário, que confronte a ocupação do ambiente com a temperatura interna, visto que, em determinados horários a temperatura do ambiente pode estar acima ou abaixo da temperatura de conforto e não possuir ocupante no ambiente, conseqüentemente, sem gerar consumo energético, essa análise é importante, pois, para Curitiba, por exemplo, no período da manhã no mês de junho, é frequente temperaturas abaixo de 16°C, contudo, não haverá consumo de energia elétrica na residência pelo motivo do ambiente estar desocupado, já no período do início da noite para o mesmo mês é frequente temperaturas próximas ao de conforto, dispensando o uso de ar-condicionado para aquecimento.

A forma arquitetônica do edifício estudado trás em si aspectos importantes para os cálculos da simulação: As salas integradas com a cozinha possuem três fachadas para diferentes orientações, sendo duas fachadas opostas e um perpendicular a elas, esse aspecto favorece a ventilação cruzada, contudo, os efeitos causados pelo ambiente externo são maiores, pois, este ambiente é muito sensível à variação do tempo, dado a extensa área de parede. Outro aspecto importante é o volume dos ambientes, por se tratar de uma edificação de baixo custo, os ambientes possuem pequenas áreas e alturas, o que reforça a sensibilidade com o meio externo.

As incertezas com o arquivo climático aliado com os efeitos globais de mudança climática é relevante para o entendimento de que as simulações desse estudo, antes de refletir a realidade atual de clima, possui caráter demonstrativo, no sentido de elucidar as diferenças entre os sistemas analisados.

Para obter resultados que possam refletir melhor as condições da cidade de Curitiba, para estudos futuros, é necessária a revisão dos dados climáticos bem como de alguns coeficientes. Especificamente para o sistema de fachada ventilada, a determinação do coeficiente de descarga é indispensável para resultados mais precisos nas simulações futuras.

REFERÊNCIAS

- ALTOÉ, Leandra et al. **Políticas públicas de incentivo à eficiência energética**. Estudos Avançados, v. 31, n. 89, p. 285-297, 2017.
- ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações**. Parte 1, 2, 3 e 4. Rio de Janeiro, 2014.
- ALUPROF. **Façade Systems, Extra Bond – Ventilated Façade System**. 2018. Disponível em: <<https://www.aluprof.eu/extrabond-3>>. Acessado em 11 de julho de 2018.
- ASHRAE - American Society Of Heating, Refrigerating And Air-Conditioning Engineers. **Fundamentals Handbook. American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineers**. Atlanta, GA. 2019.
- BERARDI, Umberto. **Clarifying the new interpretations of the concept of sustainable building**. Sustainable Cities and Society, v. 8, p. 72-78, 2013.
- BOMBARDO, Fabiele; NOGUEIRA, Carlos Eduardo. **Estudos sobre a energia elétrica, eficiência energética e a sustentabilidade na construção civil**. Revista Thêma et Scientia, vol. 4, n. 2, p. 120-126, 2014.
- CB3E - Centro Brasileiro De Eficiência Energética Em Edificações. **Manual do uso do objeto Energy Management System do programa EnergyPlus**. Florianópolis, 2018. Disponível em: <<http://cb3e.ufsc.br/etiquetagem/dessenvolvimento/atividades-2012-2016/trabalho-1/pesquisas>>. Acessado em 25 de abril de 2018.
- DOE - Department Of Energy's. 2017. **EnergyPlus Engineering Reference**. U.S. Department of Energy. Disponível em : <<http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>>. Acessado em 11 de julho de 2018.
- ENERGYPLUS. **Weather Data - Curitiba-Afonso Pen 838400 (SWERA)**. 2018. Disponível em: <<https://energyplus.net/downloads>>. Acessado em 09 de fevereiro de 2018.
- EPE - Empresa De Pesquisa Energética, 2015. **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 5 anos (2016-2020)**. Rio de Janeiro: EPE, 2012. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/default.aspx>>. Acessado em 15 de agosto de 2017.
- ELETROBRÁS. **Avaliação do mercado de eficiência energia no Brasil: pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso – ano base 2005 – classe residencial**. Disponível em: <www.procelinfo.com.br>. Acessado em 20 de agosto de 2017.
- FROTA, Anésia Barros; SCHIFFER, Sueli Ramos. B. **Manual do Conforto Térmico**. 8 ed. São Paulo: Estúdio Nobel. 243p. 2014.
- INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética Edificações Residenciais – RTQ-r**. Anexo da Portaria INMETRO nº 018/2012. Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/RTQR.pdf>>. Acessado em 16 de abril de 2018.
- INNOWOOD. **Façade, Allface Ventilated Façade Visible Fixing – Rivets**. 2018. Disponível em: <<http://innowood.com/visible-fixing/>>. Acessado em 11 de julho de 2018.

LABEEE. **Arquivos Climáticos**. 2018. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads>>. Acessado em 09 de fevereiro de 2018.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O.R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014.

MELO, Ana Paula; WESTPHAL, Fernando Simon.; MATOS, Michele. **Apostila do Curso Básico do Programa EnergyPlus**. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil. Florianópolis, 2009.

MIZGIER, Martin Ordenes; PENSO, Emerson Antônio. **Desempenho térmico de fachadas ventiladas como proposta de retrofit em edifícios comerciais na cidade de São Paulo**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, XVI., 2016, São Paulo. Anais ANTAC, 2016. Pag. 1385-1399.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Eficiência Energética**. 2011.

MONZONI, Mario; VENDRAMINI, Annelise (coord.). **Edificações sustentáveis e eficiência energética**. São Paulo: Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas, 2017.

RORIZ. **EPW: BASE DE DADOS CLIMÁTICOS**. 2018. Disponível em: <http://www.roriz.eng.br/epw_9.html>. 2018. Acessado em 09 de fevereiro de 2018

SANTOS, Carlos A. Pina; MATIAS, Luís. **Coefficiente de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios**. 2 ed. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2006.

SIMEPAR - SISTEMA METEOROLÓGICO DO PARANÁ. **Temperaturas Diárias Registradas – Mínimas e Máximas – Ano de 2013**. Disponível em: <<http://www.simepar.br>>. Acessado em 25 de março de 2018.

WEBER, Fernando da Silva; MELO, Ana Paula; MARINOSKI, Deivis; LAMBERTS, Roberto. **Elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil. Florianópolis, 2017.