



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

FRANCISCO WILLAME DE MORAIS FILHO

**DESEMPENHO TÉRMICO DE FACHADAS VENTILADAS FRENTE AO CLIMA
EQUATORIAL ÚMIDO DA AMAZÔNIA**

BELÉM-PA
2019

FRANCISCO WILLAME DE MORAIS FILHO

**DESEMPENHO TÉRMICO DE FACHADAS VENTILADAS FRENTE AO CLIMA
EQUATORIAL ÚMIDO DA AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do **Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Pará**, na linha Patrimônio, Restauro e Tecnologia como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.
Área de Concentração: Análise e concepção do espaço construído na Amazônia.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Santos Barata.

BELÉM-PA
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

D278d de Morais Filho, Francisco Willame
DESEMPENHO TÉRMICO DE FACHADAS
VENTILADAS FRENTE AO CLIMA EQUATORIAL ÚMIDO
DA AMAZÔNIA / Francisco Willame de Morais Filho. — 2019.
122 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Márcio Santos Barata
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo, Instituto de Tecnologia,
Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

1. : Fachada ventilada. 2. Desempenho térmico. 3.
Clima amazônico. 4. Efeito chaminé. . 5. Amazônia. I.
Título.

CDD 720

FRANCISCO WILLAME DE MORAIS FILHO

**DESEMPENHO TÉRMICO DE FACHADAS VENTILADAS FRENTE AO CLIMA
EQUATORIAL ÚMIDO DA AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do **Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Pará**, na linha Patrimônio, Restauro e Tecnologia como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.
Área de Concentração: Análise e concepção do espaço construído na Amazônia.

DATA DA AVALIAÇÃO: _____/_____/_____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Márcio Santos Barata (Orientador)
(Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – UFPA)

Prof. Dr. Gustavo da Silva Vieira de Melo (Membro Interno)
(Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – UFPA)

Prof. Dra. Elcione Maria Lobato de Moraes (Membro Externo)
(Membro Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UFPA)

BELÉM-PA
2019

Aos meus pais e amigos, todos que
contribuíram nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais que me apoiaram durante toda minha trajetória, abdicando às vezes dos próprios sonhos para que os meus fossem realizados.

Ao meu orientador professor Marcio Barata pela orientação e por ser um verdadeiro mestre e parceiro durante o desenvolvimento desse trabalho.

À Kessyle Medeiros, pessoa ímpar que foi fundamental para a realização desse trabalho, sempre muito solícita e com um sorriso no rosto.

À Simone Silva que esteve comigo me apoiando e incentivando e, apesar de todas as dificuldades, conseguimos vencer juntos a nossa distância física.

A todos os meus amigos que estiveram acompanhando de perto essa trajetória.

Ao Grupo de estudos de desenvolvimento de alternativas energéticas (GEDAE), na figura da professora Heliana Ceballos que cedeu gentilmente os equipamentos necessários para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Instituto Federal do Pará que me concedeu a oportunidade de me aperfeiçoar na minha área de atuação.

Obrigado a todos!

RESUMO

O setor da Construção Civil no Brasil é responsável por 43% do consumo de energia elétrica, sendo essa voltada principalmente para fins de iluminação e condicionamento artificial de ar. Entretanto, o Brasil vem enfrentando uma grave crise energética em decorrência da falta de chuvas e o baixo o nível dos reservatórios das hidroelétricas nos anos de 2014 e 2015. Diante desse contexto, a procura por soluções arquitetônicas que concebam um espaço construído energeticamente eficiente e climaticamente adequado é prioritária para o enfrentamento da crise energética no Brasil. O envelope dos edifícios (fachadas, telhados, paredes, janelas) desempenha um papel importante na eficiência energética. Os elementos exteriores do edifício, dentre os quais as fachadas, atuam como barreiras entre o exterior e o ambiente interno e contribuem para redução da energia. O sistema de fachadas ventiladas é uma tecnologia muito utilizada em climas quentes como do sul da Europa com o intuito de amenizar a carga térmica com refrigeração. Todavia, muito pouco empregada no Brasil, que justamente possui uma ampla extensão de território com climas tropical, quente e úmido. Além disto, é um sistema construtivo industrializado, de alta produtividade e praticamente isento de problemas de destacamento de placas cerâmicas, bastante adequado a norma vigente brasileira de desempenho de habitações. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho desta tecnologia frente à realidade climática local com vistas a identificar as vantagens em relação ao sistema de cerâmica aderida que é amplamente utilizado em Belém. O trabalho avaliou comparativamente o desempenho térmico dos sistemas de fachada aderida (tradicional) e ventilada (junta aberta e fechada), tanto para a ventilação natural (Graus Hora - G_{hr}) quanto para o condicionamento artificial (consumo de refrigeração - CR), investigando conjuntamente outros parâmetros de projeto como a cor dos revestimentos e o sombreamento das esquadrias. Os resultados mostraram que independentemente do tipo de sistema de fachada (aderida ou ventilada), as estratégias de sombreamento das esquadrias e a escolha de revestimentos de baixa absorvância (cor clara) representam uma parcela expressiva na redução do desconforto e da carga térmica. Estas duas variáveis reduziram em 75% o desconforto térmico e em 13% o consumo de energia para refrigeração. A contribuição da substituição da fachada aderida por ventilada de juntas abertas representou 5% na redução tanto de

GH_R quanto de CR. Estes indicadores vêm reforçar a necessidade da busca de estratégias de sombreamento das esquadrias para a região amazônica, bem como a escolha de revestimentos externos de menor absorção térmica, pois a má escolha dessas variáveis podem implicar em um maior consumo energético para resfriamento. O emprego das fachadas ventiladas também é uma estratégia projetual importante para Belém e regiões de mesmo clima, embora sua contribuição na redução dos ganhos de calor e no consumo energético sejam percentualmente bem menores que as de sombreamento e cor clara da envoltória, sua maior relevância está associada aos aspectos construtivos e da vida útil da edificação.

Palavras-chave: Fachada ventilada. Desempenho térmico. Clima amazônico. Efeito chaminé. Amazônia.

ABSTRACT

The Civil Construction sector in Brazil is responsible for 43% of electricity consumption, which is mainly focused on lighting and artificial air conditioning. However, Brazil has been facing a serious energy crisis due to the lack of rainfall and the low level of hydroelectric reservoirs in 2014 and 2015. Given this context, the search for architectural solutions that design an energy-efficient and climate-appropriate built space is a priority for facing the energy crisis in Brazil. The envelope of buildings (facades, roofs, walls, windows) plays an important role in energy efficiency. The exterior elements of the building, including the façades, act as barriers between the exterior and the interior environment and contribute to energy reduction. The ventilated façade system is a technology widely used in hot climates like southern Europe in order to soften the thermal load with cooling. However, very little used in Brazil, which precisely has a wide range of territory with tropical, hot and humid climates. In addition, it is an industrialized building system, of high productivity and practically free of ceramic tile detachment problems, quite adequate to the current Brazilian housing performance standard. The objective of this work was to evaluate the performance of this technology in relation to the local climate reality in order to identify the advantages over the bonded ceramic system that is widely used in Belém. The work comparatively evaluated the thermal performance of the adhered (traditional) and ventilated (open and closed joint) façade systems for both natural ventilation (Degrees per Hour - G_{HR}) and artificial conditioning (cooling consumption - CR), jointly investigating other design parameters such as the color of the coatings and the shading of the frames. The results showed that regardless of the type of façade system (adhered or ventilated), the strategies of shading of the frames and the choice of low absorbency coatings (light color) represent a significant portion in reducing discomfort and thermal load. These two variables reduced thermal discomfort by 75% and cooling energy consumption by 13%. The contribution of the replacement of the adhered façade with open joints ventilated represented 5% in the reduction of both G_{HR} and CR. These indicators reinforce the need to seek strategies for shading the frames for the Amazon region, as well as the choice of lower thermal absorbance external coatings, because the poor choice of these variables may lead to higher energy consumption for cooling. The use of ventilated facades is also an important design strategy for Belém and regions of the same climate, although its

contribution to the reduction of heat gains and energy consumption is much smaller than those of shading and light color of the envelope, its greater relevance is associated with the building aspects and the useful life of the building.

Keywords: Ventilated facade. Thermal performance. Amazon climate. Chimney effect. Amazon.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –Componentes de um sistema de fachada ventilada.....	20
Figura 2 –Fachada ventilada com revestimento em pedra natural.....	22
Figura 3 –Edificações com fachada em pedra natura: Ardósia e Granito.....	23
Figura 4 - Fachada ventilada com cerâmica extrudida.....	23
Figura 5 –Montagem do sistema de fachada ventilada com cerâmica extrudida....	24
Figura 6 –Fachada ventilada em alumínio.....	24
Figura 7 –Instalação de uma fachada ventilada em ACM.....	25
Figura 8 –Fachada ventilada em madeira maciça.....	26
Figura 9 –Sistema de fixação visível e oculto.....	26
Figura 10 –Esquema do sistema de fixação por cavilhas.....	27
Figura 11 –Fixação do revestimento por grampos.....	27
Figura 12 –Ancoragem linear.....	28
Figura 13 –Lã de vidro e lã de rocha.....	30
Figura 14 –Esquema dos sistemas de juntas abertas.....	31
Figura 15 –Esquema do sistema de juntas abertas (1) e juntas fechadas (2).....	32
Figura 16 –Sistema de fixação de fachadas ventiladas ULMA.....	34
Figura 17 –Detalhe da entrada e saída de ar do sistema de fachadas ventiladas Ulma.....	34
Figura 18 –Detalhe do sistema <i>rail</i> de ancoragem das placas cerâmicas.....	35
Figura 19 –Detalhe do sistema <i>clamp</i> de ancoragem das placas cerâmicas.....	35
Figura 20 –Inserte metálico.....	36
Figura 21 –Obra de retrofit desenvolvida pela empresa.....	36
Figura 22 –Fachada ventilada com revestimento em granito do <i>Boulevard Shopping</i>	37

Figura 23 –Fachada ventilada com revestimento de placa metálica <i>Shopping</i> Metrópole.....	38
Figura 24 –Obra da justiça federal do Pará.....	38
Figura 25 –Transmissão de calor na fachada ventilada.....	40
Figura 26 –Comparativo da transferência de calor de diferentes larguras (7 cm; 15 cm; 25 cm e 35 cm) de câmara de ar em uma fachada ventilada e uma fachada sem ventilação.....	42
Figura 27 –Edifício na Itália, onde foram realizadas as medições e simulações para validação do modelo proposto por Griffith.....	43
Figura 28 –Fluxograma para projetar fachadas ventiladas.....	45
Figura 29 –Comparativo do consumo energético para fachada sem ventilação.....	48
Figura 30 –Comparativo do consumo energético para diferentes larguras da câmara de ar.....	49
Figura 31 –Zoneamento bioclimático brasileiro.....	53
Figura 32 –Temperaturas médias observadas para o ano de 2018.....	61
Figura 33 –Carta solar da cidade de Belém.....	61
Figura 34 –Frequencia de ocorrencia de ventos.....	62
Figura 35 –Velocidade predominante dos ventos por direção.....	63
Figura 36 –Diagrama Umidade e incidência dos ventos.....	63
Figura 37 – Foto da edificação e do entorno.....	65
Figura 38 –Planta baixa pavimento tipo.....	66
Figura 39 –Planta baixa unidade habitacional estudada.....	66
Figura 40 –Ambiente monitorado.....	67
Figura 41 –Aparelho <i>datalogger</i>	67
Figura 42 –Monitoramento do ambiente interno da edificação.....	68
Figura 43 –Monitoramento externo da edificação.....	68

Figura 44 –Representação esquemática dos tipos de envoltórias estudadas.....	73
Figura 45 –Geometria do modelo utilizado nas simulações.....	75
Figura 46 –Balanço térmico do intervalo de ar na envoltória.....	76
Figura 47 – Indicadores de GHR para a situação S3.....	86
Figura 48 – Esquema do comportamento térmico dos sistemas de fachadas para o revestimento na cor clara.....	
Figura 49 – Evolução da temperatura interna para os três sistemas na situação S3.....	90
Figura 50 –Indicadores de GHR para a simulação S7.....	92
Figura 51– Esquema do comportamento térmico dos sistemas de fachadas para o revestimento na cor escura.....	93
Figura 52 – Evolução da temperatura interna para os três sistemas na situação S7.....	95
Figura 53 –Indicadores de GHR para situação S1.....	96
Figura 54 –Evolução da temperatura interna para os três sistemas na situação S1.....	99
Figura 55 –Indicadores de GHR para situação S5.....	100
Figura 56 –Evolução da temperatura interna para os três sistemas na situação S5.....	102
Figura 57 –Evolução da temperatura interna para os três sistemas na situação S2.....	105
Figura 58 –Evolução da temperatura interna para os três sistemas na situação S4.....	106
Figura 59 –Evolução da temperatura interna para os três sistemas na situação S6.....	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipos de revestimento e tipos de fixação empregada.....	29
Quadro 2 – Vantagens e desvantagens do sistema de fachada ventilada.....	33
Quadro 3 – Simulações para condição de ventilação natural.....	78
Quadro 4 – Simulações para condição de condicionamento artificial.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –Lista das cidades selecionadas para simulação e suas características.....	47
Tabela 2 – Características dos ambientes do pavimento tipo.....	64
Tabela 3 - Valores de desvio médio, erro quadrático e amplitude térmica.....	71
Tabela 4 - Dados termofísicos dos materiais.....	71
Tabela 5 - Composição das camadas construtivas principais.....	77
Tabela 6 - Padrão de ocupação para dias de semana e final de semana.....	80
Tabela 7 - Cargas internas de equipamentos.....	81
Tabela 8 - Densidade de potência instalada de iluminação.....	81
Tabela 9 - Densidade de potência instalada de iluminação.....	82
Tabela 10 - Cargas internas de equipamentos.....	83
Tabela 11 - Resultados em Graus-Hora de Resfriamento para cada simulação.....	85
Tabela 12 - Percentuais de ganhos e perdas de calor (GHR) das FVs em relação a FAd.....	103
Tabela 13 – Resultados do consumo de energia anual (kWh/ano).....	108
Tabela 14 - Percentuais de Consumo de energia Anual das FV em relação a FAd.....	108
Tabela 15 – Resultados do consumo relativo de refrigeração (Kwh/m ² .ano).....	109

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
FAd	Fachada Aderida
FV	Fachada Ventilada
FVJA	Fachada Ventilada De Junta Aberta
FVJF	Fachada Ventilada De Junta Fechada
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
NBR	Norma Brasileira de Regulamentação
UFPA	Universidade Federal do Pará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	15
1.2	JUSTIFICATIVA.....	16
1.3	OBJETIVOS.....	19
1.3.1	Objetivo geral.....	19
1.3.2	Objetivos específicos.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE FACHADAS VENTILADAS.....	20
2.1.1	Componentes das fachadas ventiladas.....	21
2.1.1.1	Revestimentos exteriores.....	21
2.1.1.2	Sistema de fixação.....	26
2.1.1.3	Isolamento térmico.....	30
2.1.1.4	Juntas abertas e fechadas.....	31
2.1.1.5	Vantagens e desvantagens do sistema de fachada ventilada.....	32
2.1.2	Fornecedores de fachadas ventiladas no Brasil.....	34
2.1.3	Sistema de fachada ventilada em Belém.....	37
2.1.4	As características térmicas e os princípios térmicos da fachada ventilada.....	39
2.1.5	Estudos sobre fachadas ventiladas no Brasil.....	45
2.2	NORMATIVAS DE DESEMPENHO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	51
2.2.1	Críticas às normas.....	54
2.3	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	56
2.3.1	EnergyPlus.....	57
3	METODOLOGIA.....	60
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA DA CIDADE DE BELÉM-PA.....	60

3.2	EDIFICAÇÃO OBJETO DE ESTUDO.....	63
3.3	CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	67
3.4	SIMULAÇÃO.....	72
3.4.1	Considerações gerais.....	72
3.4.2	Configuração dos sistemas de fachadas no EnergyPlus.....	75
3.4.3	Parâmetros de simulação – condição natural ventilada.....	77
3.4.3.1	Modelagem da edificação.....	79
3.4.3.2	Atividade e ocupação.....	79
3.4.3.3	Padrão de iluminação.....	81
3.4.3.4	Cargas internas de equipamentos.....	83
3.4.3.5	Temperatura do solo.....	83
3.4.3.6	Regime de ventilação.....	83
3.4.3.7	Parâmetros de simulação – condição artificialmente refrigerada (Cr) (kWh/m ²).....	84
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	85
4.1	VENTILAÇÃO NATURAL.....	85
4.1.1	Simulação S3: Ventilação noturna/cor clara/com sombreamento.....	86
4.1.2	Simulação S7: ventilação noturna/cor escura/com sombreamento.....	91
4.1.3	Simulação S1: ventilação noturna/cor clara/sem sombreamento.....	96
4.1.4	Simulação S5: ventilação noturna/cor escura/ sem sombreamento.....	100
4.2	SIMULAÇÕES REFERENTES AO REGIME DE VENTILAÇÃO DIURNA (S2, S4, S6, S8): COR CLARA E ESCURA, COM E SEM SOMBREAMENTO)..	103
4.3	CONSUMO DE ENERGIA ANUAL PARA RESFRIAMENTO.....	108
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	112
	REFERÊNCIAS.....	114

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

A economia de energia em edificações é um requisito essencial nos dias atuais, considerando a necessidade de um mundo mais sustentável e um melhor equilíbrio natural. Neste contexto, as edificações contemporâneas procuram melhorar suas relações com o meio ambiente, em busca de uma maior economia de energia e recursos naturais (BRAGA *et al*, 2013).

A construção civil tornou-se um setor responsável por um alto consumo energético e de geração de poluentes. No Brasil, as edificações (residenciais, comerciais e públicas) são responsáveis por 43% do consumo de energia elétrica (EPE, 2018). Sendo que essa energia tem como prioridade o uso para fins de iluminação e condicionamento artificial de ar (PEREIRA *et al*, 2013).

A diminuição do volume de chuvas em 2012 e as mudanças climáticas, já indicavam risco no abastecimento de água e atividades afins, principalmente na região sudeste do país. Resultando inclusive no acionamento de termoelétricas, energia com alto custo financeiro e ambiental. Diversos estudos sobre a disponibilidade hídrica na Região Metropolitana de São Paulo e projetos que buscavam opções para o abastecimento indicavam que tais problemas já eram previstos desde o início dos anos 2000 (GALVÃO *et al*, 2015). A falta de chuvas e o baixo o nível dos reservatórios das hidroelétricas nos anos de 2014 e 2015 levaram à crise energética e ao risco de racionamento.

Além da escassez de água por mudanças climáticas, outros fatores podem ser considerados agravantes da crise hídrica como ampliação na necessidade de abastecimento devido ao aumento populacional, aumento na ocupação do solo responsável pela mudança nos níveis de infiltração e escoamento das águas, aumento nas atividades produtivas e conseqüente aumento na poluição das águas, entre outros. Apesar desses indicativos, os gestores públicos e privados do estado de São Paulo não incluíram na sua agenda administrativa tais questões, o que resultou em uma crise hídrica e energética no Brasil (GALVÃO, *et al*, 2015).

Mecanismos legais de incentivo à conservação de energia têm sido aplicados por vários países. Nos Estados Unidos, as primeiras normas de eficiência energética

foram elaboradas em 1970. O Brasil começou a formular suas normas em 1980, mas ainda existe um espaço para ampliar a gestão de energia no que tange à descentralização das fontes de energia.

No que tange ao consumo de energia elétrica, juntos, os setores residenciais (21,55%), comerciais (14,4%) e públicos (6,9%), são responsáveis por quase 43% (EPE, 2018). Dentro desse contexto, a procura por soluções arquitetônicas, energeticamente eficientes e climaticamente adequadas, é bastante importante para o enfrentamento da crise hídrica e energética no Brasil.

Em meio a esse cenário, aprofunda-se a necessidade da utilização de soluções arquitetônicas que possam melhorar o desempenho termoenergético de uma edificação. Assim, o sistema de fachadas ventiladas apresenta-se como uma possível alternativa para contribuir no melhoramento do conforto térmico de uma construção.

As fachadas representam a identidade da edificação, tendo grande importância no que diz respeito à estética, porém, a indústria da construção civil, por décadas, vem estudando tecnologias de aprimoramento de sistemas construtivos de fachadas, visando aliar suas funções estéticas com o bom desempenho térmico e redução dos custos da construção. Devido à exigência de menor consumo energético, o sistema de fachadas ventiladas pode contribuir para reduzir as cargas de condicionamento artificial de ar, além de atuar como uma "capa" protetora, preservando a estrutura e prolongando a vida útil da edificação (MOURA, 2009).

No entanto, a busca por redução energética nos setores de edificações (residenciais, públicos e comerciais) não devem ser voltados apenas no projeto arquitetônico, mas também através de outras medidas de conservação como a certificação energética dos edifícios, o uso de eletrodomésticos eficientes, a descentralização da energia elétrica e térmica por fontes renováveis (eólicas, solar-voltaica, biomassa) e o uso racional da energia.

1.2 JUSTIFICATIVA

A procura por soluções arquitetônicas energeticamente eficientes e climaticamente adequadas vem sendo discutida no Brasil e no mundo, sendo que a

preocupação com as condições de conforto ambiental das edificações vai desde a preservação dos recursos naturais até a fase de concepção.

Eficiência energética é um conjunto de práticas para a redução do consumo de energia. Dentre essas práticas está o emprego de tecnologia em edificações que possam reduzir o consumo energético através de um melhor desempenho da edificação.

Deste modo, existe a necessidade de se utilizarem nas fachadas tecnologias que possam auxiliar no desempenho térmico e energético do edifício, dentre as quais encontra-se o sistema de fachadas ventiladas. Vários estudos já foram realizados sobre o sistema de fachadas ventiladas, demonstrando sua capacidade de redução de ganhos térmicos principalmente para climas quentes nos países europeus.

A cidade de Belém deu início ao processo de verticalização nos anos 1940, sendo intensificado a partir dos anos de 1960 e 1970. Neste período a engenharia superou algumas dificuldades de técnicas de construção em terrenos não consolidados e com cota baixa (GUSMÃO e SOARES, 2018). Entre as capitais verticalizadas do país destacam-se as da região sul e sudeste. No entanto, a cidade de Belém está na 3ª posição das cidades mais verticalizadas na Amazônia legal, perdendo apenas para Cuiabá e Porto Velho (IBGE, 2010). Em 2011, o sindicato de habitação e condomínio do Estado do Pará já indicava um número de 1.400 prédios existentes na cidade e mais 400 a serem entregues, sendo que há em Belém aproximadamente 400 mil habitantes morando em prédios.

Em decorrência da tendência de crescimento da verticalização em Belém, haverá uma maior influência da radiação solar sobre as fachadas das edificações de altura elevada, acarretando em um maior ganho de calor e conseqüentemente uma maior demanda de condicionamento artificial de ar. Este aspecto tem como agravante a grave crise energética devido aos baixos níveis dos reservatórios das usinas hidroelétricas brasileiras, provocados pelos índices de pluviosidade abaixo da média ocorridos no Brasil nos últimos anos. Como conseqüência, houve uma maior participação de fontes de petróleo e derivados na geração de energia elétrica, o que tem provocado por parte do governo a implantação da bandeira vermelha nas contas de energia elétrica, sobretaxando o consumo.

O emprego do sistema tradicional nas fachadas externas de revestimento aderido (chapisco, emboço e cerâmica) tem como aspecto preocupante o alto índice de destacamento de revestimentos cerâmicos nessas edificações, o que coloca em risco a vida dos transeuntes, ocasiona danos a bens materiais e resulta em efeito estético desagradável o que desvaloriza o empreendimento, além de acarretar em prejuízos a imagem e ao futuro das construtoras porque a Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 (ABNT, 2013) estabelece uma vida útil para revestimento de fachada externa de no mínimo 20 anos.

Diante deste quadro, é relevante um estudo científico que avalie o desempenho térmico de fachadas ventiladas em edifícios de altura elevada em Belém por conta de vários aspectos. O primeiro deles seria avaliar o desempenho térmico do sistema em termos de conforto térmico proporcionado e de redução no consumo de energia elétrica referente ao condicionamento artificial de ar. Com estas informações seria possível subsidiar o setor produtivo na tomada de decisões no que diz respeito à implantação do sistema de fachadas ventiladas na região amazônica.

Os edifícios que economizam energia através da utilização de técnicas construtivas são importantes para redução do consumo energético e conseqüentemente ajudam a sanar o problema da crise energética no país. Assim, avaliar o desempenho energético de uma tecnologia é necessário para verificar a adequação da mesma em determinada realidade, clima, através de parâmetros de conforto ambiental, verificando ganhos e perdas de calor na edificação.

Apesar do alto índice de verticalização em Belém, o sistema de fachadas ventiladas é uma tecnologia muito pouco utilizada na cidade, portanto, possui um grande potencial para sua utilização seja em obras novas ou de revitalização (*retrofit*). Nesse sentido, avaliar o desempenho da tecnologia frente à realidade climática local seria muito importante para identificar as vantagens em relação ao sistema de cerâmica aderida que é amplamente utilizado na cidade, possibilitando assim, incentivar o uso desse sistema por parte dos projetistas. Outra vantagem, caso o sistema demonstre-se viável em termos técnico-financeiro, seria a redução do número de patologias oriundas do sistema aderido de revestimento externo, principalmente no que concerne ao destacamento de placas cerâmicas de grandes alturas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo geral

Avaliar o desempenho térmico do sistema de fachadas ventiladas de cerâmica em edifício de grande altura na cidade de Belém-PA.

1.3.2 Objetivos específicos

Construir e Calibrar o modelo da edificação a ser avaliado, que consiste em um edifício residencial localizado na cidade de Belém-PA, construído no sistema tradicional de estrutura aporticada de concreto armado, vedação de alvenaria cerâmica e revestimento externo de fachada cerâmica aderida.

Realizar simulação computacional do edifício com fachada ventilada de cerâmica e com o sistema aderido tradicional no qual foi construído.

Comparar o desempenho térmico em termos de ventilação natural e consumo energético de resfriamento da edificação do sistema não aderido de fachada ventilada com placas cerâmicas e o sistema tradicional de cerâmica aderida, variando a absorvância da superfície (cor da cerâmica), regime de ventilação (abertura das esquadrias no período diurno ou noturno), sombreamento ou não das esquadrias e o emprego de juntas abertas e fechadas nas fachadas ventiladas na ar na câmara.

Analisar o consumo energético de resfriamento da edificação, devido à utilização do sistema de fachada ventilada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados aspectos relacionados ao sistema de fachadas ventiladas (FV), caracterizando o sistema através de descrição dos materiais empregados e procedimentos executivos, assim como os critérios de avaliação de desempenho térmico.

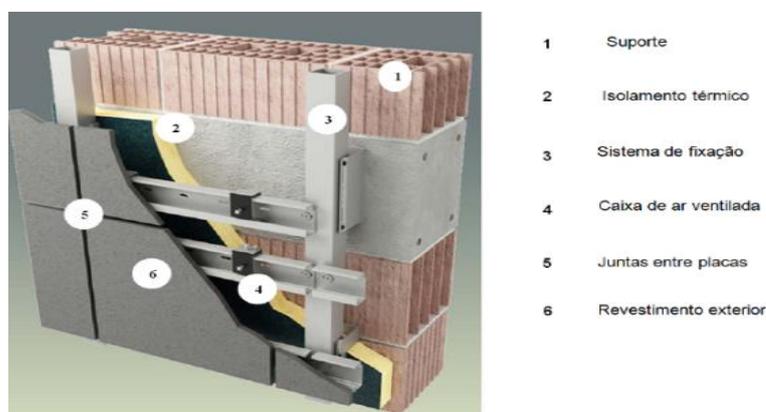
2.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE FACHADAS VENTILADAS

O primeiro prédio erguido utilizando o sistema de fachadas ventiladas foi na Universidade de Cambridge em 1967, desde então o sistema vem sendo desenvolvido para obter melhorias estéticas de prédios novos e *retrofit*, buscando também melhorias acústicas, térmicas e a redução do consumo de energia por ar condicionado (SUARÉZ *et al*, 2012).

O sistema de fachadas ventiladas vem sendo utilizado por arquitetos e construtores como solução construtiva para variados tipos de construções, climas e diferentes configurações de edifícios. O sistema oferece uma grande variedade de revestimentos e possibilidades de seleção de materiais com cores e tamanhos distintos, sendo uma ótima solução para edifícios residenciais, tanto para novos prédios como para *retrofit* (IBAÑEZ-PUY *et al*, 2017).

A FV consiste em painéis ou placas leves, suspensas por ancoragens de alumínio ou aço inoxidável que ficam separadas da edificação, criando uma câmara de ar entre o fechamento da estrutura da edificação e o próprio painel (MARIANE, 2014), sendo composta por: um revestimento exterior, uma subestrutura auxiliar de fixação, uma cavidade de ar que pode ser acrescido de um isolante térmico e um suporte base (Figura 1).

Figura 1 – Componentes de um sistema de fachada ventilada.



Fonte: Souza, 2010.

Na literatura, o sistema de fachadas ventiladas é apresentado com diversas denominações como: fachada aerada, fachada não aderida, parede ventilada, fachada ventilada opaca, fachada ventilada de juntas abertas. A variedade de denominação dificulta encontrar uma literatura específica sobre o tema (IBAÑEZ-PUY *et al*, 2017). O fato é que a FV é uma variação das fachadas cortinas. A cavidade de ar pode ter juntas abertas (FVJA), juntas fechadas (FVJF). Neste último caso (FVJF), o fluxo de ar é caracterizado por um ciclo convectivo ao passo que nas fachadas ventiladas de juntas abertas (FVJA), o fluxo de ar dentro da cavidade de ar é sempre para cima e com a velocidade da ar alcançando a grandeza cinco vezes superior à da velocidade na cavidade com juntas fechadas (FVJF) (SUARÉZ *et al*, 2012).

Segundo Siqueira (2003), no Brasil, existe uma confusão na utilização da terminologia fachada-cortina e fachada ventilada. Para o autor, o fato de o sistema de fachadas-cortinas estar incluído dentro da norma de janelas (ABNT NBR-10821-caixilho para edificações) fez com que no país se associassem fachadas-cortinas à utilização do vidro. Para o autor, fachadas ventiladas e fachadas cortinas são o mesmo sistema.

No entanto, a literatura internacional faz distinção entre fachadas cortinas (no inglês *curtain-wall*)¹ e fachadas ventiladas opacas (no inglês *Opaque Ventilated Façades*). Apesar das duas terminologias representarem sistemas construtivos de fachadas de “pele dupla”, com uma camada de ar entre elas, as fachadas cortinas são compostas por dois vidros separados por uma cavidade com ar entre elas e as fachadas ventiladas são compostas por duas superfícies opacas e uma câmara de ar entre elas. No inglês *Double-skin façades* por vezes é utilizado para designar fachadas *curtain-wall*. Essa diferença no tipo de material utilizado no revestimento confere comportamentos térmicos distintos. Assim, nesse trabalho utilizaremos a terminologia fachada ventilada (FV) para nomear o sistema construtivo estudado, com juntas abertas (FVJA) e fechadas (FVJF).

2.1.1 Componentes das fachadas ventiladas

2.1.1.1 Revestimentos exteriores

¹ Tradução nossa.

Os revestimentos são os elementos do sistema de fachadas ventiladas que entram em contato diretamente com o exterior, sendo constituídos de diferentes tipologias e dimensões, podendo ser fixados por estruturas intermediárias ou pontuais.

Segundo Silva (2015), o revestimento exterior de uma fachada ventilada deve atender algumas exigências: proteção da superfície da parede de agentes agressivos, contribuir para estanqueidade da água, conferir à parede regularidade na superfície e proporcionar o efeito estético desejável.

São inúmeros os materiais existentes no mercado que podem ser utilizados como revestimento em uma fachada ventilada. A seguir, serão apresentados alguns que são comumente utilizados nesse sistema.

Placas de pedras naturais são provenientes de pedras naturais, sendo as mais utilizadas os granitos, os mármore, os calcários e os basaltos. A fixação desse tipo de revestimento é feita através de ranhuras ou perfuração da placa.

Uma parte dos materiais de pedras naturais utilizados na execução de fachadas ventiladas comporta-se de um modo particular quando em contato com a ação da chuva, absorvendo rapidamente a água por capilaridade, retendo água nos poros da pedra, o que pode afetar a durabilidade da fachada (OLIVEIRA, 2011). O sistema de fixação destes elementos normalmente são ligados ao suporte base por mecânicos grampeados. As Figuras 2 e 3 ilustram FVs executadas com pedras naturais como ardósias, granitos entre outras.

Figura 2 – Fachada ventilada com revestimento em pedra natural: Ardósia.



Fonte: Oliveira, 2011.

Figura 3 - Edificações com fachada em pedra natural: Ardósia e Granito



Fonte: Silva, 2015.

Os **Revestimentos Cerâmicos** são bastante utilizados devido à variedade de soluções encontradas no que tange às dimensões e cor no mercado. Pode-se destacar nesse tipo revestimento de cerâmica extrudada, material cerâmico que possui coeficiente de absorção de água de apenas 0,5%, o que permite uma proteção da edificação contra a ação da chuva.

O sistema de fixação mais comum para aplicação de uma fachada ventilada em cerâmica é composto por uma perfilaria de suporte (alumínio ou aço inox) que é fixada à parede, os painéis cerâmicos são posteriormente acoplados aos perfis por encaixes metálicos e/ou colagem.

A Figura 4 ilustra fachadas ventiladas com cerâmica extrudada finalizada enquanto que na Figura 5 é mostrada a montagem deste sistema de fachada ventilada.

Figura 4 – Fachada ventilada com cerâmica extrudada.



Fonte: Keragail. 2019.

Figura 5 – Montagem do sistema de fachada ventilada com cerâmica extrudada.



Fonte: Keragail, 2019.

Placas de Alumínio Composto (ACM) é um material composto por duas camadas de alumínio e um núcleo de polietileno, possuindo durabilidade e elevada resistência ao fogo. Em razão do baixo peso, é indicado para a fabricação de grandes painéis. Sua maleabilidade é a característica que dá aos painéis deste material uma grande facilidade de conformação e agilidade de montagem (SOUZA, 2010). A Figura 6 mostra uma fachada em alumínio ao passo que na Figura 7 é mostrada a montagem desta fachada em ACM.

Figura 6 – Fachada ventilada em alumínio.



Fonte: Souza, 2010.

Figura 7 - fachada ventilada em ACM.



Fonte: https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/saiba-como-especificar-painéis-de-acm-para-fachadas-comerciais_18938_10_8. Acesso em 2019.

A **madeira** apresenta numerosas vantagens estruturais quando utilizada no sistema de fachada ventilada, pois possui um bom comportamento à flexão, oferece facilidade para absorver defeitos de execução e apresenta baixo peso específico. A energia incorporada é muito baixa, além de ser um material reutilizável, reciclável e biodegradável quando se utilizam madeiras locais e pouco transformadas.

A madeira possui alguns problemas de durabilidade e deformações ao longo do tempo, sendo não recomendado para ser utilizado em fachadas ventiladas de edifícios altos. No entanto, existem tratamentos e produtos derivados da madeira que apresentam características mecânicas e durabilidade muito mais elevada do que a madeira natural.

Os derivados de madeira beneficiada aplicáveis em fachada são as chapas de madeira orientada (Oriented Strand Board) e a de média densidade de fibras (Medium Density Fibers), placas de elevada densidade e painéis de partículas de madeira aglutinadas com cimento. A Figura 8 mostra uma fachada ventilada na qual foram utilizadas ripas de madeira maciça.

Figura 8 – Fachada ventilada em madeira maciça



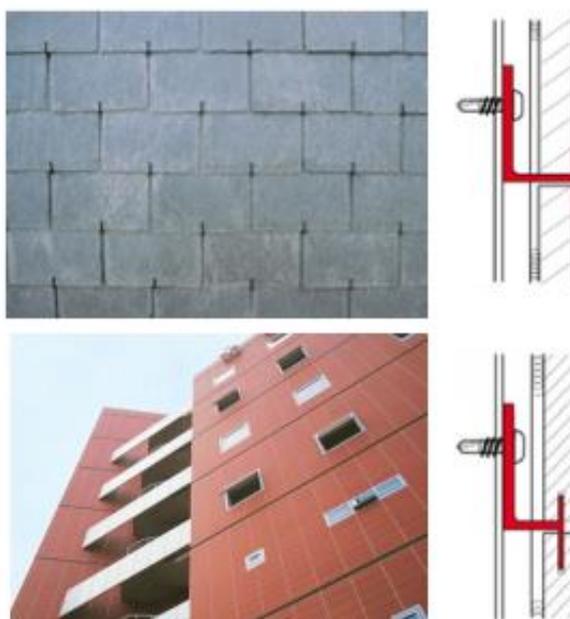
Fonte: Silva, 2015.

2.1.1.2 Sistema de fixação

Um dos elementos essenciais na concepção de uma fachada ventilada é o tipo de fixação utilizada. Este está intimamente correlacionado com o tipo de suporte base que o sustenta como também ao tipo de revestimento que vai receber, levando em consideração o peso, bem como a geometria dos painéis.

A fixação do revestimento externo pode ser **visível** ou **oculta**. A fixação é considerada **visível** quando o elemento de fixação fica aparente na fachada e **oculta** quando ocorre o inverso. Para exemplificar, a Figura 9 ilustra o sistema de fixação visível e oculto.

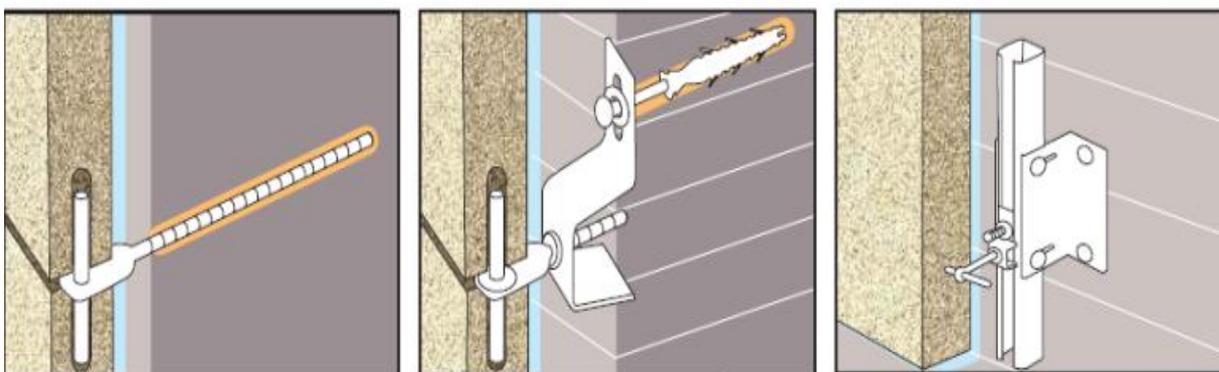
Figura 9 - Sistemas de fixação visível e oculto.



Fonte: Silva, 2015.

O revestimento externo pode ser ancorado por diversas soluções. A ancoragem pode ser feita por cavilha, que é semelhante a um prego. A cavilha está ligada a um pino que, em juntas horizontais, deve suportar o peso próprio do revestimento, e este último deve ser fixado diretamente ao suporte ou ligado a um perfil que estabelece essa ligação (SOUZA, 2010). A Figura 10 apresenta um esquema desse tipo de fixador.

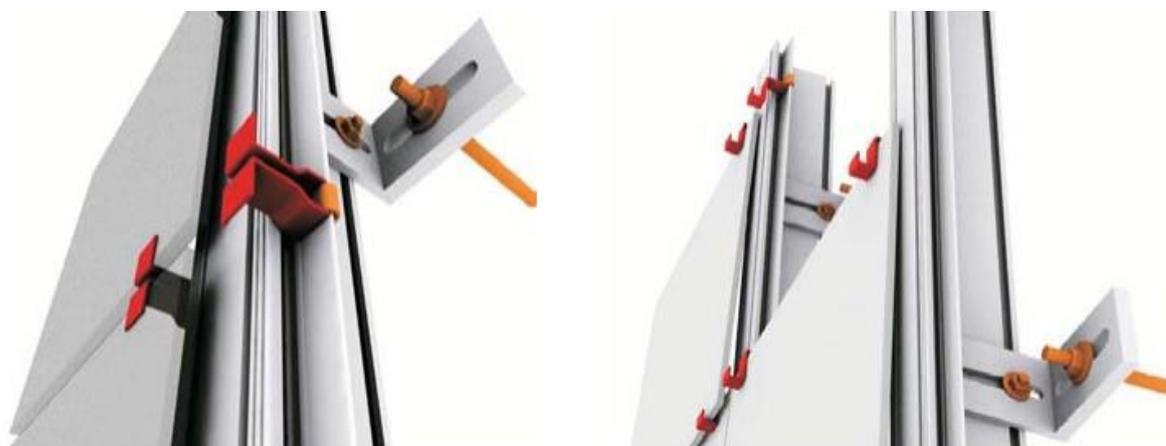
Figura 10 – Esquema do sistema de fixação por cavilhas.



Fonte: Souza, 2010.

O revestimento externo também pode ser fixado pelo sistema de **grampos**, que é uma peça metálica como apresentada na Figura 11, no qual é disposto o revestimento, suportando o peso próprio do elemento de revestimento e fixando-o à fachada. Esta solução tanto pode possibilitar a colocação do revestimento com juntas de topo como em forma de “escama” (SOUZA, 2010).

Figura 11 – Fixação do revestimento por grampos.



Fonte: Souza, 2010.

A ancoragem do revestimento no sistema de fachada ventilada também pode ser linear, semelhante à ancoragem por grampos sendo este contínuo em todo o comprimento dos elementos de revestimento, suportando o peso próprio e fixando-o revestimento a fachada. Este sistema é aplicado em revestimentos de maior peso e de espessura suficiente para permitir a existência de um entalhe no qual encaixa a ancoragem (SOUZA, 2010). A Figura 12 apresenta um exemplo desse sistema.

Figura 12 – Ancoragem linear.



Fonte: Souza, 2010.

O Quadro 1 apresenta os principais tipos de materiais utilizados no revestimento de fachadas ventiladas, mostrando espessura, forma e tipo de fixação.

Quadro 1 – Tipos de revestimento e tipos de fixação empregada

(continua)

Material		Espessura do elemento (mm)	Forma/Solução	Sistema de Fixação
Pedra natural		Pelo menos de 30	Retangular	Ancoragem por grampos; ancoragem por cavilhas; Ancoragem linear; Ancoragem no tardo;; Ancoragem com discos.
			Sistema sobreposto	Parafuso ou pregos; Encaixe entre elementos.
Concreto	Concreto Polímero	14	Painel simples	Ancoragem por grampos; ancoragem por cavilhas; Ancoragem linear; Ancoragem no tardo;.
	GRFC	10 a 15	Painel simples	Ancoragem por cavilhas; Ancoragem no tardo;.
			Painel "stud-frame"	Ancoragem no tardo;.
Cerâmico		> 8	Placa	Ancoragem por grampos; Ancoragem linear; Sistema de encaixe.
			Placas sobrepostas	Ancoragem por grampos.

(conclusão)

Material	Espessura do elemento (mm)	Forma/Solução	Sistema de Fixação
Placas de alumínio composto	3 a 10	Painel tricamada	Fixação por parafusos, pregos ou rebites; Moldura; Sistema de encaixe.
Madeira	Muito variável	Contraplacado, Aglomerados OSB, MDF, HDF, madeira maciça	Fixação por presilhas, pregos, rebites, parafusos; Agrafos ocultos pelo recobrimento.

Fonte: Adaptado de Silva, 2015.

2.1.1.3 Isolamento térmico

O isolamento térmico tem como função principal o aumento da resistência térmica do edifício, reduzindo as trocas de calor entre o edifício e o exterior. São considerados isolantes térmicos materiais com condutividade térmica (λ) menor ou igual a $0.065 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ e resistividade térmica (R) maior que $0.5 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C/W}$, de forma a garantir que a espessura do material seja suficiente para reduzir o fluxo de calor (SILVA, 2015).

Os materiais mais utilizados são, em regra, o poliestireno expandido moldado ou extrudado, a lã mineral de rocha ou vidro, as placas de aglomerado de cortiça ou a espuma de poliuretano projetado, como mostra a Figura 13.

Figura 13 – Lã de vidro e lã de rocha.



Fonte: Silva, 2015.

2.1.1.4 Juntas abertas e fechadas

O sistema de fachadas ventiladas apresenta dois tipos de juntas: juntas abertas e juntas fechadas. No caso de juntas abertas, a sua espessura não deverá exceder os 3 mm. No entanto, é admissível uma espessura maior quando os materiais estão sujeitos a uma variabilidade dimensional significativa. Segundo Silva (2015), em localidades com condições climáticas extremas, as juntas abertas não devem ser usadas, uma vez que não possuem uma proteção adequada contra a ação da chuva. A Figura 14 ilustra três tipos de juntas, as abertas, e as fechadas, sendo estas sobrepostas ou com perfil de junta.

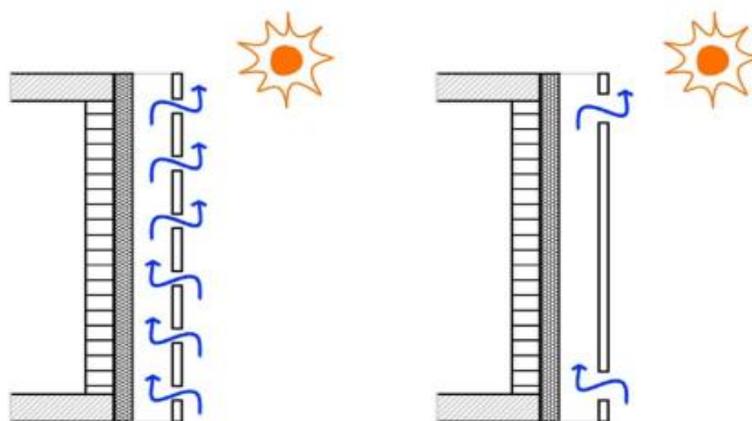
Figura 14 – Esquema dos sistemas de juntas abertas.



Fonte: Souza, 2010.

No mercado a espessura máxima de juntas encontrada é de 10 mm. A Figura 15 apresenta o esquema de dois tipos de sistema de fachadas ventiladas de juntas abertas (FVJA). O primeiro, à esquerda, com inúmeras aberturas distribuídas ao longo da altura da edificação. O segundo (à direita), com aberturas apenas na base e no topo. Em ambos os casos, o funcionamento térmico da ventilação ocorre por efeito chaminé dentro da câmara de ar. Para a FV com aberturas somente na base e no topo, o fluxo ascendente do ar é contínuo, homogêneo e simétrico ao longo de toda a extensão da parede (PATANIA et al, 2010). Ao passo que na FV com aberturas distribuídas ao longo da altura o fluxo é descontínuo, heterogêneo e muito mais complexo (SANCHÉS et al, 2013).

Figura 15 –Esquema do sistema de juntas abertas (1) e juntas fechadas (2).



Fonte: Ibañez - puy *et al*, 2017.

Vale ressaltar que no Brasil boa parte das empresas que está executando sistemas de FV com mastique nas juntas, ou seja, fechando-as. O motivo é evitar a entrada de animais e insetos na cavidade de ar. Esta comodidade torna o sistema fechado, sem a entrada do ar externo pelas frestas das placas dos revestimentos, caracterizando-se por um ciclo convectivo de fluxo de ar. Atem (2016) observou que este tipo de FV, com junta fechada, mostrou-se adequada no Brasil apenas para as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3, caracterizadas por climas temperatura e subtropical úmidos, com temperaturas amenas, Cfa, Cfb e Cwa na classificação Koppen-Geiger. Entretanto, para as zonas bioclimáticas 7 e 8, as FVJF apresentaram os maiores ganhos de calor, tornando-se inviáveis do ponto de vista da eficiência energética e do conforto térmico.

2.1.1.5 Vantagens e desvantagens do sistema de fachada ventilada

O sistema de fachadas ventiladas apresenta uma série de vantagens que justificam sua utilização, mesmo com um custo de instalação maior em relação às técnicas convencionais de revestimentos aderidos (MEDEIROS *et al*, 2014), dentre algumas vantagens destacam-se:

- Montagem com maior produtividade, sem desperdício de material, podendo ser realizada mesmo com a estrutura em andamento ou por cima de revestimento já existente;
- Fachadas livres de deslocamentos, trincas e infiltrações oriundas de ações térmicas e estruturais;

- Facilidade de manutenção e trocas não destrutivas dos painéis;
- Estanqueidade da água sem necessidade de silicone nas juntas;
- Reflexão de ruídos externos e desempenho térmico decorrente da camada de ar;
- Possibilidade de utilizar os espaços vazios para passagem de tubulação.

O sistema de fachadas ventiladas exige uma mão de obra mais qualificada, pois demanda uma mudança no processo de produção. O projeto arquitetônico deve ser específico e bem detalhado para possibilitar a montagem do sistema na edificação. No entanto, vale ressaltar que as empresas atuantes no Brasil fornecem o sistema instalado na obra, possuindo mão de obra e o planejamento adequado para a montagem da fachada ventilada.

O Quadro 2 apresenta as principais vantagens e desvantagens da utilização do sistema de fachada ventilada.

Quadro 2 – Vantagens e desvantagens do sistema de fachada ventilada.

Vantagens	Desvantagens
Sistema respirante: O sistema possibilita a dispersão do vapor presente no interior das paredes, eliminando a umidade dos edifícios.	Necessidade de mão de obra qualificada e treinamento.
Estanqueidade à água: Quando dimensionado corretamente para as necessidades específicas de cada edifício, o sistema de fachadas ventiladas é capaz de controlar a entrada de água da chuva e eliminar infiltrações.	Dependência de mudanças organizacionais nos processos de gestão de empreendimento e da produção.
Conforto térmico: As correntes convectivas de ar atuam como isolantes térmicas entre o exterior e o as paredes do edifício, eliminando assim pontes térmicas.	Exigência de projeto específico, bem detalhado e que defina o processo de montagem.
Facilidade de manutenção e reposição das placas: cada um dos painéis da fachada ventilada é independente.	Custos elevados
Melhoria no tratamento acústico.	

Fonte: Adaptado de Medeiros, 2014.

2.1.2 Fornecedores de fachadas ventiladas no Brasil

No Brasil, alguns fabricantes internacionais fornecem e executam o sistema de fachadas ventiladas, como por exemplo a Belmetal, Hunter Douglas, Gail, Pertech, Eternit Ulma, Trespá, Porcelanosa entre outras. Quanto os produtos internos valem destacar as cerâmicas Elizabeth, Eliane, Lepri e Portobello.

Outra empresa fornecedora do sistema de fachada ventilada no Brasil é a *ULMA Architectural Solution*, empresa espanhola que possui filiais em Portugal, Brasil e França. No Brasil, a empresa comercializa o sistema de fachadas ventiladas com revestimento em painéis de concreto polímero com espessura entre 11 e 14 mm, fornecido em diversas cores. O sistema que a empresa utiliza possui dois tipos de fixação, sendo um horizontal e outro vertical como demonstram as Figuras 16 e 17.

Figura 16 – Sistema de fixação de fachadas ventiladas ULMA.



Fonte: <http://www.ulmaarchitectural.com>. Acesso em 2018

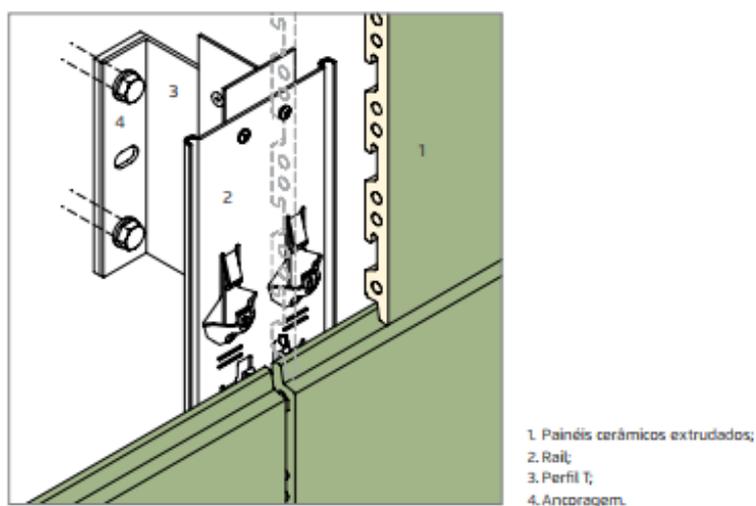
Figura 17– Detalhe da entrada e saída de ar do sistema de fachadas ventiladas ULMA.



Fonte: <http://www.ulmaarchitectural.com>. Acesso em 2018.

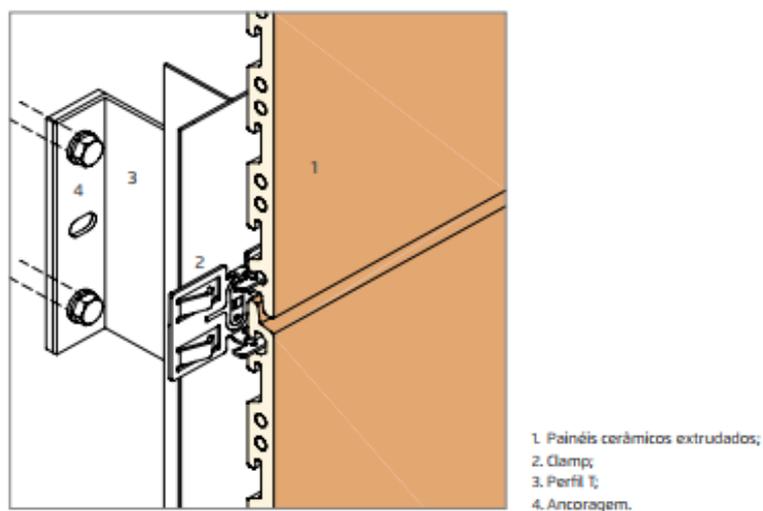
No mercado Brasileiro também atua a empresa GAIL, que através do sistema **KeraGail** fornece fachadas ventiladas com cerâmicas extrudadas de grandes formatos, produzidas na Alemanha. O sistema da empresa é autolimpante devido ao tratamento que utiliza dióxido de titânio como camada protetora no esmalte. A empresa possui diversos formatos de revestimentos, cores e texturas distintas e conta com dois tipos de fixação, o *Rail* (painel cerâmico é fixado em perfil em formato de “T”) e o *Clamp* (o painel cerâmico é fixado por meio de braçadeiras) como mostra as Figuras 18 e 19.

Figura 18 – Detalhe do sistema *rail* de ancoragem das placas cerâmicas.



Fonte: Catálogo técnico *KeraGail*, 2019.

Figura 19 – Detalhe do sistema *clamp* de ancoragem das placas cerâmicas.



Fonte: Catálogo técnico *KeraGail*, 2019.

Devido empregar peças cerâmicas importadas, o custo deste sistema da Gail assim como das demais é bastante elevado. Em razão disto, com vistas a reduzir o custo e disseminar o emprego das FV, a Gail lançou o sistema KeraBrik, com cerâmicas de menor tamanho, fabricadas no Brasil, mas com o mesmo sistema de fixação, o que igualou os custos de produção com os sistemas dos produtos nacionais. Neste sentido, há inúmeras empresas construtoras no Brasil que empregam os produtos das cerâmicas nacionais. Por exemplo, a Construtora MHP que trabalha com um sistema de fachada ventilada com revestimento cerâmico da Elizabeth (porcelanato) e insertos fabricados em aço inox AISI 304 (Figura 20) e cantoneiras galvanizadas a fogo. Segundo o site da empresa, o custo total da implementação do sistema é de 10 a 12% mais caro que o sistema convencional de fachada de revestimento aderido. A Figura 21 apresenta uma obra de *retrofit* desenvolvida pela empresa.

Figura 20 – Inserto metálico.



Fonte: <http://www.construtoramhp.com.br>, Acesso em 2018

Figura 21 – Obra de *retrofit* desenvolvida pela empresa.



Fonte: <http://www.construtoramhp.com.br>. Acesso em 2018

Vale citar também a atuação da construtora Espírito Santo, uma empresa com 25 anos de atuação no mercado de execução de FV, que atua muito fortemente no Nordeste e Norte do País, empregando placas pétreas e cerâmicas dos mais diversos fabricantes nacionais.

A grande maioria das construtoras que atua neste mercado, emprega sistemas com placas cerâmicas nacionais ou pétreas com insertes metálicos, seguindo a norma ABNT NBR 15846:2010 (Rochas para revestimentos – Projeto, execução e inspeção de revestimento de fachadas de edificações com placas fixadas por insertos metálicos. Não há uma norma específica para FV, o que há é esta norma referente à fachadas não aderidas de placas pétreas fixadas com dispositivos metálicos.

2.1.3 Sistema de fachada ventilada em Belém

O sistema de fachadas ventiladas é uma tecnologia muito pouco utilizada na região metropolitana de Belém-PA, porém, possui um grande potencial para sua utilização, seja em obras novas ou em obras de *retrofit*. Mas podemos destacar algumas poucas obras que já utilizam essa tecnologia na cidade.

O *Boulevard Shopping* (Figura 22), localizado na Av. Visconde Sousa Franco, utiliza na sua fachada o sistema ventilado de juntas fechadas com revestimento em pedra natural (granito).

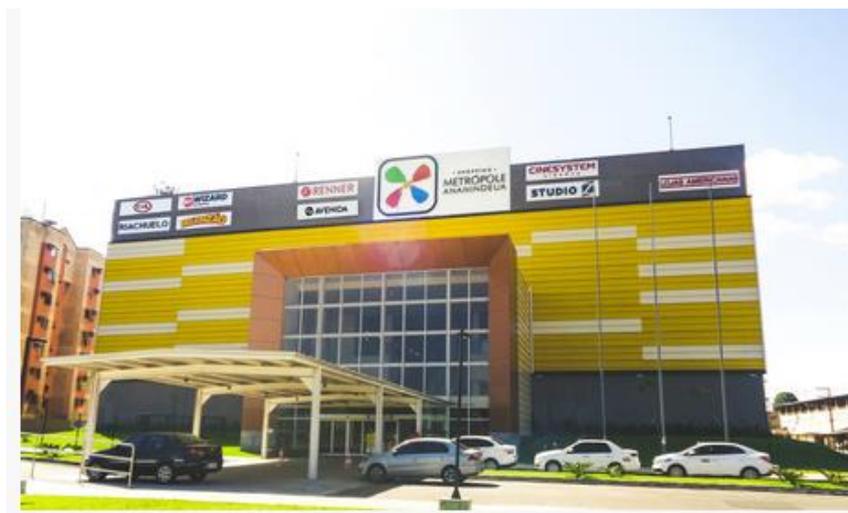
Figura 22 – Fachada ventilada com revestimento em granito do *Boulevard Shopping*.



Fonte: <http://www.ultra.adm.br/wp/aliانسce-amplia-participacoes-em-2-shoppings-de-belem/>. Acesso em 2018

Outra edificação que utiliza o sistema de fachada ventilada é o *Shopping Metrópole* (Figura 23), localizado na rodovia Mario Covas em Ananindeua. As fachadas da edificação sistema de fachada ventilada com o revestimento de placa metálica isolante de alumínio.

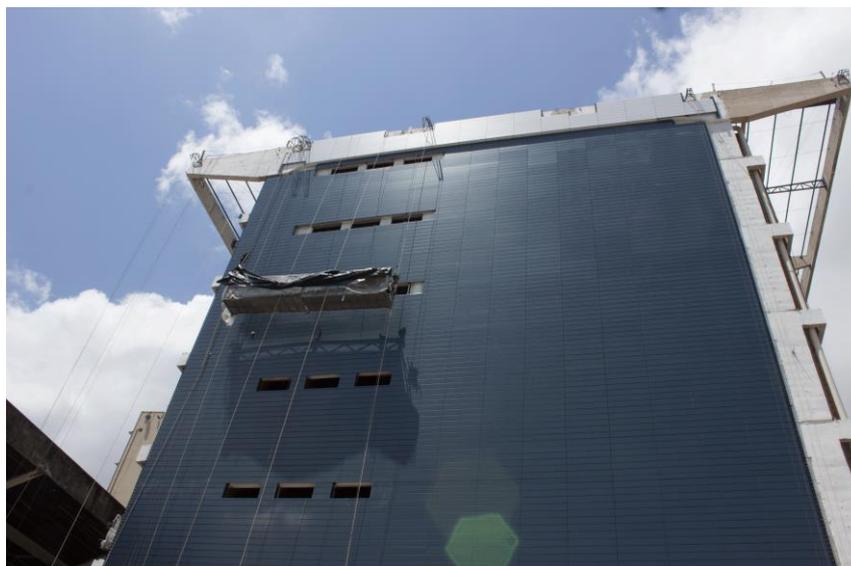
Figura 23 – Fachada ventilada com revestimento de placa metálica *Shopping Metrópole*.



Fonte: <https://viajabrasil.com.br/para/2019/07/31/shopping-metropole-ananindeua/>. Acesso em 2018.

No prédio da Justiça Federal do Pará (Figura 24), localizado na Rua Domingo Marreiros, utilizado o sistema *KeraGail* de fachada ventilada em cerâmica extrudada, fornecido e instalado pela Gail.

Figura 24 – Obra da Justiça Federal do Pará



Fonte: Autor do trabalho.

O Banco Santander, localizado na Av. Nazaré, também empregou sistema de fachada ventilada com placas pétreas de granito. Esta foi a primeira obra a empregar este tipo de sistema construtivo em Belém.

Todas essas obras demonstram o grande potencial que a cidade de Belém possui para absorver o sistema de fachadas ventiladas. Outra potencialidade no emprego em Belém é o grande número de registros de edificações com problemas de destacamento de revestimento cerâmico.

2.1.4 As características térmicas e os princípios térmicos da fachada ventilada

O desempenho térmico de uma fachada ventilada depende de parâmetros externos de condições climáticas (temperatura, direção do vento, radiação solar) e de projeto (materiais, geometrias). Os parâmetros de projeto podem ser escolhidos, mas os fatores externos estão em constante mudança, sendo importante a avaliação das suas implicações no desempenho térmico do edifício. Simplificando, pode-se assumir que as condições climáticas podem ser dias de verão (dias de sol e temperaturas elevadas) e dias de inverno (dias nublados e baixas temperaturas), sendo que a fachada deve ser projetada para atender essas duas situações, utilizando o menor consumo de energia possível (IBAÑEZ-PUY *et al*, 2017).

Em um edifício, as transferências de calor na sua fachada ocorrem através dos processos de condução, convecção e radiação. São muitos os processos que intervêm no processo de transmissão de calor em uma fachada ventilada, por isso é necessário entender que tipo de mecanismos atuam na transferência de calor e que parâmetros atuam sobre cada um deles (ATEM, 2016). Alguns fatores que intervêm no processo de ganho e perda de calor em uma fachada ventilada são:

- Quantidade de radiação solar incidente;
- Velocidade e direção do ar;
- Material do revestimento exterior;
- Cor do revestimento exterior;
- Espessura e forma das juntas da fachada ventilada;
- Entradas e saídas de ar;
- Largura da camada de ar;

- Materiais da base;
- Espessura do isolante.

Para um melhor entendimento das trocas de calor que ocorrem em uma fachada ventilada, Atem (2016) dividiu em quatro etapas o processo de transmissão de calor do exterior para o interior, ilustrado na Figura 25 e descrito abaixo:

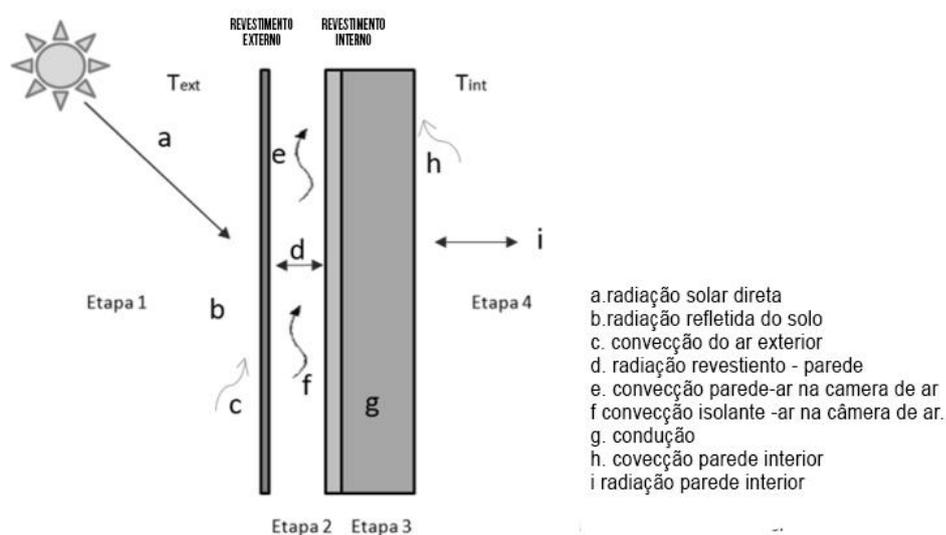
Etapa 1: A fachada é atingida pela radiação solar direta e pela radiação refletida do entorno, também atuam convecção que pode ser natural ou forçada. Durante a noite pode haver perda de calor para o ar no caso de climas quentes;

Etapa 2: A face interior do revestimento externo transfere calor para a câmara de ar e a câmara de ar para face exterior da parede do edifício, atuando a radiação e a convecção;

Etapa 3: Da face exterior da parede para a face interior atuam praticamente o processo condução de calor por dentro dos materiais;

Etapa 4: Da face interior da parede para o interior do ambiente atuam a radiação e a convecção.

Figura 25 – Transmissão de calor na fachada ventilada.



Fonte: Adaptado de Atem, 2016.

Dentro do sistema construtivo de fachadas ventiladas cada camada (revestimento, câmara de ar e parede) possui uma função e deve atender alguns requisitos para o controle térmico na edificação. O **revestimento exterior** funciona

como uma barreira para a radiação solar direta, essa barreira é influenciada pela absorvidade e reflexibilidade do material usado, bem como a sua espessura e emissividade. Já a **câmara de ar** tem como função garantir a estanqueidade da água da chuva e através dela o ar quente é evacuado. Nesse processo alguns requisitos influenciam como a largura da câmara, altura e rugosidade da câmara de ar, os tipos de juntas do revestimento (abertas ou fechadas) e as entradas de ar nas extremidades da fachada.

A transmissão de calor da **parede** para o ambiente interior da edificação é influenciada pelo material, espessura e isolamento térmico utilizado. Os estudos realizados sobre fachadas ventiladas têm como principal interesse a sua capacidade de diminuição do consumo energético para refrigeração, principalmente para países do sul da Europa. A literatura reconhece uma economia de energia em relação às fachadas tradicionais aderidas. São poucos os estudos relacionados para o clima frio devido ao fato de que os benefícios são questionáveis (Ibañez-Puy, *et al*, 2017).

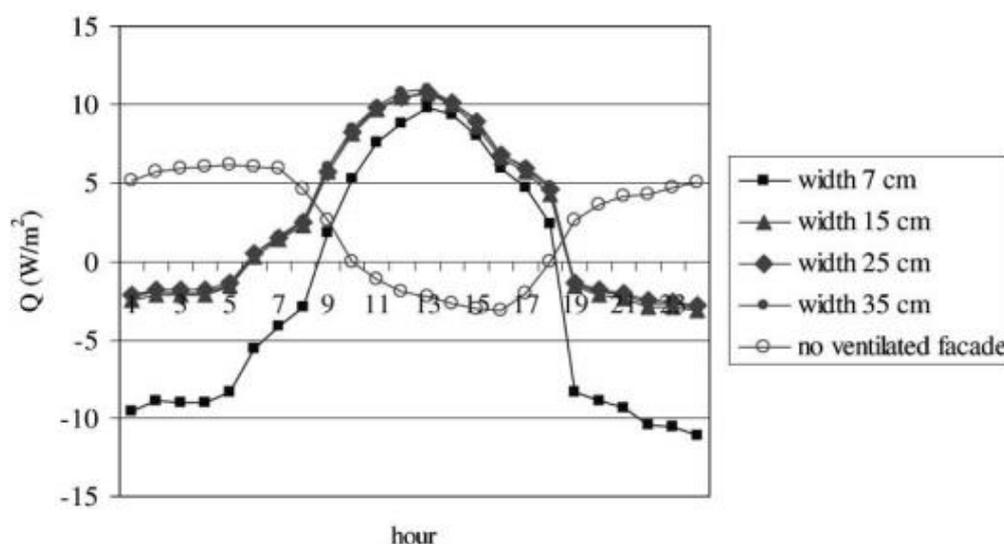
As pesquisas existentes sobre comportamento térmico das fachadas ventiladas podem se dividir em descrição teórica do comportamento das fachadas; medições do comportamento térmico de edifícios construídos com fachadas ventiladas; validações de métodos de cálculo; métodos de simulações usando *softwares Energyplus, Trnsys e Esp-r* (Atem, 2016).

Balocco (2002) foi uma das primeiras autoras a propor um modelo de cálculo para estudar diferentes tipos de fachadas ventiladas, no qual considerou que a transferência de calor nas fachadas ventiladas é o resultado de:

- Interações térmicas de convecção e radiação entre o ambiente externo com o revestimento da fachada;
- Troca de calor das duas paredes do canal;
- Troca de calor por convecção da parede e a circulação de ar na câmara;
- Condução térmica na parede.

Assim, propõe equações que calculam cada altura do canal, as diferentes temperaturas e massas de ar. Concluindo ainda que, as fachadas ventiladas alcançam melhores resultados de resfriamento quando a câmara de ar é maior que 7 cm de largura, sendo que o resfriamento é significativo quando a largura da câmara de ar está entre 10 a 15 cm (Figura 26).

Figura 26 – Comparativo da transferência de calor de diferentes larguras (7 cm; 15 cm; 25 cm e 35 cm) de câmara de ar em uma fachada ventilada e uma fachada sem ventilação.



Fonte: Baloco, 2002.

Griffith (2003) criou um modelo de cálculo para ser utilizado e que foi implementado como módulo no programa *EnergyPlus*, denominado de “*The Exterior Natural Vented Cavity Module*”. No entanto, o autor adverte que o modelo foi desenvolvido utilizando princípios da engenharia e que necessitava de estudos de validação, bem como a necessidade de investigações experimentais em campo para caracterizar valores de entrada apropriados para as áreas de abertura e os coeficientes de descargas para os distintos tipos de sistemas.

Já Naboni (2007) realizou medições experimentais em uma fachada real na Itália (Figura 27) utilizando o modelo proposto por Griffith, no programa *EnergyPlus*. O pesquisador realizou simulações para três climas na Itália e concluiu que as fachadas ventiladas agem como amortecedores térmicos. No inverno a fachada ventilada funciona como barreira dos ventos, reduz a perda de calor para o ar noturno, ao passo que no verão funciona como barreira contra a radiação solar, sendo que a circulação de ar na câmara retira calor através de convecção nos horários de pico de calor. O módulo do programa *EnergyPlus* denominado *Exterior Natural Vented Cavity* pode ser utilizado para simulação de fachadas ventiladas, tendo seus resultados validados. Contudo, é necessário e que outros casos de edifícios (não residenciais) devem ser estudados, com diferentes configurações de materiais e geometria.

Figura 27 – Edifício na Itália, no qual foram realizadas as medições e simulações para validação do modelo proposto por Griffith.



Fonte: Naboni, 2007.

Ibañez-puy *et al* (2017) publicaram um artigo do estado da arte sobre FV opacas, no qual apresenta informações de diferentes estudos realizados sobre fachadas ventiladas, abordando questões de desempenho térmico e eficiência energética. Os autores dividem os temas abordados nos estudos nas categorias parâmetros externos, fatores construtivos e economia de energia.

Na categoria **parâmetros externos** são apresentados resultados sobre radiação solar, vento e fluxo de ar. **Fatores construtivos** apresentam estudos sobre revestimentos externos, configurações das aberturas, câmara de ar e revestimento da parede. Em **eficiência energética** são apresentados resultados referentes à economia de energia resultante da utilização das fachadas ventiladas. A seguir são apresentados os resultados dos estudos reunidos e apresentados por Ibañez –puy, *et al* (2017).

Sobre a influência da orientação e da radiação solar no verão no desempenho térmico das fachadas ventiladas: A economia de energia aumenta

significativamente à medida que a radiação solar aumenta, quanto maior o calor mais eficiente é uma fachada ventilada. A temperatura dentro da câmara de ar sempre é maior que a temperatura externa do meio ambiente. A economia de energia aumenta à medida que a movimentação do ar dentro da cavidade aumenta.

A respeito da influência da velocidade dos ventos na performance térmica das fachadas ventiladas: Fachadas baixas não são influenciadas pelo vento. Quando não há radiação solar ainda, ainda há movimento dentro da cavidade devido à ação do vento. A alta velocidade do vento não influencia o efeito de resfriamento ventilado na fachada no verão.

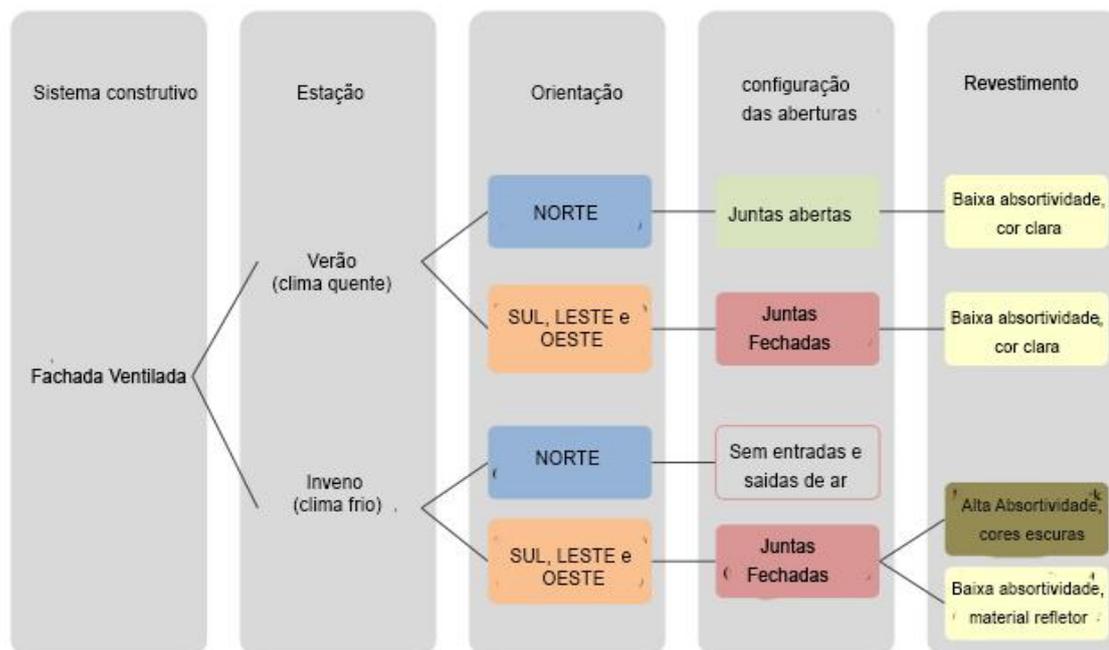
Algumas conclusões sobre a influência do revestimento externo no desempenho térmico das fachadas ventiladas apresentadas são: Para obter economia de energia com revestimento externo em cerâmica é necessário que a câmara de ar tenha 9 cm de largura. A economia de energia aumenta com a resistência térmica do revestimento externo.

Sobre influência do tipo de abertura no desempenho térmico das fachadas ventiladas: As fachadas de juntas abertas aumentam o fluxo de calor para o edifício, produzindo menos resfriamento do mesmo. As fachadas de juntas fechadas (somente com entrada e saída de ar na parte superior e inferior do revestimento externo) diminuem a temperatura da face interna, aumentando assim o efeito de resfriamento.

Sobre a geometria da câmara de ar no desempenho térmico das fachadas ventiladas: O efeito de resfriamento só começa a ser notado nas fachadas que possuem 7 cm de largura na câmara de ar. As economias de energia aumentam à medida que a largura do duto do ar aumenta; O efeito de resfriamento começa a ser estável a partir dos 35 cm de largura na câmara de ar.

Na Figura 28 é apresentado um fluxograma criado por Ibañez-puy *et al* (2017) com recomendações ao projetar fachadas ventiladas para o hemisfério Norte, embasadas nos estudos realizados até então sobre o sistema.

Figura 28 - Fluxograma para projetar fachadas ventiladas



Fonte: Adaptado de Ibañez –puy, *et al*, 2017.

2.1.5 Estudos sobre fachadas ventiladas no Brasil

No Brasil foram desenvolvidas poucas pesquisas sobre fachadas ventiladas. Serão apresentados alguns trabalhos desenvolvidos sobre o tema para as condições climáticas do país.

Siqueira Júnior (2003) no seu trabalho de mestrado discutiu os principais parâmetros de elaboração de projetos e produção de fachadas ventiladas com placas de grês porcelanato no Brasil. Apresentando definições, conceitos, propriedades, componentes e execução dessa tecnologia.

Muller (2003) investigou o comportamento térmico de um protótipo de uma fachada ventilada. Nesse protótipo desenvolveu um sistema de fixação de placas de grês porcelanato. O painel protótipo foi executado na cidade de Tijucas-SC, não foi utilizado isolante térmico e possuía aberturas na câmara de ar na parte superior e inferior. Os ganhos de calor se mostraram 47% menores do que o da fachada convencional.

Mizger e Penso (2016) usaram o módulo “*exterior natural vented cavity*” do programa *Energy Plus* para simular o sistema de ventilação na câmara de ar da fachada ventilada. Os autores compararam o sistema de fachada comum com cerâmica aderida e o sistema de fachadas ventiladas para um edifício localizado na cidade Maceio-AL. Também utilizaram a cor da cerâmica do revestimento exterior como variável de simulação, no caso a branca ($\alpha= 0,30$), marrom ($\alpha=0,55$) e preta ($\alpha=0,90$). Os autores concluíram que a utilização do sistema de fachadas ventiladas em relação ao convencional demonstrou-se mais coerente quando do uso do revestimento de maior absorvância térmica (cor escura), pois as diferenças de carga térmica nesse cenário são bem mais expressivas, se comparado com as fachadas nas cores brancas e marrom. Estas reduções de transmissão de calor ficaram entre 4e 6%. Para revestimentos de cor clara não houve economia energética, os valores ficaram muito próximos ao da fachada aderida cerâmica. O módulo *Exterior Natural Vented Cavity* do programa *Energyplus* não permite investigar a atuação dos ventos locais pois não considera a direção dos mesmos, considerando apenas a intensidade dos ventos para todas as orientações, o que se constitui numa limitação do programa.

Atem (2016) realizou em seu trabalho de doutorado, simulações do sistema de fachadas ventiladas para as 8 zonas climáticas do Brasil. O *software* utilizado foi *Trnsys 17*, tendo como base um modelo validado pela professora Carolina Aparício Fernández da Universidade Politécnica de Valencia.

Algumas variáveis de fachadas, importantes para o clima brasileiro, foram provadas como: Absortividade e emissividade, movimento do ar e transmitância dos revestimentos exterior e interior. O objetivo do trabalho foi criar bases para auxiliar os projetistas que querem fazer uso desse sistema construtivo, sendo apresentado no final do trabalho o *Guia de desenho para utilização da fachada ventilada no Brasil: Eficiência energética*.

As cidades selecionadas para cada zona climática teve como critério de escolha a disponibilidade de arquivos climáticos com compatibilidade com o programa *Trnsys 17* (Tabela 1).

Tabela 1 – Lista das cidades selecionadas para simulação e suas características.

Zona	Ciudad representativa/ Provincia	Latitud	Temp. media anual (°C)	Velocid media del aire (m/s)	Horas de sol (anual)	Hum. relativa media (%)	Precip anual (mm)
1	Curitiba/Paraná	25° 25' 40" S	16,5	3,4	1714,2	80	1407,9
2	Bagé/Rio Grande do Sul	31° 19' 53" S	17,6	2,6	2444,6	78	1350
3	Sao Paulo/São Paulo	23° 32' 51" S	19,3	1,7	1732,7	78	1454,8
4	Brasilia/ Distrito Federal	15° 46' 47" S	21,2	1,7	2364,8	67	1552,1
5	Vitoria da conquista/Bahia	14° 51' 58" S	20,2	-	2068,6	78,3	733,9
6	Campo Grande/Mato Grosso do Sul	20° 26' 34" S	22,7	2,66	2526,6	72,8	1489
7	Petrolina/Pernambuco	09° 23' 55" S	26,3	2,6	2844,8	58	609,8
8	Belém/Pará	01° 27' 21" S	25,9	3	2219,8	84	2893,1

Fonte: Atem, 2016.

As simulações foram realizadas para as 8 zonas bioclimáticas brasileiras, considerando-se o período de um ano. Foram mescladas algumas características construtivas de fachadas ventiladas, contabilizando um total de 27 configurações de fachadas. Sendo que para efeito de comparação foi utilizado uma fachada ventilada modelo (FVM) que apresentava as seguintes características:

- Parede: espuma de poliuretano projetado (4 cm); argamassa (1 cm); lã de rocha 8 cm; painel duplo de gesso cartonado (1,6 cm);
- Entradas e saídas de ar com 1 cm;
- Revestimento externo de painel de “*Aluconbond*” (revestimento composto com duas lâminas de alumínio de 0,5mm);
- Absortividade 0,6 (cor escura);
- Câmera de ar de 9 cm;
- Revestimento com juntas fechadas.

Foram realizadas:

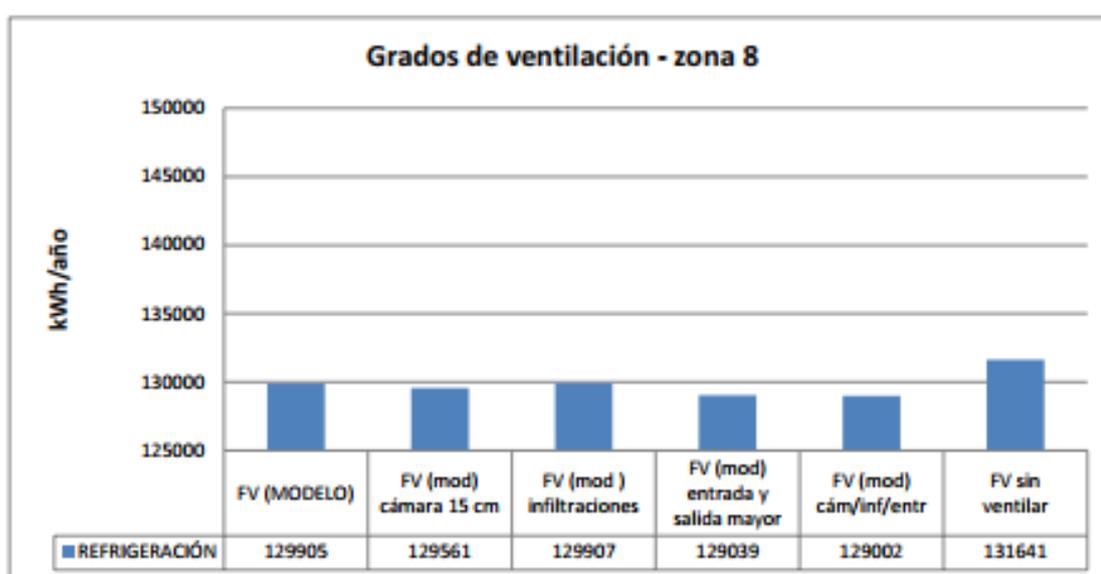
- Simulações com parede pesada e leve;
- Simulações com e sem isolante térmico;
- Simulações com e sem ventilação;
- Simulações com três larguras de câmara de ar;

- Simulações com juntas abertas e fechadas;
- Simulações com saídas e entradas de ar maiores;
- Simulações com baixa emissividade na câmara de ar;
- Simulações com revestimento exterior pesado e leve;
- Simulações com revestimento exterior na cor clara e escura;
- Simulações com diferentes entradas de ar na cavidade da câmara.

Para a zona 8 (cidade de Belém), a Fachada Ventilada Modelo (FVM) apresentou uma diminuição de 22,11% no consumo de energia em relação a fachada convencional de cerâmica aderida. Em relação à absorvidade, ao empregar uma cor clara ($\alpha = 0,20$) na FVM, alcançou-se uma redução de 2,45% no consumo energético.

A autora comparou a utilização do revestimento externo de madeira e cerâmico, por serem materiais bastante utilizados na região. O revestimento cerâmico se provou uma melhor opção para diminuição das demandas energéticas (Figura 29).

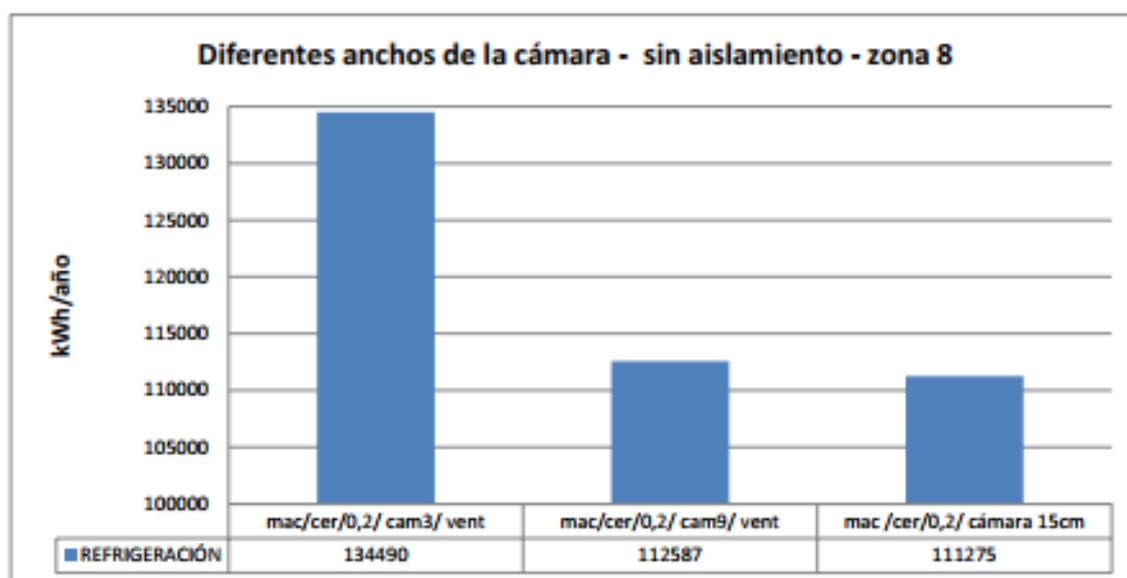
Figura 29 – Comparativo do consumo energético para fachada sem ventilação.



Fonte: Atem, 2016.

A largura da câmara de ar influencia no consumo energético, sendo que os melhores resultados foram alcançados sem o isolante térmico e para as larguras de 9 e 15 cm, como podemos observar na Figura 30 a seguir:

Figura 30 – Comparativo do consumo energético para diferentes larguras da câmara de ar.



Fonte: Atem, 2016.

Algumas conclusões parciais apresentadas pela autora sobre o desempenho térmico das fachadas ventiladas para zona brasileira bioclimática 8 são:

- A FVM apresenta um bom comportamento térmico em relação a fachada convencional de cerâmica aderida. No entanto, as temperaturas dentro da câmara de ar são altas e na zona 8 não existe inverno, prejudicando seu comportamento térmico;
 - A cor clara melhora um pouco o comportamento térmico;
 - Quanto maior câmara de ar melhor o desempenho energético, no entanto a diminuição no consumo é muito pouco;
 - Aumentar a quantidade de ar que circula na câmara de ar para 20 renovações ocasiona uma diminuição de 1% no consumo energético. No entanto, essa situação necessita de ventilação artificial;
 - A temperatura na câmara de ar influencia e deve ser o mais baixo possível;
 - Quando o isolamento térmico é grande, aumentar a largura da camada de ar não influencia em nada nas condições do interior da edificação. No entanto, quando não se tem isolamento, a câmara de ar com 3 cm possui uma maior demanda do que o modelo de 9 cm e 15 cm.

- O revestimento cerâmico diminui de 0,76% a 0,86% a demanda de energia em relação ao revestimento de painel metálico isolante de alumínio.

- A melhor configuração de fachada ventilada para zona 8 é a que apresenta: Parede com tijolo maciço; entradas e saídas de ar maiores (9 cm); revestimento externo em cerâmica clara e com baixa emissividade e câmara de ar com largura mínima de 9 cm.

Em suma, Atem (2016) obteve para a melhor configuração de FV para a zona 8, uma redução de aproximadamente 40% em relação ao sistema convencional aderido. O programa Trnsys 17 permite que a velocidade e a direção do vento local sejam previstas na simulação, diferentemente do EnergyPlus, que considera apenas a ventilação proveniente do efeito chaminé.

Maciel e Carvalho (2019) investigaram os benefícios das fachadas opacas em comparação aos da fachadas aderidas para diferenças edificações localizadas em nove diferentes zonas climáticas no Brasil, classificadas segundo Koeppen-Geiger. As pesquisadoras ainda investigaram o retorno financeiro do emprego de FV confrontando os benefícios financeiros oriundos da economia de energia proporcionada pelas FV com os custos mais elevados de instalação em comparação aos com a fachada cerâmica aderida tradicional.

O trabalho foi desenvolvido com o programa REVIT, da plataforma BIM da Autodesk para a modelagem da edificação. Para simulação energética foi empregado da mesma Autodesk, o programa Green Building Studio (GBS), que leva em consideração a ventilação natural potencial. Dentre as 16 cidades avaliadas, Belém foi escolhida. Os sistemas aderidos e não aderidos escolhidos empregaram como substrato alvenaria de blocos de concreto revestidos com argamassa.

Os melhores resultados para as FV foram para as cidades da zona climática Af, com as condições térmicas mais desfavoráveis. No caso de Belém, a economia de energia obtida em comparação ao da fachada aderida tradicional foi de cerca de 15%, proporcionando um retorno financeiro de 21 anos para FVJA de granito com insertos metálicos.

A diferença no uso de um determinado programa de simulação é um aspecto significativo. No caso das pesquisas de Mizger e Penso (2016) e Maciel e Carvalho (2019), em que pese terem empregado materiais de revestimentos diferentes, no

caso cerâmica e granito, os resultados foram extremamente diferentes. Para a cidade de Maceió, Mizger e Penso obtiveram que as FV resultaram em redução do ganho de calor em 4 a 6%, ao passo que no trabalho de Maciel e Carvalho a redução foi de 15%. No Energyplus, o módulo de Fachada Ventilada possui essa limitação quanto à direção local dos ventos. Entretanto, segundo Naboni (2007), os resultados são válidos no que tange ao ganho ou redução de carga térmica. Mas Mora-Peres et al (2014) observaram que para altas velocidades de vento (>1,5 m/s), que é o caso de Maceió, a influência do efeito chaminé é reduzido em comparação ao efeito do vento. Portanto, é possível que essas diferenças muito acentuadas nos resultados sejam por conta da limitação do programa *Energyplus* quanto à velocidade e direção do vento sobre as fachadas dos modelos.

2.2 NORMATIVAS DE DESEMPENHO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Os conceitos de conforto foram esquecidos pelos arquitetos após a segunda guerra mundial, pois houve uma expansão das técnicas construtivas, havia uma abundância de combustível e o uso de novas tecnologias se intensificou na construção civil. Entretanto, na década de 70, com a primeira crise energética e o aumento do preço do petróleo, surgiu a necessidade de produzir edificações com preocupação no consumo energético (OLIVEIRA *et al*, 2016).

Com a finalidade de alterar a evolução do consumo em relação à disponibilidade de energia, surgiram as primeiras normatizações de eficiência energética. Vários países começaram programas que incentivavam a diminuição de consumo de energia, o que resultou na criação de normas de eficiência energética (VINAGRE, 2013).

Alguns países como Estados Unidos e França, já haviam instituídos seus regulamentos de desempenho térmico e energético antes de 1990, a maioria dos países levaram em consideração a combinação de exigências prescritivas e de desempenho para elaborar as suas normativas (SORGATO *et al*, 2013).

Seguindo a tendência mundial o Brasil também desenvolveu normativas, programas e métodos para sistematizar e normatizar parâmetros sobre desempenho térmico e eficiência energética.

O Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE é um projeto do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), iniciado em 1984 para a conservação e racionalização da energia no Brasil, a partir do PB, o Brasil criou a lei de eficiência Energética – Lei nº10.295 de 2001 que estabelece avaliação compulsória da eficiência energética para máquina e equipamentos consumidores de energia, com a finalidade de estimular a competitividade industrial e produzir equipamentos mais eficientes energeticamente (OLIVEIRA, *et al*, 2016).

O programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações – Procel Edifica, foi criado em 2003 pela Eletrobrás visando promover o uso de forma racional da energia elétrica, reduzindo desperdícios e os impactos sobre o meio ambiente. O programa classifica as edificações em níveis sendo o nível “A” (mais eficiente) até o nível “E” (menos eficiente), dado a partir da avaliação e classificação de três sistemas. Desde 2014 o Brasil tornou obrigatório que os novos edifícios públicos federais com área maior que 500 m² sejam construídos com nível “A” (OLIVEIRA *et al*, 2016).

A normatização de desempenho térmico no Brasil iniciou-se com o desenvolvimento da primeira normativa sobre desempenho térmico a NBR 15220 (ABNT, 2005), devido à restrição de aplicabilidade apenas em edificações unifamiliar de interesse social, houve a necessidade de desenvolver uma norma de desempenho para edificações residenciais a NBR 15575 (ABNT, 2013), a norma estabelece requisitos mínimos de desempenho, vida útil e de garantia de sistemas construtivos. Dentre esses requisitos está o de desempenho térmico. A NBR 15575 foi revisada e teve sua versão final publicada em 2013 (SORGATO *et al*, 2013).

A **NBR 15220** estabelece o zoneamento bioclimático do Brasil, dividindo o país em 8 zonas e apresenta estratégias de projetos que devem ser adotadas para alcançar um melhor conforto térmico nas edificações de acordo com a zona onde a edificação está localizada. Essa norma é dividida em cinco partes:

A parte 1 apresenta definições, símbolos e unidades relacionadas ao desempenho térmico.

Na parte 2 da norma são estabelecidos os procedimentos para cálculo das propriedades térmicas quanto à resistência, capacidade térmica e transmitância dos componentes da edificação.

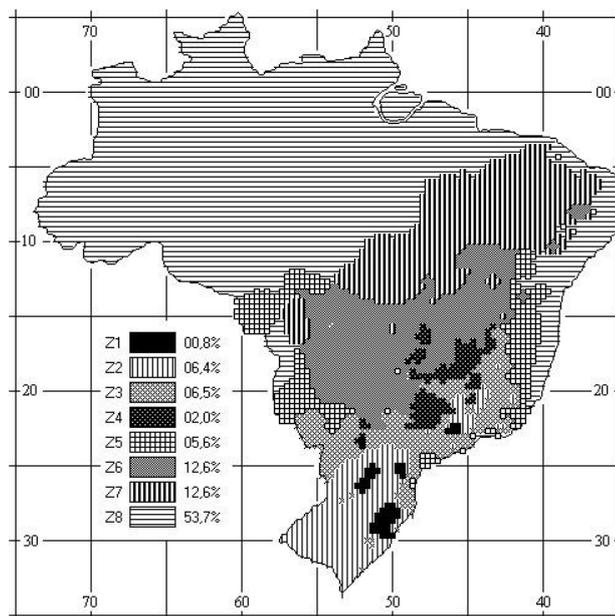
A parte 3 estabelece o zoneamento bioclimático brasileiro e as diretrizes projetuais/construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.

Já a parte 4 estabelece o método para determinação da resistência térmica e da condutividade térmica de materiais.

Por fim, na parte 5 encontramos um método para utilização de técnicas fluximétricas para medir a resistência térmica em regime estacionário, através do corpo de prova na forma de placas planas.

No zoneamento (Figura 31) estabelecido pela norma é definido o dia típico de inverno e o dia típico de verão, estabelecidos com base na temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação incidente. São indicadas 200 cidades que servem de referência para cidades próximas. A cidade de Belém está inserida na zona bioclimática 8 (Z8).

Figura 31 – Zoneamento bioclimático brasileiro



Fonte: NBR 15220 (ABNT), 2005.

A NBR 15575 trata sobre os requisitos mínimos para avaliação do desempenho de edificações residenciais, estabelecendo os critérios a serem utilizados nessa avaliação, os critérios de desempenho térmico estão na norma que é dividida em 6 partes:

- Parte 1 - aborda os requisitos gerais;
- Parte 2 - trata dos requisitos para os sistemas estruturais;
- Parte 3 - aborda os requisitos para pisos internos;
- Parte 4 - mostra os requisitos para vedações verticais e horizontais;
- Parte 5 - envolve os sistemas de cobertura;
- Parte 6 - fala sobre os sistemas hidrossanitários.

A NBR 15575 estabelece dois procedimentos para a avaliação térmica em uma edificação, sendo um normativo e outro informativo. O procedimento normativo caracteriza-se por dois métodos: Simplificado e simulação computacional. O procedimento informativo é realizado com medição *in loco*. Abaixo são apresentados os procedimentos estabelecidos pela norma para a avaliação do desempenho térmico de uma edificação.

Procedimento 1 – Simplificado (normativo): Verificação dos requisitos e critérios de fachadas e coberturas em consideração a NBR 15220. Serve para verificar o atendimento aos requisitos e critérios para o envelopamento da obra, com base na transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT). Esse procedimento é obrigatório.

Procedimento 2 – Simulação (normativo): Verificação se foram atendidos os requisitos e critérios estabelecidos na parte 1 da norma, através de simulação computacional do desempenho térmico. Esse procedimento é considerado mais detalhado, sendo obrigatório quando os dados verificados no procedimento 1 não atendem os requisitos mínimos da norma ou quando pretende-se avaliar mais detalhadamente um sistema construtivo. É utilizado para classificar os sistemas de fachadas em nível Mínimo (M), Intermediário (I) e Superior (S).

Procedimento 3 – Medição (informativo): Verificação através da realização de medições *in loco*.

A edificação deve apresentar condições térmicas no interior da edificação iguais ou melhores que as do ambiente externo, no período de verão.

2.2.1 Críticas às normas

Após a publicação das normas sobre desempenho, alguns autores apresentaram propostas de melhorias, adaptações e apontamentos sobre limitações das normativas brasileiras.

Santos *et al* (2013) realizaram uma investigação sobre os parâmetros de desempenho térmico para ambientes ventilados, definidos na NBR 15575, com uso de *software* e com foco no conforto térmico do usuário, na pesquisa utilizaram a zona bioclimática 8 (NBR 15220-3) por ter maior abrangência territorial e ter como definição de estratégias de projeto aberturas maiores para ventilação natural.

Para os autores, os resultados e os critérios adotados pela NBR 15575 são inadequados, pois adota a simulação de apenas um dia – denominado de dia típico de projeto de verão - sendo o dia de situação extrema nos valores máximos de temperaturas. Os resultados demonstraram que a simulação para um dia não é o suficiente para definir o nível de desempenho da edificação, pois ao ser ampliado o período de análise houve oscilações no nível da classificação.

A pesquisa comprovou que a presença de usuários e cargas térmicas com iluminação influencia no desempenho térmico do ambiente. Assim, a descon sideração desses fatores pela NBR 15575 gera resultados distorcidos.

Sorgato *et al* (2013) propuseram um novo método de simulação para verificar o desempenho térmico de edificações residenciais naturalmente ventiladas. No método proposto, a edificação deveria levar em consideração: as cargas internas dos ambientes internos de permanência prolongada; um padrão de ocupação, um padrão de uso do sistema de iluminação, estratégia de ventilação e atender os limites estabelecidos no método prescritivo da NBR 15575 para valores de transmitância térmica.

O critério de avaliação de desempenho térmico no método, proposto por Sorgato *et al* (2013), seria através dos critérios de graus-hora de resfriamento ($^{\circ}\text{Ch}_R$) e graus horas de aquecimento ($^{\circ}\text{Ch}_A$), onde os indicadores de $^{\circ}\text{Ch}_R$ e $^{\circ}\text{Ch}_A$ dos ambientes devem ser iguais ou menores que os graus-hora de resfriamento e graus-hora de aquecimento.

Segundo os autores, a simulação do desempenho por meio de um dia típico desconsidera a variação do clima, importante para algumas regiões do Brasil. Com a

avaliação anual é possível determinar adequadamente as estratégias bioclimáticas para o clima onde a edificação está inserida.

Silva e Ghisi (2014) compararam os resultados do desempenho térmico de uma edificação residencial de acordo com RTQ-R (Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais) e NBR 15575 por simulação computacional. Os autores concluíram que existe uma discordância de valores entre as simulações dos dois métodos. O consumo com aquecimento pelo método do RTQ-R e pelo método da ABNT NBR 15575, foram as que apresentaram maior divergência. A falta de cargas internas (ABNT NBR 15575) e a simplificação das cargas internas para realizar simulações de dias típicos podem ser as causas da discordância entre os métodos de simulação.

De acordo com Bogo (2016), a ABNT NBR 15220-3 não contempla algumas diretrizes construtivas para o clima subtropical, encontrado no Sul do Brasil.

Para a zona bioclimática 3 a norma não apresenta como estratégia para o verão o sombreamento das aberturas, o autor atribui o fato de que o Método de Givoni (adotado na formulação da norma) não contempla estratégia de controle solar. Outra limitação apontada por Bogo (2016) é o fato de serem classificadas em uma mesma zona climática cidades com altitudes bastante diversas, fato esse que ocorreu devido à falta de refinamento do zoneamento bioclimático da norma, pela falta de dados climatológicos ou abrangência de um maior número de cidades.

Já a NBR 15575, para o autor, apresenta algumas limitações, uma delas refere-se à inexistência de exigências quanto à capacidade térmica para coberturas, pois a cobertura não proporciona um retardo térmico mínimo, que contribui para a redução das temperaturas internas do ar.

2.3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Com o avanço da tecnologia foram desenvolvidos softwares específicos para diversas áreas do conhecimento. Na arquitetura essas tecnologias influenciaram no processo de projeto de edificações, havendo atualmente diversos instrumentos para modelagem e simulação gráfica que auxiliam na concepção do projeto e avaliação da proposta final que obtenha os níveis de eficiência energética (OLIVEIRA, et al, 2016).

Os programas mais modernos e complexos como o *EnergyPlus*, *Fluent* e o *CFX*, conseguem representar detalhadamente os fluxos de calor e o escoamento de ar nas edificações. No entanto, por tratarem de fenômenos complexos, essas ferramentas ainda são aplicadas apenas em centros de pesquisas em universidades, havendo pouca transferência de tecnologia para os escritórios de projetos. A complexidade das ferramentas e a falta de programas nacionais são as causas da fraca disseminação no Brasil de *softwares* que lidam com eficiência energética em edificações. (MENDES, *et al*, 2005).

As simulações possuem algumas limitações, já que os dados de entrada utilizados podem não ser fieis, o que pode ocasionar resultados distintos aos reais da edificação. Portanto, se faz necessário a calibração do modelo computacional, para obter resultados mais precisos (BARBOSA E GHISI, 2017).

2.3.1 *EnergyPlus*

O *EnergyPlus* é um programa computacional que foi criado a partir dos programas *BLAST* e *DOE-2*, na década de 1980, distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, foi desenvolvido para simulação de cargas térmicas e análise energética de edificações e seus sistemas. O público-alvo são os engenheiros e arquitetos que desejam dimensionar equipamentos adequados de HVAC, desenvolver estudos para análise de custo de vida de edificações, otimizar o desempenho energético (*ENERGYPLUS*, s/d)

O *EnergyPlus* é um programa que permite simular o comportamento térmico e energético de uma habitação em questões de aquecimento, arrefecimento, iluminação, ventilação e energia, possibilitando uma análise das várias características. No entanto, ele não possui uma interface de fácil acesso ao utilizador, além de ser necessária a introdução de uma série de dados (*input*) de forma a ser possível a obtenção dos resultados pretendidos (*outputs*) (SILVA, 2010).

Para Silva (2010), a utilização do *software* resume-se em três etapas. Primeiro é necessário criar o modelo no programa, introduzir os dados para definição do edifício, geometria, dimensões e constituição. Segundo o programa corre a simulação calculando o proposto pelo utilizador, a partir dos dados climáticos propostos pelo mesmo. Por fim, é necessário analisar os resultados e tiram-se as

conclusões, elaborando, se for o caso, análises de sensibilidade das várias variáveis inerentes ao edifício.

O programa aperfeiçoa o cálculo de eficiência energética bem como o estudo das temperaturas, condições de conforto e a demanda dos sistemas de refrigeração. O *EnergyPlus* é uma das ferramentas mais potentes no que diz respeito a simulação e avaliação de conforto térmico e eficiência energética. No entanto, sua interface não é amigável, necessitando certa experiência na sua utilização. Para minimizar essa deficiência, alguns *softwares* fazem interação com o programa como é o caso do *Open Studio*, *Euclides* e *Designer build*.

2.3.2 Calibração

A simulação computacional de uma edificação possui algumas limitações, pois os dados de alimentação do modelo podem não ser fiéis aos dados reais, o que pode acarretar em resultados distintos da realidade. Portanto, uma simulação eficaz é a combinação dos conhecimentos dos fenômenos físicos e o domínio da ferramenta de simulação, sendo necessário refinar o modelo numérico em uma simulação, para que essa possa representar com maior precisão possível, o desempenho do edifício analisado, esse processo de refinamento é chamado *calibração do modelo computacional* (FERNANDES e LABAKI, 2015).

Vários trabalhos desenvolveram métodos de calibração de modelos computacionais, sendo que a maioria dos trabalhos se concentra no desempenho energético da edificação. Podemos destacar os trabalhos de Galvarro *et al* (2013), Fernandes e Labaki (2015) e Barbosa e Ghisi (2017). Os trabalhos destacados compararam resultados coletados *in loco*, através de monitoramentos, com valores simulados. Os modelos devem sofrer alterações nos seus dados de entrada para que os resultados simulados se aproximem aos valores monitorados.

Galvarro *et al* (2013) apresentaram um processo de calibração térmica para validar um modelo computacional de uma unidade habitacional na cidade de Viçosa-MG. O trabalho utilizou para análise dos dados medidos e simulados o erro quadrático médio (EQM) e o viés médio (viesM), sendo o EQM utilizado para evidenciar o erro entre as grandezas analisadas e o viesM serviu para identificar as ações de calibração a serem adotadas nas simulações seguintes. As variáveis analisadas pelos autores foram temperatura radiante média, temperatura de bulbo

seco e a umidade relativa. Os autores alcançaram uma redução nas incertezas do modelo alterando passo a passo determinados parâmetros como aumento do coeficiente de descarga, redução da densidade e condutividade do tijolo da parede, alteração da densidade e condutividade da cerâmica de revestimento, inserção das absorções medidas *in loco* do piso e inserção das absorções medidas *in loco* das paredes internas. Os autores concluíram que é importante registrar o máximo possível as características da edificação estudada para que se possa alimentar o modelo.

Fernandes e Labaki (2015) apresentaram o procedimento adotado para calibração de temperaturas internas e consumo energético de um edifício institucional. As autoras realizaram a calibração do modelo computacional através do monitoramento da temperatura interna e do sistema elétrico da edificação e o tratamento dos dados obtidos foram realizados por uma análise de sensibilidade. Os indicadores estáticos para calibração utilizados foram recomendados pela ASHARAE, sendo eles o “*coefficient of variation of the root mean squares error*” e o “*Normalized Mean Bias error*”. As autoras concluíram que, apesar de algumas limitações, é possível elaborar modelos computacionais que apresentem desempenhos aproximados à realidade.

Barbosa e Ghisi (2017) apresentaram uma proposta de calibração de um modelo computacional de uma tipologia de residência unifamiliar. O trabalho foi realizado em três etapas: monitoramento da residência, definição do modelo computacional e análise dos dados. Na calibração foram comparados os valores de temperatura de ar obtido na simulação do modelo com os valores obtidos no monitoramento da edificação, assim o modelo sofreu modificações até que o valor de temperatura fosse igual ou próximo da temperatura monitorada. Os autores modificaram cinco dados que influenciam na calibração do modelo de um sobrado: geometria da cobertura, adição de entorno, absorção das superfícies, resistência térmica dos materiais e infiltração de ar.

Os autores encontraram influências significativas de calibração do modelo, sendo eles: adição de entorno, o aumento em 15% no valor da resistência térmica de envoltória e a alteração da absorção da envoltória. Os demais parâmetros alterados foram considerados insignificantes na calibração do modelo.

3 METODOLOGIA

Para compreender o comportamento do sistema de fachada ventilada quando comparado ao sistema aderido e aferir o consumo energético utilizado nos dois sistemas é necessário investigar os fenômenos de troca de calor através dos componentes opacos da envoltória. Assim, a condição dos ventos locais, o tipo de densidade, a cor dos elementos da fachada e o consumo de energia para o sistema tem que ser avaliado conjuntamente (PENSO, 2017).

Para o estudo, será considerado o clima da cidade de Belém- PA (latitude 1,45°S, longitude 48,47°W e altitude de 10 metros), que segundo a norma ABNT NBR 15220 (ABNT, 2005), está localizada na zona bioclimática ZB8.

Para comparação do desempenho energético do uso dos sistemas de fachada ventilada e aderida, será utilizada a carga térmica de um modelo onde serão alteradas as configurações do revestimento de envoltória.

O programa utilizado para a simulação é o *Energyplus*, no entanto, para modelagem da edificação será utilizado o programa *Sketchup* com extensão *Euclid* que permite integração entres os dois *softwares*.

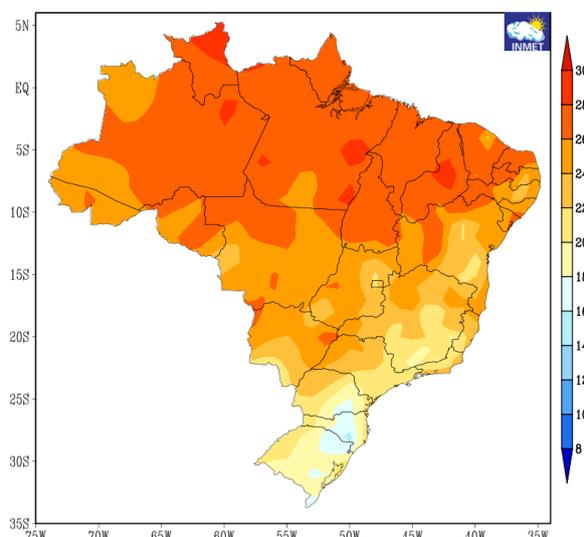
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA DA CIDADE DE BELÉM-PA

A região de Belém está localizada às margens da Baía do Guajará, na confluência com o Rio Guamá à aproximadamente 120 km do Oceano Atlântico, possuindo uma área de 719 km², com altitude média de 12 m. Tem como principal característica fisiográfica, a baixa altitude e a presença de inúmeros pequenos corpos de água (furos e igarapés), os quais associados à baixa latitude condicionam à região um ambiente climático quente e úmido (BASTOS, *et al*, 2002).

A cidade de Belém é caracterizada por apresentar altos índices pluviométricos devido à sua proximidade com a linha do equador. O clima em Belém tem influência direta da floresta amazônica, de seus rios e de sua proximidade com o oceano Atlântico. Sendo uma região onde as chuvas são constantes, a cidade apresenta duas estações: estação chuvosa (dezembro a maio) e estação menos chuvosa (junho a novembro) de acordo com Moraes e Filho (2018).

A temperatura anual média, registrada pelo INMET no ano de 2018, foi na faixa dos 26°C e 28°C (Figura 32) e as temperaturas máximas ficaram acima dos 30°C o ano todo.

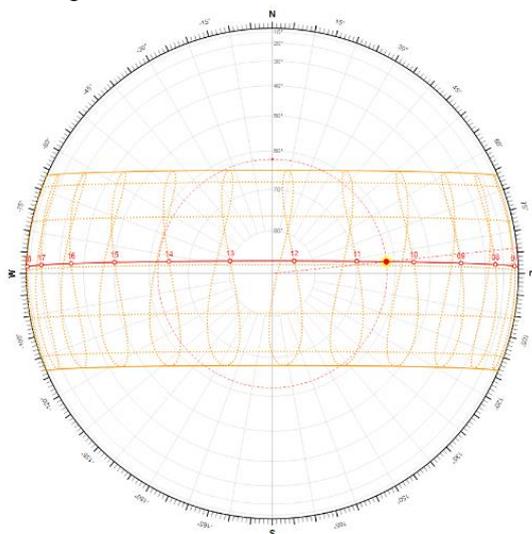
Figura 32 – Temperaturas médias observadas para o ano de 2018.



Fonte: INMET, 2019.

A Figura 33 apresenta a carta solar para a cidade de Belém, onde podemos perceber que para a incidência de radiação a cidade de Belém apresenta uma simetria, ou seja, as orientações norte e sul apresentam quase a mesma exposição à radiação solar. Na cidade de Belém o período diurno e o noturno possuem praticamente a mesma quantidade de horas.

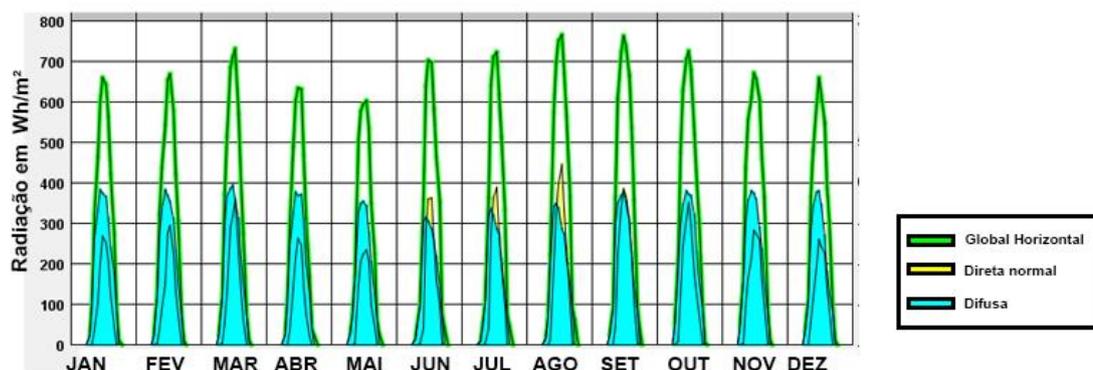
Figura 33 – Carta solar da cidade de Belém.



Fonte: andrewmarsh.com. Acesso em 2019.

No Gráfico 1 observa-se as radiações solares mensais da cidade de Belém, dados retirados do arquivo climático 816800 do INMET (2018) e lido pelo *Software Climate Consultat 6.0*. A média de radiação global horizontal é de aproximadamente 361 Wh/m², tendo máxima de 416 Wh/m² e mínima de 313Wh/m².

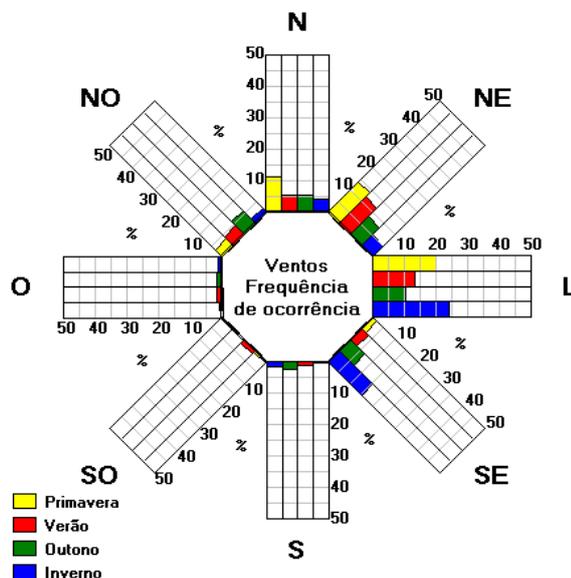
Gráfico 1 – Radiação direta normal, radiação global horizontal e radiação difusa para a cidade de Belém.



Fonte: Adaptado de *Software Climate Consultat 6.0* e arquivo climático INMET, 2018.

A incidência de ventos na cidade de Belém provém prioritariamente da orientação Leste (Figura 34), seguido pela Nordeste e Norte. As maiores velocidades dos ventos são alcançadas nas orientações Norte e Noroeste, com velocidades de 4 a 5m/s (Figura 35), principalmente nos meses de setembro, outubro e novembro.

Figura 34 – Frequencia de ocorrência de ventos



Fonte: Adaptado de *Software SOL-AR*, 2019.

modelo de estudo para esta pesquisa um edifício residencial localizado em uma área central da cidade. A escolha foi realizada levando em consideração as características da edificação, pois segundo a literatura (STAZI *et al*, 2014; LABATI *et al*, 2012), o sistema de fachadas ventiladas alcança seu melhor desempenho em edificações que possui maiores alturas, pois essas sofrem maiores influência do vento. Outro aspecto é o custo de implementação deste sistema em edificações. Trata-se de uma edificação multifamiliar de alto padrão, na qual o custo de instalação da fachada ventilada pode ser absorvido pelo custo total da obra.

O edifício escolhido para análise está localizado na Rua João Balbi, bairro de Nazaré, na cidade de Belém (Figura 37). A fachada principal da edificação está orientada para o sul. O edifício possui 29 pavimentos distribuídos em subsolo, dois níveis de garagem, um pavimento de lazer, 23 pavimentos tipo, além do barrilete. O pavimento tipo da edificação possui duas unidades habitacionais e cada unidade é dividida em sala de estar, gabinete, lavabo, cozinha, duas suítes com closet, uma suíte, cozinha, área de serviço e suíte de empregada, perfazendo um total de 152,46m² de área útil (Figura 38). A Tabela 2 apresenta as características dos ambientes de uma unidade do pavimento tipo, área da fachada (m²), volume do ambiente (m³) e o pé-direito do ambiente.

Tabela 2 – Características dos ambientes do pavimento tipo.

(continua)

Ambiente	Área do ambiente (m ²)	Área da fachada (m ²)	Volume do ambiente (m ³)	Pé-direito
Sacada	29,47	-	87,82	2,98
Sala	29,77	22,47	88,71	2,98
Gabinete	8,03	15,347	23,93	2,98
Lavabo	2,38	3,278	7,09	2,98
Galeria	4,23	-	12,61	2,98
Cozinha	10,45	-	31,14	2,98
Á. Serviço	4,41	4,5296	13,14	2,98
Dep. De empregada	4,18	5,662	12,46	2,98

(conclusão)

Ambiente	Área do	Área da fachada	Volume do	Pé-direito
----------	---------	-----------------	-----------	------------

	ambiente (m ²)	(m ²)	ambiente (m ³)	
Bh° empregada	2,27	-	6,76	2,98
Circulação	3,2	-	9,54	2,98
Suíte 01	12,22	8,4632	36,42	2,98
Bh° 01	2,76	3,576	8,22	2,98
Closest 02	4,67	0	13,92	2,98
Suíte 02	11,2	8,2844	33,38	2,98
Bh° 02	2,73	10,43	8,14	2,98
Closest 03	6,24	-	18,60	2,98
Bh° 03	4,27	4,6488	12,72	2,98
Suíte 03	12,06	8,7016	35,94	2,98

Fonte: Autor do trabalho.

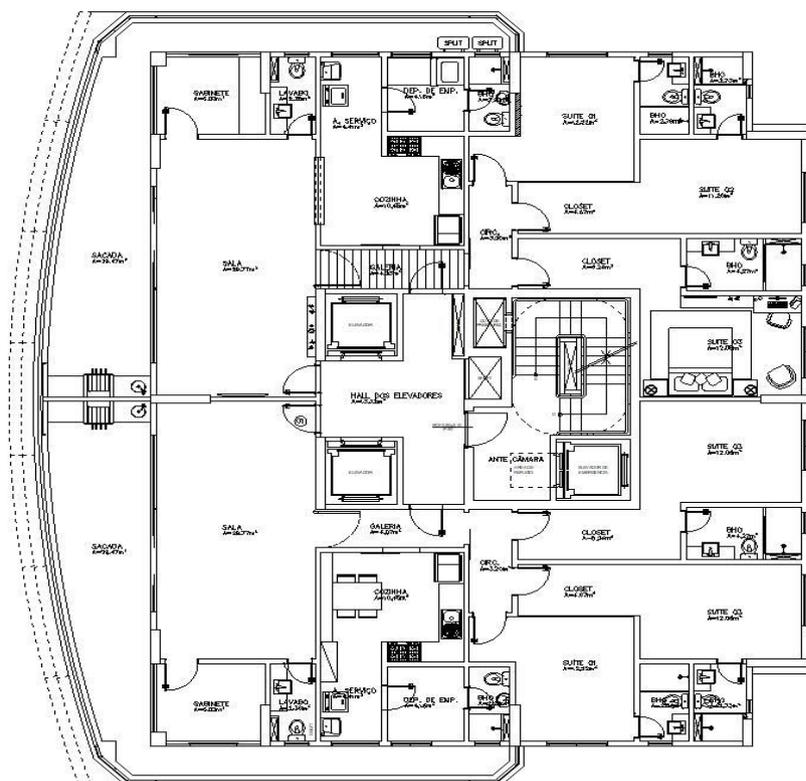
No estudo foi escolhida para avaliação uma unidade habitacional localizada no 23° pavimento que possuía uma unidade de permanência prolongada (dormitório), com uma das suas fachadas voltadas para a orientação oeste. Isto permitirá a análise do pior cenário em termos de ganhos térmicos por irradiação solar (Figura 39).

Figura 37– Foto da edificação e do entorno.



Fonte: Google Earth. 2018.

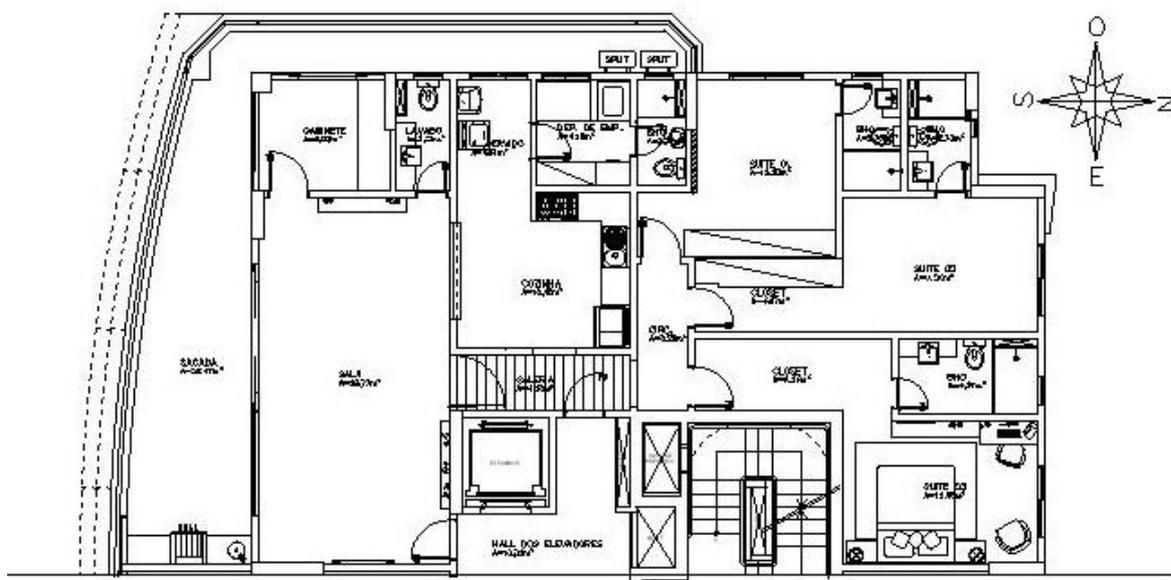
Figura 38 – Planta baixa pavimento tipo.



PLANTA BAIXA

Fonte: Adaptado de Porte Engenharia, 2018.

Figura 39 – Planta baixa unidade habitacional estudada.

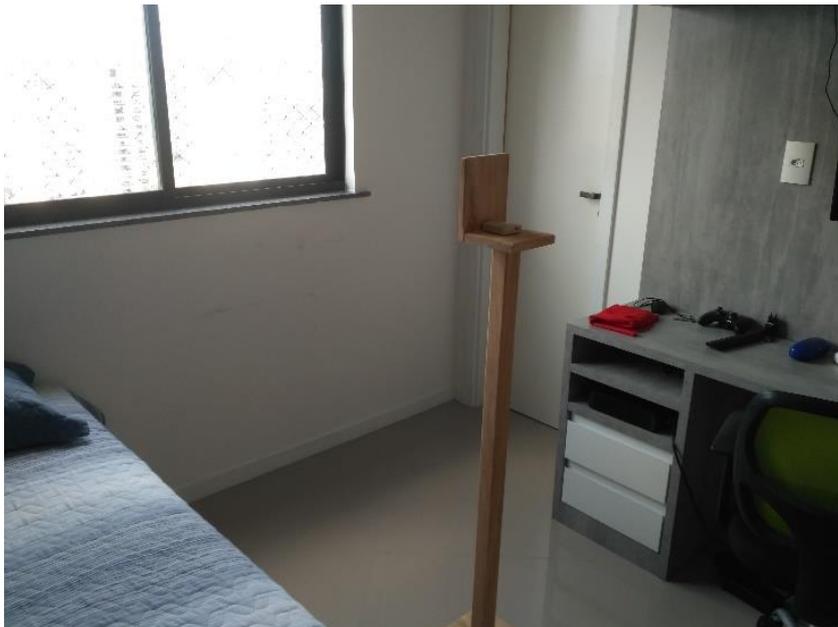


PLANTA BAIXA

Fonte: Adaptado de Porte Engenharia, 2018.

No dormitório, o equipamento foi posicionado próximo a área central do quarto, disposto sobre um suporte de madeira com proteção contra a ação direta da luz solar (Figura 42). O equipamento externo foi alocado na varanda do apartamento, protegido por uma caixa de papelão com revestimento em papel alumínio e com pequenas aberturas nas laterais para permitir a ventilação (Figura 43).

Figura 42 – Monitoramento do ambiente interno da edificação.



Fonte: Autor do trabalho.

Figura 43 – Monitoramento externo da edificação.



Fonte: Autor do trabalho.

As medições foram realizadas durante cinco dias, no período de 14 e 19 de dezembro de 2018 no 19º pavimento tipo da edificação, o ambiente monitorado foi o dormitório 01 destacado na Figura 40. Os medidores registraram os dados de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar para intervalos de 15 em 15 minutos. A janela e as portas do ambiente permaneceram fechadas durante o período de medição.

Os resultados de temperatura obtidos na simulação do modelo foram comparados com os valores monitorados *in loco*. Como proposto por Barbosa e Ghisi (2017), foram aplicadas variações nos dados de entrada com a finalidade de aproximar os valores simulados aos monitorados, sendo estas modificações avaliadas através dos indicadores estáticos de desvio médio e erro quadrático médio, conforme mostrado nas equações 1 e 2.

$$Dm = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)}{N} \right] \quad (1)$$

$$EQ = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Onde:

Dm é o desvio médio entre temperaturas (°C);

Yi é a temperatura horária simulada (°C);

Xi é a temperatura horária monitorada (°C);

N é o número de observações (adimensional);

EQ é o erro quadrático médio (°C).

Para avaliar se o modelo está dentro dos padrões aceitos pela ASHRAE, foram utilizados também os indicadores estatísticos *Coefficient of Variation of the root Mean Squares Error*, CV (RMSE) e *Normalized Mean Bias Error* (NMBE). Estes critérios não consistem em uma metodologia, mas em uma medida da qualidade da calibração. Valores baixos de CV (RMSE) indicam menor variância entre os dados simulados e monitorados, portanto uma melhor qualidade do modelo (AGUILLAR,

2018). O modelo é considerado dentro dos limites aceitos pela ASHARE se CV (RMSE) e NMBE estiverem dentro dos limites de 30% e 10% respectivamente.

Para a calibração do modelo foram avaliadas 6 situações, onde se aplicou algumas variáveis. O caso 00 é considerado a modelo base, no qual considera as características térmicas da edificação modelada de acordo com a NBR 15220. No caso 00 foram realizadas duas alterações nos dados originais do arquivo *TRY* (formato. epw) do modelo. Na primeira situação (Caso 00A), os dados inseridos foram os dados climáticos do arquivo INMET 2018 (dados medidos nas estações automáticas do INMET, com extensão epw) disponíveis no Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE). Na segunda situação (Caso 00B), os dados de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar (UR) foram substituídos pelos valores monitorados *in loco* na parte externa da edificação nos dias 14 à 19 de dezembro de 2018.

A partir desses dois casos foram realizadas variações nos valores de resistência térmica dos materiais das vedações verticais do modelo, que foram obtidos da norma NBR 15.220-2, valores indicativos. Segundo Pereira *et al* (2013), o aumento e a diminuição em 15% da resistência térmica é o suficiente, pois a variação da transmitância térmica dos materiais é linear em relação ao desempenho térmico, não havendo a necessidade de avaliação de outros valores.

No Caso 01A a resistência dos materiais foi aumentada em 15% em relação aos valores de referência da ABNT NBR 15520, o arquivo. epw possuía os dados climáticos obtidos do INMET 2018 e a transmitância térmica (U) da parede considerada foi de 1,815 W/m²·K. Para o caso 01B, o aumento de 15% na resistência dos materiais foi mantido, bem como seu valor de U, mudando apenas o arquivo .epw, que foi modificado com os dados monitorados *in loco*.

Aos casos 02A e 02B foram aplicados a redução de 15% na resistência dos materiais das paredes, obtendo um U= 1,725 W/m²·K para ambas as situações, tendo como variação arquivo. epw com dados INMET e medido *in loco* respectivamente. A Tabela 3 mostra os valores de desvio médio, erro quadrático e valor de amplitude térmica dos casos analisados.

Tabela 3 – Valores de desvio médio, erro quadrático e amplitude térmica.

CASOS	ARQUIVO CLIMÁTICO	DESVIO MÉDIO	ERRO QUADRÁTICO MÉDIO	AMPLITUDE SIMULAÇÃO
00A	Modificado INMET	0,37	0,60	2,76
00B	Modificado <i>In loco</i>	0,04	0,46	3,36
01A	Modificado INMET 2018	0,38	0,61	2,77
01B	Modificado <i>In loco</i>	0,04	0,46	3,37
02A	Modificado INMET 2018	0,35	0,59	2,74
02B	Modificado <i>In loco</i>	0,02	0,46	3,35
02	INMET TRY	0,16	0,74	4,07

Fonte: Autor do trabalho.

Dos seis casos avaliados, o caso 02B foi o que apresentou menores valores de erro quadrático e desvio médio, sendo o terceiro menor na diferença de amplitude térmica. Em relação os parâmetros recomendados pela ASHARE, todos os casos avaliados atendem os requisitos de CV (RMSE) e NMBE, podendo ser considerados calibrados. Assim foi adotado para a simulação dos 3 tipos de fachadas o modelo calibrado 02B.

Na Tabela 4 é apresentado os dados termofísicos utilizados no modelo calibrado que foi adotado para a simulação dos sistemas de fachadas.

Tabela 4 – Dados termofísicos dos materiais .

Material	Rugosidade	Espessura (m)	Condutibilidade (W/m-K)	Densidade (kg/m ³)	Calor Específico (J/kg-K)
	Rugosidade				
Tijolo	Média	0,015	85	1800	920
	Rugosidade				
Tijolo	Média	0,010	85	1800	920
Concreto	Rugoso	0,080	1,75	2400	1000

(continua)

(conclusão)

Material	Rugosidade	Espessura (m)	Condutibilidade (W/m-K)	Densidade (kg/m ³)	Calor Específico (J/kg-K)
	Rugosidade				
MDF	Média	0,030	0,20	1000	2300
Argamassa	Rugoso	0,025	0,9775	2100	1000
	Rugosidade				
Placa Cerâmica	Média	0,010	0,85	1800	920
Alumínio	Liso	0,00018	230	2700	880
	Liso				
Manta Asfáltica		0,0040	0,43	1600	920
Contrapiso	Rugoso	0,050	1,15	2100	1000
	Rugosidade				
Piso Cerâmico	Média	0,010	1	1800	920
	Rugosidade				
Gesso	Média	0,02	0,35	750	840

Fonte: Autor do trabalho.

3.4 SIMULAÇÃO

3.4.1 Considerações gerais

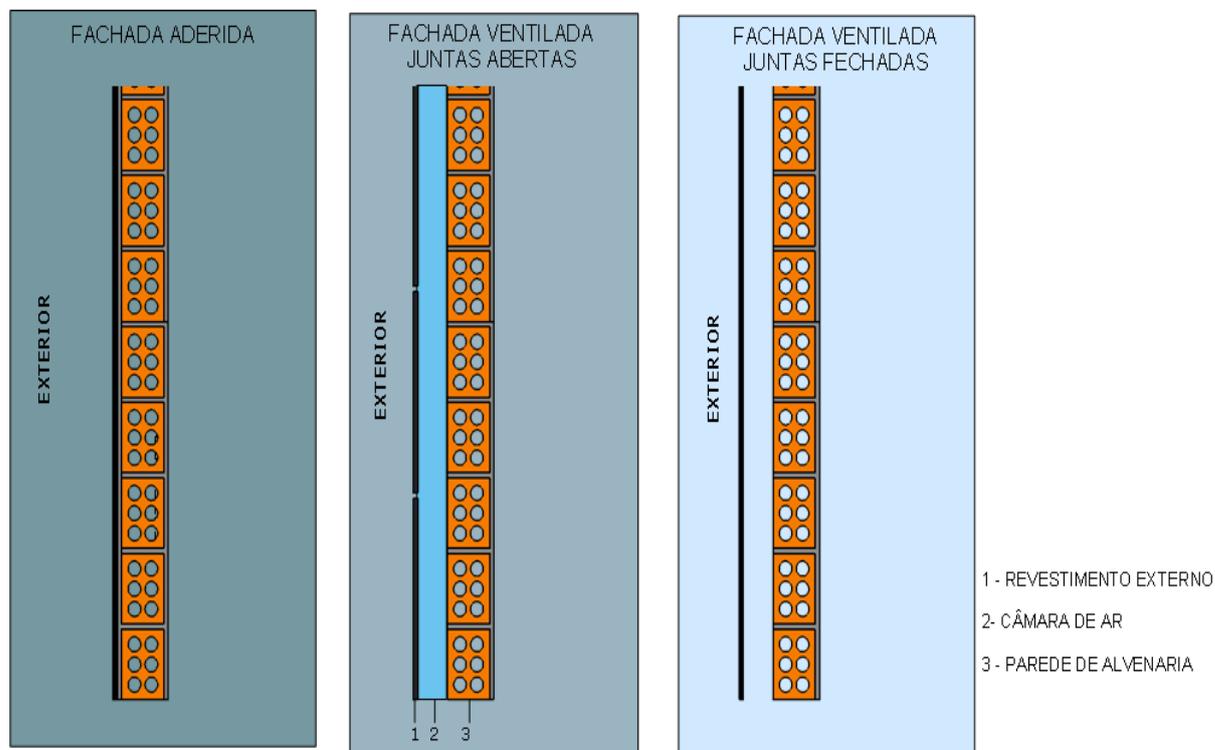
O Brasil possui dois métodos para avaliar através de simulação computacional o desempenho térmico de edificações residenciais, sendo que ambos possuem abordagens distintas para classificação do nível de eficiência energética. O primeiro é prescrito na norma ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2013), no qual o ambiente proposto pela norma deve estar desocupado e sem ganhos térmicos devido ao uso de equipamentos ou iluminação artificial. Além disso, deve ser adotado o dia típico de verão ou de inverno. Esse critério vai de encontro ao desempenho térmico de um ambiente que está relacionado com o conforto do usuário (SANTO *et al*, 2013).

O outro método está contido no RTQ-R, esse método leva em consideração o padrão de ocupação, padrão de iluminação, cargas internas de equipamento, temperatura operativa e utiliza o indicador de graus-hora para classificação da edificação, considerando os dados climáticos da cidade em questão.

Por se adequar melhor ao objetivo do trabalho, as simulações foram realizadas de acordo com as especificações do método de simulação do RTQ- R (INMETRO, 2012), pois este estabelece parâmetros importantes para a modelagem da edificação. As simulações foram realizadas para duas condições: uma para a **edificação naturalmente ventilada** e a outra para a **edificação condicionada artificialmente**.

Em ambos os casos foram estudados três tipos de envoltória, sendo a primeira o próprio sistema empregado no edifício em estudo, no caso o revestimento cerâmico de fachada aderido (FAD) ao sistema de argamassas de revestimentos (chapisco e emboço). A segunda envoltória avaliada foi o sistema de revestimento não aderido do tipo fachada ventilada com placas de porcelanato com afastamento médio de 7 cm do substrato nas condições de juntas abertas (FVJA) e juntas fechadas (FVJF). Neste caso será considerado um substrato de alvenaria cerâmica (Figura 44).

Figura 44 – Representação esquemática dos tipos de envoltórias estudadas.



Fonte: Autor do trabalho.

Três tipos de variáveis de controle foram aplicadas ao modelo, o tipo de cor da superfície cerâmica (absortividade 0,30 para cor clara e 0,90 para cor escura), o

sombreamento ou não das esquadrias (janelas) e dois regimes de abertura das esquadrias. Neste caso, o primeiro regime consiste em as esquadrias ficarem fechadas no período da tarde, das 12h00 às 18h00, e aberta até às 12h00 com a finalidade de garantir a ventilação natural no período da manhã, bem como no período da noite. Segundo Gomes (2007), os períodos noturnos são estatisticamente relevantes, pois na cidade de Belém a temperatura interna tende a ficar maior que a externa durante o período noturno. No segundo regime, as janelas dos quartos ficaram fechadas na modelagem no período de 00h00 às 6h00 e abertas no restante do dia com a finalidade de garantir ventilação durante o dia todo, principalmente nos horários de maior temperatura interna. Todavia, neste regime as janelas ficaram fechadas durante a noite, não se aproveitando da ventilação noturna.

Vale salientar que para cada situação, sombreado e não sombreado há duas situações, esquadria fechada (sem ventilação) e aberta com área útil de ventilação de apenas 50%, tendo em vista a característica da esquadria empregada, de correr com duas folhas, sendo uma fixa.

No caso do sistema não aderido, além das variáveis de controle consideradas, avaliou-se o tipo de junta a ser empregado. No primeiro caso, a situação da cavidade de ar confinada (não ventilada, com as juntas vedadas com silicone) e no segundo caso, com as juntas abertas (ventilada, levando em consideração o efeito chaminé).

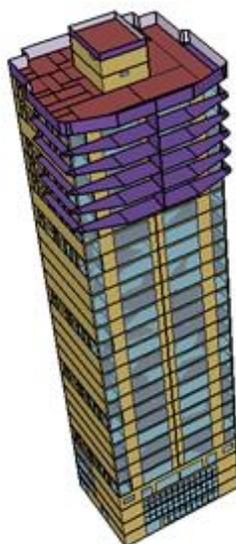
As simulações foram realizadas através do *software EnergyPlus* versão 8.7, no qual foram considerados os dados climáticos da cidade de Belém do Pará, contidos no arquivo *TRY (Test Reference Year)*, disponibilizado na página eletrônica do LABEEE².

Para a geometria do modelo simulado foi considerada a região vertical do bloco principal da edificação (Figura 45). As varandas da edificação, por não possuírem vedações verticais, foram consideradas como elementos de sombreamento e para fins de eficiência optou-se por simplificar o modelo, diminuindo o número de elementos de sombreamentos (varandas) em relação ao existente na edificação real, mantendo os elementos de sombreamento relevantes em termos de comportamento térmico para a avaliação desenvolvida. Optou-se também por

² Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>

simplificar a modelagem das esquadrias, bem como a quantidade de zonas térmicas de alguns pavimentos, pois esses não exercem influência direta em termos de comportamento térmico para a unidade habitacional estudada.

Figura 45 –Geometria do modelo utilizado nas simulações.



Fonte: Autor do trabalho.

3.4.2 Configuração dos sistemas de fachadas no *EnergyPlus*

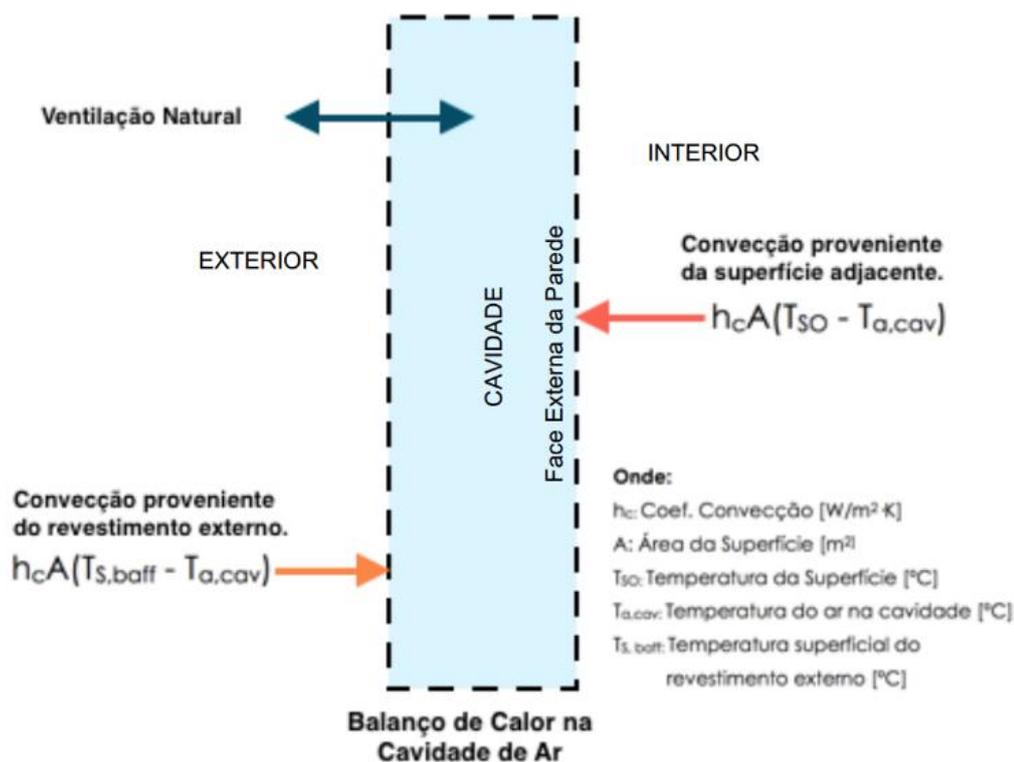
Na simulação, adotou-se como padrão de uso a ventilação natural a partir do grupo *AirflowNetwork* do *EnergyPlus*. Este grupo é baseado em uma abordagem de rede de trabalho que deve ser construída corretamente pelos usuários, sendo necessário que os inseridos formem alguns caminhos e estejam conectados uns aos outros (GU, 2007, p. 969).

A caracterização climatológica da cidade de Belém foi inserida por meio do arquivo climático em formato. EPW disponível no *Test Reference Year (TRY)* do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), disponibilizado no site do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade de Santa Catarina.

No que tange a representação do sistema de FVJA no modelo computacional, utilizou-se o grupo *Surface Property: Exterior Natural Vented Cavity*, conforme metodologia indicada por Penso (2017). Neste grupo, os tipos de componentes de multicamadas incluem sistemas que são montados na superfície externa com um intervalo de ar na envoltória (Figura 46). Este tipo de modelagem permite usar os

cálculos de transferência de calor para a superfície subjacente com outros tipos de modelos de componentes multicamadas disponíveis, como painéis fotovoltaicos ventilados e fachadas naturalmente ventiladas (*ENERGYPLUS*, 2016, p. 381).

Figura 46 – Balanço térmico do intervalo de ar na envoltória



Fonte: Penso, 2017.

Penso (2017) aponta uma limitação do programa, a velocidade do vento é interpretada como proveniente de uma estação meteorológica em campo aberto, porém o programa não considera a orientação de incidência dos ventos locais, adotando um comportamento igual ao da ação dos ventos locais para todas as orientações.

Para a representação do sistema de FVJF, a configuração ocorreu no elemento *Construction* do *EnergyPlus*, a partir da especificação de uma câmara de ar entre a parede e uma camada de cerâmica. Neste aspecto, é importante frisar que neste estudo a FVJF foi considerada totalmente estanque.

A Tabela 5 apresenta a composição das camadas construtivas principais referentes aos sistemas convencionais de FA e aos de FV.

Tabela 5 – Composição das camadas construtivas dos sistemas de fachadas.

Elemento	Descrição
Fachada Aderida (FAd)	Cerâmica 10 mm + Argamassa 25 mm (reboco externo) + Tijolo 15 mm + Câmara Ar + Tijolo 10 mm + Câmara Ar + Tijolo 15 mm + Argamassa 25 mm (reboco interno)
Sistema de fachada ventilada aberta e fechada	Placa Cerâmica 10 mm + Cavidade Ar 70 mm + Tijolo 15 mm + Câmara Ar + Tijolo 10 mm + Câmara Ar + Tijolo 15 mm + Argamassa 25 mm (reboco interno)
Cobertura	Alumínio 0,18 mm + Manta Asfáltica 4 mm + Contrapiso 50 mm + Concreto 80 mm + Câmara Ar 600 mm + Gesso 20 mm

Fonte: Autor do trabalho.

3.4.3 Parâmetros de simulação – condição natural ventilada

Foram avaliadas oito situações (Quadro 3) para a condição de ventilação natural da edificação para cada tipo de sistemas de revestimento externo da edificação, no caso: sistema de fachada aderida (FAd), sistema de fachada ventilada de juntas abertas entre as placas cerâmicas (FVJA), e o sistema de fachada ventilada com juntas fechadas (FVJF), com ar na câmara de ar estanque, totalizando 24 simulações computacionais com vistas a avaliar a influência da cor do revestimento, do sombreamento das janelas e da variação do regime de ventilação, tendo como base o Dormitório 1 do 23º pavimento, pois o ambiente apresenta a pior situação no que tange a ganhos de carga térmica.

Quadro 3 – Simulações para condição de ventilação natural.

Situação	Cor do revestimento externo	Condições de sombreamento das janelas	Regime de abertura das janelas
S1	Clara	Sem sombreamento	18h-12h (Noturno)
S2	Clara	Sem sombreamento	6h-00h (Diurno)
S3	Clara	Com sombreamento	18h-12h (Noturna)
S4	Clara	Com sombreamento	6h-00h (Diurno)
S5	Escura	Sem sombreamento	18h-12h (Noturna)
S6	Escura	Sem sombreamento	6h-00h (Diurna)
S7	Escura	Com sombreamento	18h-12h (Noturna)
S8	Escura	Com sombreamento	6h-00h (Diurna)

Fonte: Autor do trabalho.

Ao executar as simulações computacionais, obteve-se o valor da temperatura operativa de cada situação em °C para 8760 h, que corresponde a um período anual. O objetivo foi calcular o indicador de GHR, descrito na Equação 3. Cabe mencionar que a temperatura 26°C é indicada para ambientes de permanência prolongada pelo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R).

$$\mathbf{GHR} = \sum (\mathbf{T_o} - 26^{\circ}\mathbf{C}) \quad (3)$$

Onde:

GHR- Graus-Hora de Resfriamento

To- Temperatura Operativa

A temperatura operativa (To) é o valor médio entre a temperatura do ar e a temperatura radiante média do ambiente. O cálculo pode ser feito por simulação ou através da equação abaixo (equação 4):

$$\mathbf{T_o} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{T_a} + (1-\mathbf{A}) \cdot \mathbf{T_r} \quad (4)$$

Onde:

To= Temperatura operativa horária (°C)

T_a = Temperatura do ar no ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

T_r = temperatura radiante média ($^{\circ}\text{C}$)

A = Constante que varia com a velocidade do ar no ambiente (V_{ar} , em m/s).
conforme:

$A = 0,5$ para $V_{ar} \leq 0,2$ m/s

$A = 0,6$ para $0,2$ m/s $< V_{ar} \leq 0,6$ m/s

$A = 0,7$ para $0,6$ m/s $< V_{ar} \leq 1,0$ m/s

3.4.3.1 Modelagem da edificação

A modelagem da ventilação natural na edificação considerou o seguinte:

- Todos os ambientes com aberturas para ventilação devem ser modelados.

Tendo as mesmas coordenadas cartesianas do projeto;

- O coeficiente de rugosidade do entorno deve ser de 0,33;

• Os coeficientes de pressão superficial (C_p) podem ser estimados através de experimentos em túnel de ventos, bancos de dados em túneis de vento ou calculados pelas equações de Swami e Chandra (1988) e Kins, et al (1979). Bases de cálculo recomendado é *pressure database* e *cp generator*;

- O coeficiente de descarga (C_d) para janelas e portas deve ser de 0,60.

• O coeficiente do fluxo de ar por frestas (C_q) para janelas e portas deve ser de 0,001 kg/s.m e o expoente do fluxo de ar (n) deve ser de 0,65;

• O padrão de uso da ventilação pode ser de controle automático, por temperatura e entalpia.

3.4.3.2 Atividade e ocupação

O RTQ-R determina o padrão mínimo de ocupação para uma edificação. Sendo o mínimo de 2 pessoas para cada dormitório e a sala deve ser utilizada por todos os usuários dos dormitórios. Foi modelado um padrão de ocupação dos ambientes para os dias de semana e outro para os finais de semana, segundo a Tabela 6 a seguir:

Tabela 6 – Padrão de ocupação para dias de semana e final de semana.

Hora	Dormitórios		Sala	
	Dias de Semana	Final de Semana	Dias de semana	Final de Semana
	(%)	(%)	(%)	(%)
1h	100	100	0	0
2h	100	100	0	0
3h	100	100	0	0
4h	100	100	0	0
5h	100	100	0	0
6h	100	100	0	0
7h	100	100	0	0
8h	0	100	0	0
9h	0	100	0	0
10h	0	50	0	0
11h	0	0	0	25
12h	0	0	0	75
13h	0	0	0	0
14h	0	0	25	75
15h	0	0	25	50
16h	0	0	25	50
17h	0	0	25	50
18h	0	0	25	25
19h	0	0	100	25
20h	0	0	50	50
21h	50	50	50	50
22h	100	100	0	0
23h	100	100	0	0
24h	100	100	0	0

Fonte: RTQ-Q, 2012.

Os valores recomendados para as taxas metabólicas foram baseados no *Handbook of fundamentals da ASHARAE* (Tabela 7), considerando uma área de pele de 1,80 m².

Tabela 7– Cargas internas de equipamentos

Ambiente	Atividade realizada	Calor Produzido (W/m ²)	Calor Produzido para área de pele= 1,80m ² (W)
Sala	Sentado ou assistindo	60	108
	TV		
Dormitórios	Dormindo ou descansando	45	81

Fonte: RTQ-Q, 2012.

3.4.3.3 Padrão de iluminação

Foram adotados dois padrões de uso para iluminação, sendo um para dias de semana e outro para finais de semana. Segundo O RTQ-R os ambientes de permanência prolongada devem ser modelados com potência instalada de iluminação igual a 5,0W/m² para dormitórios e 6,0 W/m² para sala. A Tabela 8 mostra o padrão de uso da iluminação para dormitório e sala tanto nos dias de semana quanto no final de semana e a Tabela 9 mostra a densidade de potência instalada de iluminação no dormitório e na sala.

Tabela 8 – Densidade de potência instalada de iluminação.

(continua)

Hora	Dormitórios		Sala	
	Dias de Semana (%)	Final de Semana (%)	Dias de semana (%)	Final de Semana (%)
1h	0	0	0	0
2h	0	0	0	0
3h	0	0	0	0
4h	0	0	0	0
5h	0	0	0	0
6h	0	0	0	0
7h	100	0	0	0

(conclusão)

Hora	Dormitórios		Sala	
	Dias de Semana	Final de Semana	Dias de semana	Final de Semana
	(%)	(%)	(%)	(%)
8h	0	0	0	0
9h	0	100	0	0
10h	0	0	0	0
11h	0	0	0	100
12h	0	0	0	100
13h	0	0	0	0
14h	0	0	0	0
15h	0	0	0	0
16h	0	0	0	0
17h	0	0	100	100
18h	0	0	100	100
19h	0	0	100	100
20h	0	0	100	100
21h	100	100	100	100
22h	100	100	0	0
23h	0	0	0	0
24h	0	0	0	0

Fonte: RTQ-Q, 2012.

Tabela 9 – Densidade de potência instalada de iluminação.

Ambiente	DPI (W/m ²)
Dormitórios	5,0
Sala	6,0

Fonte: RTQ-Q, 2012.

3.4.3.4 Cargas internas de equipamentos

Foram modeladas cargas internas de equipamentos para a sala. O período e a potência das cargas internas são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Cargas internas de equipamentos

Ambiente	Período	Potência (W/m ²)
Sala	24	1,5

Fonte: RTQ-Q, 2012.

3.4.3.5 Temperatura do solo

A temperatura do solo é definida utilizando o programa *Slab*, que é um auxiliar do *Energypius*, para calcular a temperatura média mensal do solo, baseado nos valores médios de temperaturas internas e externas da edificação (SOARES *et al*, 2017). A temperatura do solo foi desconsiderada, pois o apartamento avaliado no estudo não sofre influência direta do ganho de calor proveniente do solo.

3.4.3.6 Regime de ventilação

O regime de ventilação seguiu duas rotinas de utilização das aberturas. Na rotina 1 (rotina noturna) as janelas dos quartos ficarão fechadas das 12:00h às 18:00h e aberta a partir às 18:00h, com a finalidade de garantir a ventilação natural no período da manhã, bem como no período da noite, porque segundo Gomes (2007), os períodos noturnos são estatisticamente relevante, pois na cidade de Belém a temperatura interna é maior que a externa durante o período noturno.

Na rotina 2 (rotina diurna) as janelas do dormitório ficarão fechadas na modelagem no período de 00:00h às 6:00h e abertas no restante do dia, com a finalidade de garantir ventilação durante o dia todo, principalmente nos horários de maior temperatura interna.

3.4.3.7 Parâmetros de simulação – condição artificialmente refrigerada (Cr) (kWh/m²)

Para a simulação do consumo energético para refrigeração da edificação foram realizadas (Quadro 4) com a finalidade de obter o consumo de energia anual para resfriamento (kWh/ano), onde as variáveis utilizadas para os 3 sistemas de fachadas foram a cor do revestimento externo e a condição de sombreamento das esquadrias, totalizando 12 simulações. Nessa situação os parâmetros utilizados para as simulações foram os estabelecidos pela RTQ-R para o sistema de condicionamento de ar, onde a temperatura do termostato de refrigeração é de 24 °C e o condicionamento artificial deve ocorrer no período de 21h às 8h, permanecendo a edificação ventilada naturalmente no restante do dia.

Quadro 4 – Simulações para condição de condicionamento artificial.

Situação	Cor do revestimento externo	Condições de sombreamento das janelas
RS1	Clara	Sem sombreamento
RS2	Clara	Com sombreamento
RS3	Escura	Sem sombreamento
RS4	Escura	Com sombreamento

Fonte: Autor do trabalho.

As condições para modelagem do sistema de refrigeração foram as seguintes:

- O sistema de condicionamento foi instalado nos ambientes de permanência prolongada, exceto dormitórios de serviço. Usando o mesmo padrão para salas;
- O termostato de refrigeração foi de 24°C para todas as zonas bioclimáticas;
- O termostato de aquecimento foi de 22°C, somente para zonas bioclimáticas 1 a 4;
- O condicionamento de ar deve ser no período das 21h às 8h;
- Edificação ventilada naturalmente no período das 9h às 20h;
- Modo de operação do motor contínuo;
- Eficiência do ventilador de 0,7 e eficiência do motor de 0,9;
- Razão entre o calor retirado do ambiente e a energia consumida pelo equipamento é de 3,00 W/W;

- Número máximo de horas não atendidas do sistema de condicionamento de ar 10%;
- Capacidade do sistema de condicionamento de ar dos ambientes dimensionada automaticamente pelo programa de simulação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 VENTILAÇÃO NATURAL

A Tabela 11 mostra os resultados de indicadores de graus-horas de resfriamento (CH_R) resultantes das 24 simulações computacionais provenientes dos 3 tipos de fachadas (FAd, FVJA e FVJF), com variação da cor do revestimento (clara e escura), da condição de sombreamento das esquadrias (com e sem) e do regime de ventilação (diurno e noturno).

Tabela 11– Resultados em Graus-Hora de Resfriamento para cada simulação.

Ventilação Natural				
Situação	Características	GHr		
		FAd	FVJA	FVJF
S1	CC/SS/VN	21419,50	22437,22	22622,07
S2	CC/SS/VD	23384,35	24476,91	24689,36
S3	CC/CS/VN	15360,19	15618,10	16419,87
S4	CC/CS/VD	17357,86	17721,81	18533,55
S5	CE/SS/VN	27060,57	26665,54	27823,31
S6	CE/SS/VD	28987,01	28659,16	29857,42
S7	CE/CS/VN	21483,57	20259,74	22088,99
S8	CE/CS/VD	23425,62	22293,56	24151,39

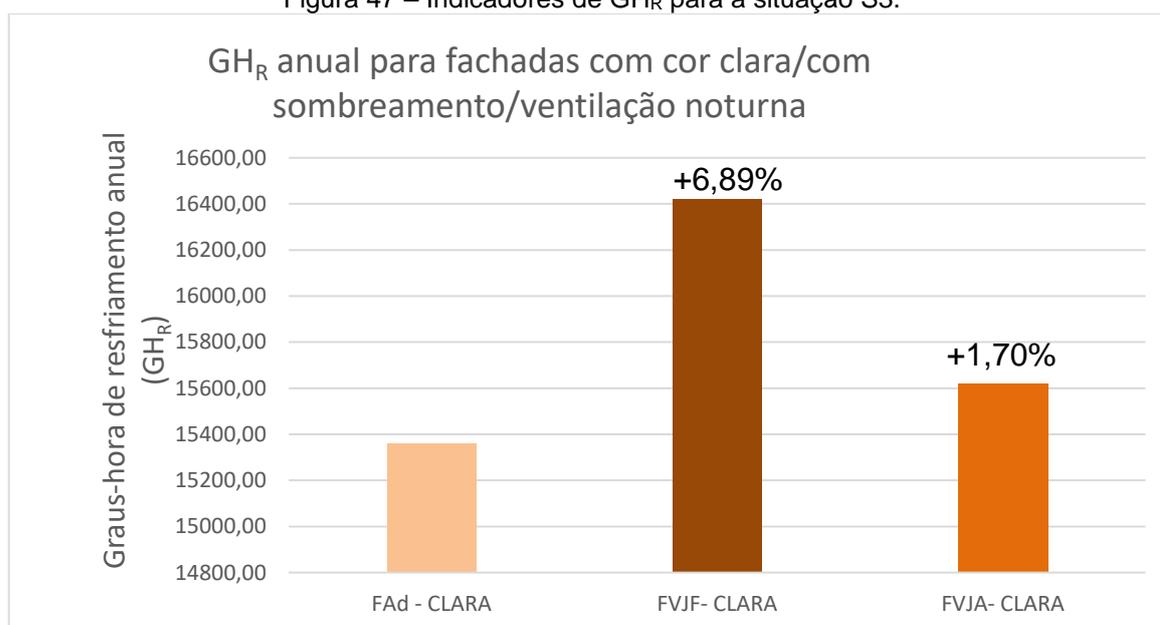
Legenda: CC: cor clara; CE: cor escura; SS: sem sombreamento; CS: com sombreamento; VN: ventilação noturno; VD: ventilação diurna.

Fonte: Autor do trabalho.

4.1.1. Simulação S3: Ventilação noturna/cor clara/com sombreamento

A figura 47 mostra o comparativo de desempenho térmico em termos de GH_R para os três sistemas de fachada com revestimento externo na cor clara, para as condições de ventilação noturna com sombreamento das esquadrias. Em termos gerais, o desempenho térmico do sistema tradicional de FAd foi superior aos das fachadas não aderidas, cerca de 2% em relação ao sistema com juntas abertas (FVJA) e 7% em comparação ao sistema não aderido estanque (FVJF). Na prática, não houve diferença entre a FAd e a FVJA, ao passo que para a FVJF o ganho de calor desta foi bastante significativo. Entre os sistemas não aderidos, o com as juntas abertas (FVJA) foi o que apresentou desempenho térmico superior, reduzindo em cerca de 5% os GH_R de desconforto em comparação à FVJF.

Figura 47 – Indicadores de GH_R para a situação S3.



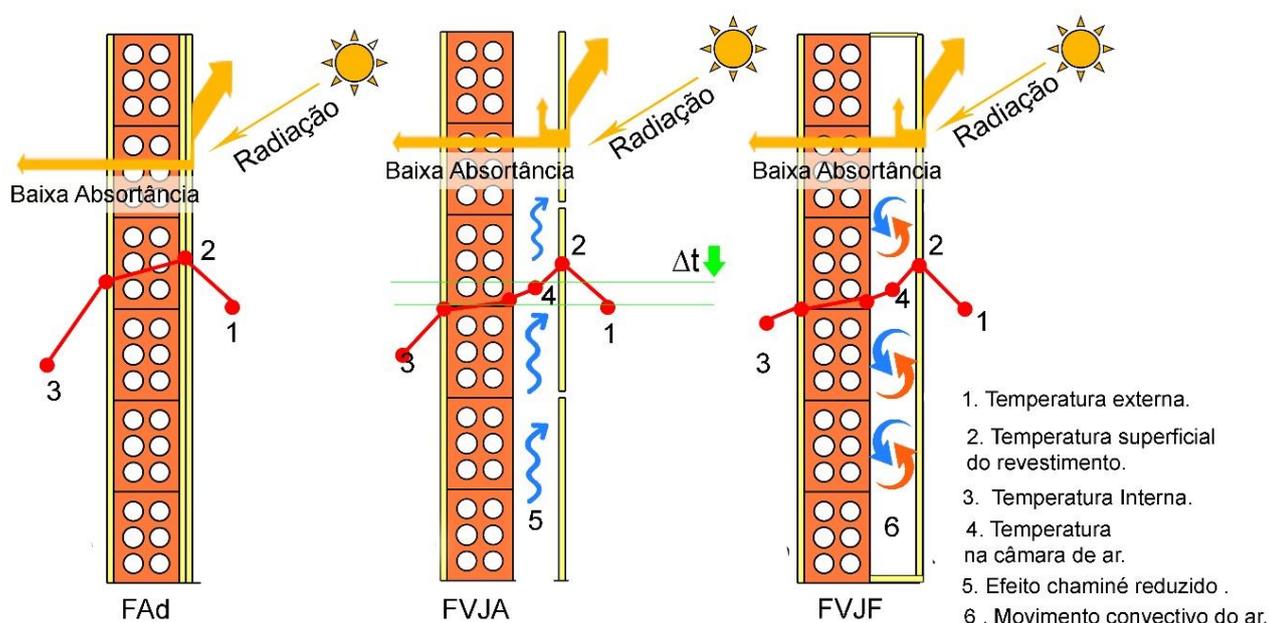
Fonte: Autor do trabalho.

A explicação para este comportamento é atribuída à cor clara do revestimento externo, que reflete grande parte do calor proveniente da radiação solar, funcionando como uma barreira radiante. Como a absorvância dos revestimentos de cor clara é menor ($\alpha = 0,30$), não há ganhos expressivos de calor pela sua superfície, conseqüentemente não há aumentos substanciais na temperatura superficial do revestimento, nem de transferência de calor para a parede interna, seja por irradiação ou condução.

No caso da FAd, não houve um aumento excessivo da temperatura superficial do revestimento, o que mitigou a condução térmica do calor através das camadas do sistema aderido, uma vez que grande parte do calor possivelmente foi dissipado para fora do edifício. Este fenômeno repercutiu positivamente na redução da transferência de calor deste sistema de revestimento de fachada para o interior do edifício.

No caso das fachadas ventiladas, ocorreu o oposto. Com a reflexão do calor pela cor da clara do revestimento, também não houve um aumento expressivo da temperatura superficial do mesmo e, como consequência, ocorreu uma atenuação da magnitude do efeito chaminé, cuja força motriz são as diferenças de temperaturas entre a cavidade do ar interno, do ar externo e da superfície da parede interna (alvenaria chapiscada). O efeito chaminé é o fenômeno que minimiza a transferência de calor nas fachadas ventiladas, removendo o ar quente para fora da cavidade. A Figura 48 apresenta de forma esquemática o comportamento térmico descrito para as três configurações de fachadas na cor clara.

Figura 48 – Esquema do comportamento térmico dos sistemas de fachadas para o revestimento na cor clara.



Fonte: Autor do trabalho

No caso da FVJA, como não há o aquecimento do revestimento cerâmico, não ocorre o aquecimento do ar interno da cavidade por radiação do revestimento. Além disto, o ar quente externo infiltra pelas juntas para a cavidade de ar interna, tornando praticamente equânime as temperaturas externas e da cavidade interna de ar. Sem diferença acentuada de temperatura, o efeito chaminé é reduzido. Com isto, a velocidade do ar na cavidade se torna de menor magnitude, não sendo eficiente o bastante para ocasionar uma remoção substancial do ar quente da cavidade para fora da edificação, fazendo com que este, o ar quente, transfira o calor para a parede interna por convecção, aquecendo o ambiente interno. Por esta razão, a FVJA transferiu uma quantidade de calor para o interior do edifício ligeiramente superior a proporcionada pela FAd, o que demandou maior quantidade de GHR de desconforto. Patania et al (2010) constataram que as maiores economias de energia são obtidas a medida que se aumenta a velocidade do ar na cavidade, ou seja, a intensidade do movimento termal dentro da câmara de ar. Neste caso, apesar de não ter sido determinado como output nesta simulação com o programa EnergyPlus, tudo indica que as velocidades do ar na cavidade interna das FVJA foram baixas.

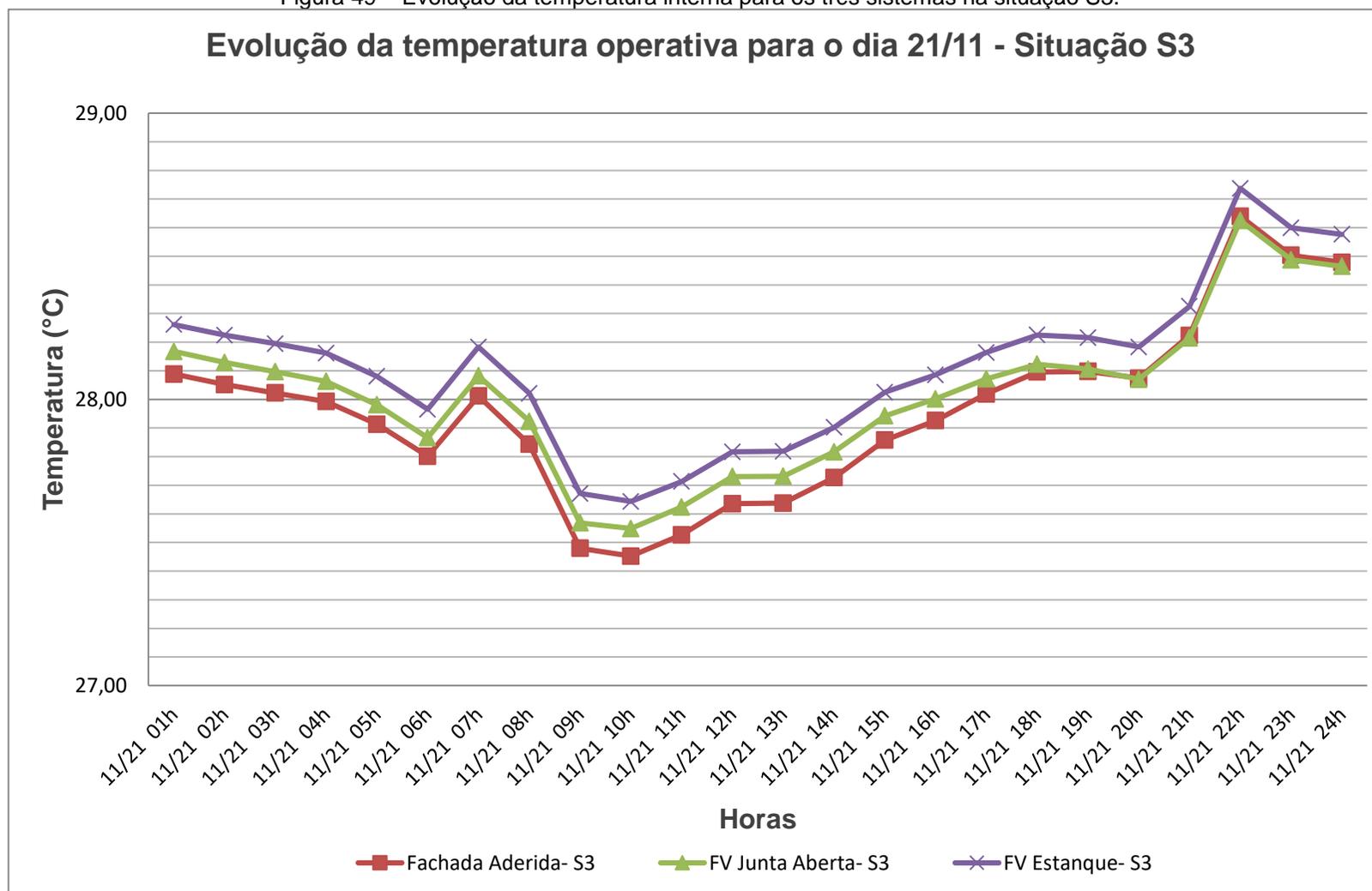
Na FVJF a situação é mais crítica, a diferença de GHR de desconforto deste sistema de revestimento foi muito maior do que para os demais. Isto se deve ao fato do movimento termal existente ser praticamente convectivo, ou seja, ascendência e descendência de ar pela cavidade sem que haja saída deste ar quente para fora da fachada não aderida. Em outras palavras, não há remoção de ar quente da cavidade interna, mas sim um estabelecimento de um circuito fechado de movimentação termal. O aquecimento da cavidade interna ocorre gradativamente por radiação do revestimento externo. Em seguida, o ar quente da cavidade aquecido transfere calor para a superfície da parede interna por convecção, e desta para o interior do edifício por condução. A desvantagem deste sistema é que não há o arrefecimento do ar da câmara interna porque o ar quente não pode ser removido tendo em vista o fechamento das juntas. Este tipo de prática construtiva de fachadas ventiladas vem sendo executada por inúmeras construtoras pelo Brasil porque impede o acesso de animais e insetos na câmara de ar. Entretanto, este procedimento que traz benefícios funcionais por um lado, ocasiona um mal maior como o sobreaquecimento da parede interna e, conseqüentemente, do ganho de carga térmico pela edificação.

Na figura 49 é mostrada a evolução da temperatura interna do dormitório 3 durante o dia 21 de novembro para os três sistemas construtivos avaliados. Para a FAd, as temperaturas operativas ao longo das 24 horas do dia foram inferiores às das fachadas não aderidas. Entretanto, a partir das 16 horas a temperatura operativa das fachadas ventiladas tende a apresentar uma taxa de crescimento da temperatura menor que a da FAd. No caso da FVJA, a temperatura operativa se iguala a da FAd a partir das 19 horas, permanecendo nesta condição até por volta das 9:00 h da manhã do dia seguinte.

Com os sistemas de fachadas ventiladas, há uma tendência de resfriamento mais rápido da edificação no período noturno, e de forma mais eficiente, com a de junta aberta (FVJA). Com a diminuição da temperatura do ar externa a partir das 16:00 h, estabelece-se uma diferença de temperatura entre a cavidade interna do ar e o ar exterior, o que favorece o movimento termal dentro da câmara interna, removendo o ar quente e aumentando o fluxo de calor no sentido interior-exterior. A ventilação por efeito chaminé é um fenômeno diretamente associado às diferenças de temperatura. Por esta razão que durante o dia a FVJA não tem o mesmo comportamento do período noturno. A FVJA não consegue atenuar a transferência de calor em relação a FAd no período da manhã e tarde porque as temperaturas externas do ar e da cavidade são praticamente as mesmas, não havendo diferenças entre elas, o que reduz o efeito arrefecedor do movimento termal.

Entre as FVs, a transferência de calor da cavidade de ar para a parede interna é muito menor para as de juntas abertas (FVJA) por causa da remoção do ar quente ocasionado pela movimentação termal, o que não ocorre com a FVJF. Neste caso, a transferência de calor para o interior do edifício é favorecida porque não há remoção do ar quente da cavidade para o exterior, apenas movimentos convectivos. Suárez et al (2012) constataram que as FVJA apresentam diferenças na temperatura da cavidade interna de ar até 10 °C a menos em relação a da FVJF para uma mesma altura na edificação, apesar de ambas apresentarem a mesma temperatura superficial do revestimento externo, o que se traduz numa redução significativa de transferência de calor para o interior do edifício.

Figura 49 – Evolução da temperatura interna para os três sistemas na situação S3.



Fonte: autor do trabalho.

Esperava-se que a FVJA, mesmo para a cor clara, apresentasse um melhor desempenho térmico que a FAd. Entretanto, o que se observou foi praticamente nenhuma diferença entre a FVJA e a FAd. Isto ocorre porque as temperaturas em Belém são elevadas, o que faz com que haja um sobreaquecimento da cavidade interna de ar das fachadas ventiladas. Diversos pesquisadores constataram que para regiões no Sul da Europa, cuja a temperatura e a radiação são muito intensas, até superiores às de Belém, até mesmo altas velocidades do ar na cavidade não são suficientes para remover todo o ganho de calor decorrente do sobreaquecimento da fachada durante o dia (PATANIA *et al*, 2010; GIANCOLA *et al*, 2012; GUILLEN *et al*, 2014). Neste caso, as altas temperaturas de Belém ocasionaram o sobreaquecimento da cavidade interna de ar, e associadas à baixa magnitude do efeito chaminé decorrido da alta reflexão do revestimento claro, reduziram o desempenho da FVJA perante a FAd. O efeito chaminé reduzido da FVJA possibilitou uma transferência de calor ligeiramente maior para o interior do edifício por conta da convecção do ar quente da cavidade do que por condução através das camadas da FAd (revestimento, argamassa colante, emboço e chapisco).

Nas fachadas ventiladas de cor clara houve uma redução do efeito chaminé por causa do sobreaquecimento da câmara de ar a partir da temperatura externa do ar e não do aumento da temperatura do revestimento externo. Este comportamento não ocasiona diferenças de temperatura, que é a força motriz para o favorecimento dos movimentos termais intensos dentro da cavidade de ar. Isto reduz substancialmente o potencial de mitigação da FVJA porque transforma a câmara de ar interna numa massa com pouca movimentação, permitindo uma maior transferência de calor para o interior do edifício por convecção.

4.1.2 Simulação S7: ventilação noturna/cor escura/com sombreamento

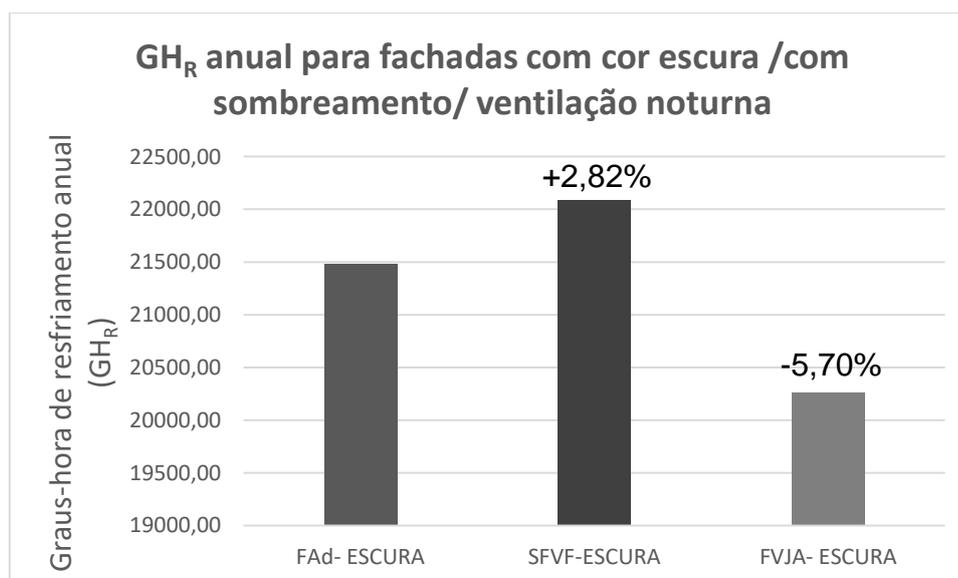
A figura 50 mostra o comparativo de desempenho térmico em termos GH para todos os três sistemas de fachada com revestimentos na cor escura, para as condições de ventilação noturna com sombreamento das esquadrias. De modo geral, os comportamentos térmicos dos três sistemas de fachada foram bastante distintos da situação anterior. Independentemente do sistema de fachada empregado, os ganhos de calor ao adotar-se a cor escura para os revestimentos variou entre 30% a 40% em relação aos revestimentos de cor clara para a simulação

anterior (S3). São resultados extremamente negativos em termos de demanda de energia e de conforto térmico para o usuário do edifício. E demonstram claramente a contribuição significativa da temperatura superficial dos revestimentos no ganho de calor da edificação pelo envoltório.

A absorvância da superfície é um fator que deve ser contemplado nos projetos arquitetônicos, independentemente do envoltório adotado. Para o clima de Belém e das demais cidades pertencentes a zona Af da classificação climática de Koeppen-Geiger, o emprego de revestimentos de alta absorvância são proibitivos. Contudo, há inúmeros edifícios que foram e ainda são projetados em Belém com cores de absorvância média a alta.

Nesta situação de emprego de revestimentos escuros, a FVJA foi a fachada que apresentou o melhor desempenho térmico em comparação aos demais sistemas. Em relação à FAd a FVJA apresentou desempenho superior em cerca de 6%, ao passo que a FVJF novamente apresentou o pior comportamento, demonstrando que esta metodologia construtiva não é apropriada para climas quentes e úmidos. A FVJF apresentou uma quantidade de GH_R de desconforto 3% superior em relação a FAd e 8,5% acima da FVJA.

Figura 50 – Indicadores de GH_R para as simulações na situação S7.



Fonte: Autor do trabalho.

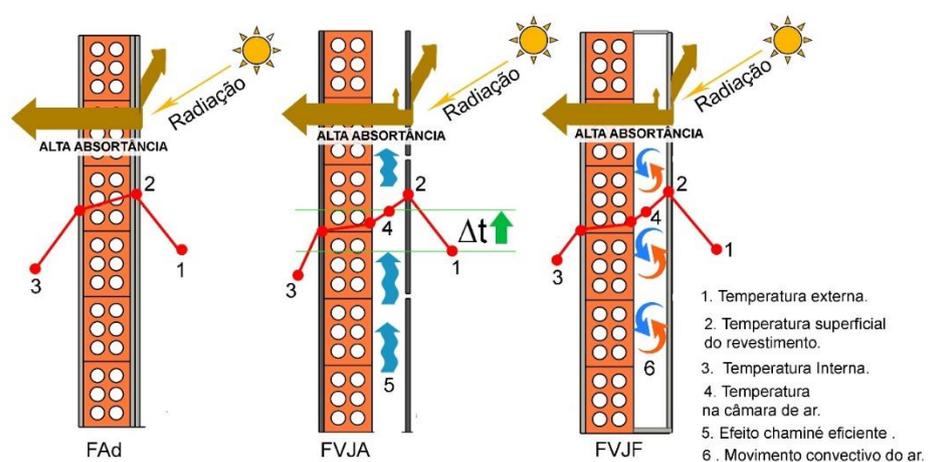
O efeito da temperatura superficial é uma parcela significativa no ganho de calor pelo envoltório e conseqüentemente, pela edificação. Ao se adotar superfícies

com valores elevados de absorção (cores escuras), eleva-se em demasia a temperatura superficial do revestimento, o que resulta em distintos processos de transferência de calor para as três situações de fachadas estudadas.

No caso da FVJA, a elevação da temperatura superficial do revestimento ocasionou o aquecimento do ar na câmara interna que, por conseguinte, favorece o aumento da velocidade termal deste mesmo ar dentro da cavidade. Este movimento termal sempre ascendente remove todo o ar quente da cavidade, criando um ambiente de temperatura interna menor, o que mitiga a transferência de calor para a edificação. Nesta situação desfavorável, a FVJA mostrou-se a mais eficiente. Penso (2017) relata que isto ocorre porque a ventilação por efeito chaminé é um fenômeno que está diretamente relacionado às diferenças de temperatura e às cores dos revestimentos.

No caso da FAd, o aumento da temperatura superficial do revestimento foi um fator que potencializou a transferência de calor para dentro da edificação por causa do favorecimento da condução através das camadas constituintes deste sistema de revestimento. Para a situação anterior, com a cor clara, como não houve um aumento significativo da temperatura superficial, a transferência de calor por condução não foi tão eficiente, o que resultou em um bom desempenho da FAd perante a FVJA. A Figura 51 apresenta de forma esquemática o comportamento térmico descrito para as três configurações de fachadas para a cor escura do revestimento externo.

Figura 51 – Esquema do comportamento térmico dos sistemas de fachadas para o revestimento na cor escura.



Fonte: Autor do trabalho

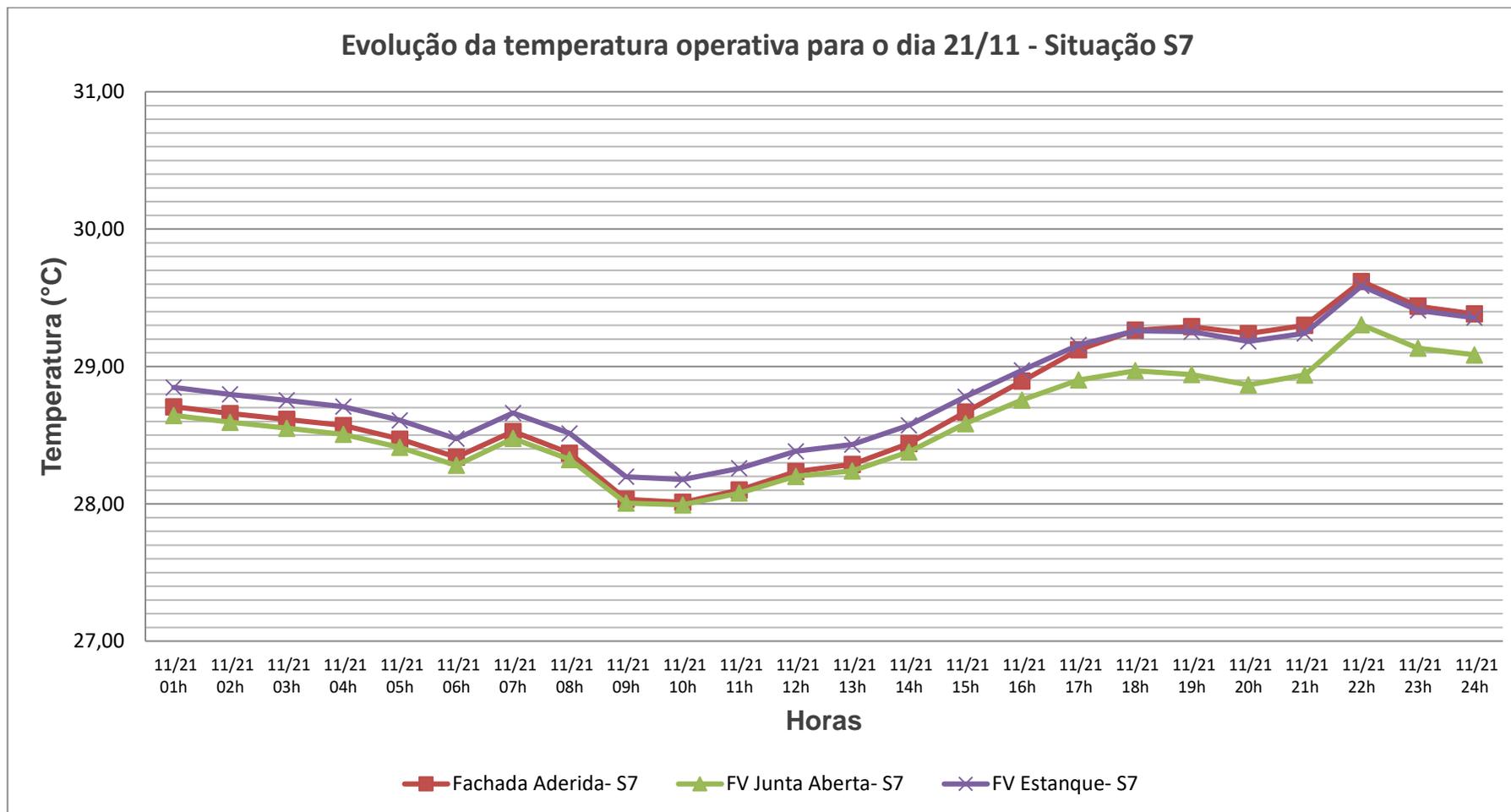
A fachada não aderida com juntas fechadas (FVJF), como na simulação anterior, apresentou novamente o pior desempenho em termos de temperatura operativa no interior da edificação. Pelo fato de não possuir aberturas entre as placas cerâmicas, não permite a saída do ar quente e este por sua vez fica acumulado no espaço confinado entre o revestimento e a alvenaria, sobreaquecendo a alvenaria por movimentação convectiva.

Na Figura 52 é mostrada a evolução da temperatura operativa da edificação durante o dia 21 de novembro para os três sistemas construtivos estudados. A FVJA apresentou ao longo de todo o dia as menores temperaturas operativas em comparação aos demais sistemas. Entretanto, é no período noturno que as diferenças entre a FVJA e a FAd se acentuam. Este comportamento se inicia a partir das 16:00 h e estende-se até as 9:00h do dia subsequente.

Durante o dia, como a temperatura do ar externo é muito elevada, a diferença em relação a temperatura do ar na cavidade interna não é tão acentuada quanto no período noturno. É a partir das 16:00 h, quando a temperatura do ar externo reduz e as temperaturas do revestimento externo e da cavidade ainda se mantêm muito elevadas, é que se inicia o movimento termal ascendente, removendo o calor armazenado na cavidade, amenizando a temperatura no local. Esta diferença de temperatura, como já comentado anteriormente, é que é a força motriz para a ocorrência do efeito chaminé nas fachadas ventiladas de juntas abertas.

Na FAd, durante o dia a transferência de calor por condução para edificação é tão intensa que por volta das 17:00 h a temperatura operativa alcança os mesmos patamares obtidos com a FVJF, mantendo-se nessa condição até as 24:00 h.

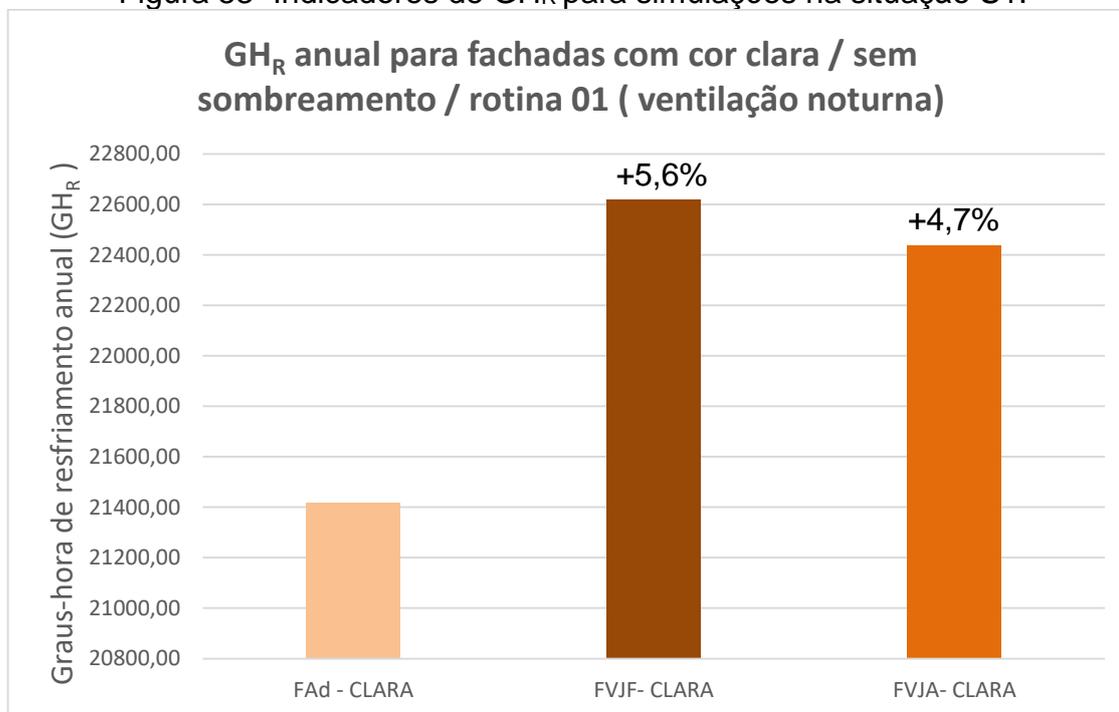
Figura 52 - Evolução da temperatura interna para os três sistemas na situação S7



4.1.3 Simulação S1: ventilação noturna/cor clara/sem sombreamento

A figura 53 mostra o comparativo de desempenho térmico em termos GH_R para todos os três sistemas de fachada na cor clara, para as condições de ventilação noturna, mas neste caso sem sombreamento das esquadrias. Independentemente do sistema de fachada empregado, os ganhos de calor ao não se adotar o sombreamento das esquadrias variaram entre 38% a 44% em relação ao sombreamento das esquadrias. São resultados extremamente negativos em termos de demanda de energia e de conforto térmico pelo usuário do edifício. E demonstram claramente a contribuição significativa do sombreamento das esquadrias para redução do ganho de calor da edificação pelo envoltório. O sombreamento é um fator que deve ser contemplado nos projetos arquitetônicos, independentemente do envoltório estudado. Entretanto, assim como o emprego de revestimentos de média e alta absorvância, os arquitetos e construtores pouco lançam mão deste procedimento nos edifícios residenciais e comerciais em Belém.

Figura 53–Indicadores de GH_R para simulações na situação S1.



Fonte: Autor do trabalho.

De modo geral, o desempenho térmico da FAd foi superior aos das não aderidas, com cerca de 4,7% a menos de Gh de desconforto em relação ao sistema

FVJA e 5,6% a menos em comparação à FVJF. Para esta situação de não sombreamento das esquadrias, que ocasionou um ganho adicional de calor por estes componentes, a diferença de comportamento das FAd em relação às fachadas ventiladas se deve a baixa condução térmica ocasionada pela baixa absorvidade do revestimento de cor clara, que favoreceu a dissipação do calor para o exterior da edificação.

De modo geral, o desempenho térmico da FAd foi superior ao das fachadas não aderidas, com cerca de 4,7% a menos de Gh de desconforto em relação a FVJA e 5,6% em comparação à FVJF. O melhor comportamento térmico das FAd em às fachadas ventiladas, conforme já discutido no item 4.1.1, se deve a baixa condução térmica ocasionada pela baixa absorvidade do revestimento de cor clara, que favoreceu uma maior dissipação do calor para o exterior da edificação.

No caso das fachadas ventiladas, ao contrário do que ocorreu para as FAd, a baixa absorvância dos revestimentos de cor clara não sobreaquece o revestimento cerâmico externo, o que ocasiona uma baixa movimentação termal do ar contido na cavidade interna, transformando-o em uma barreira física. Esta massa de ar de baixa movimentação térmica nas cavidades internas das fachadas ventiladas dificulta a saída do calor, pois configuram-se como camadas isolantes.

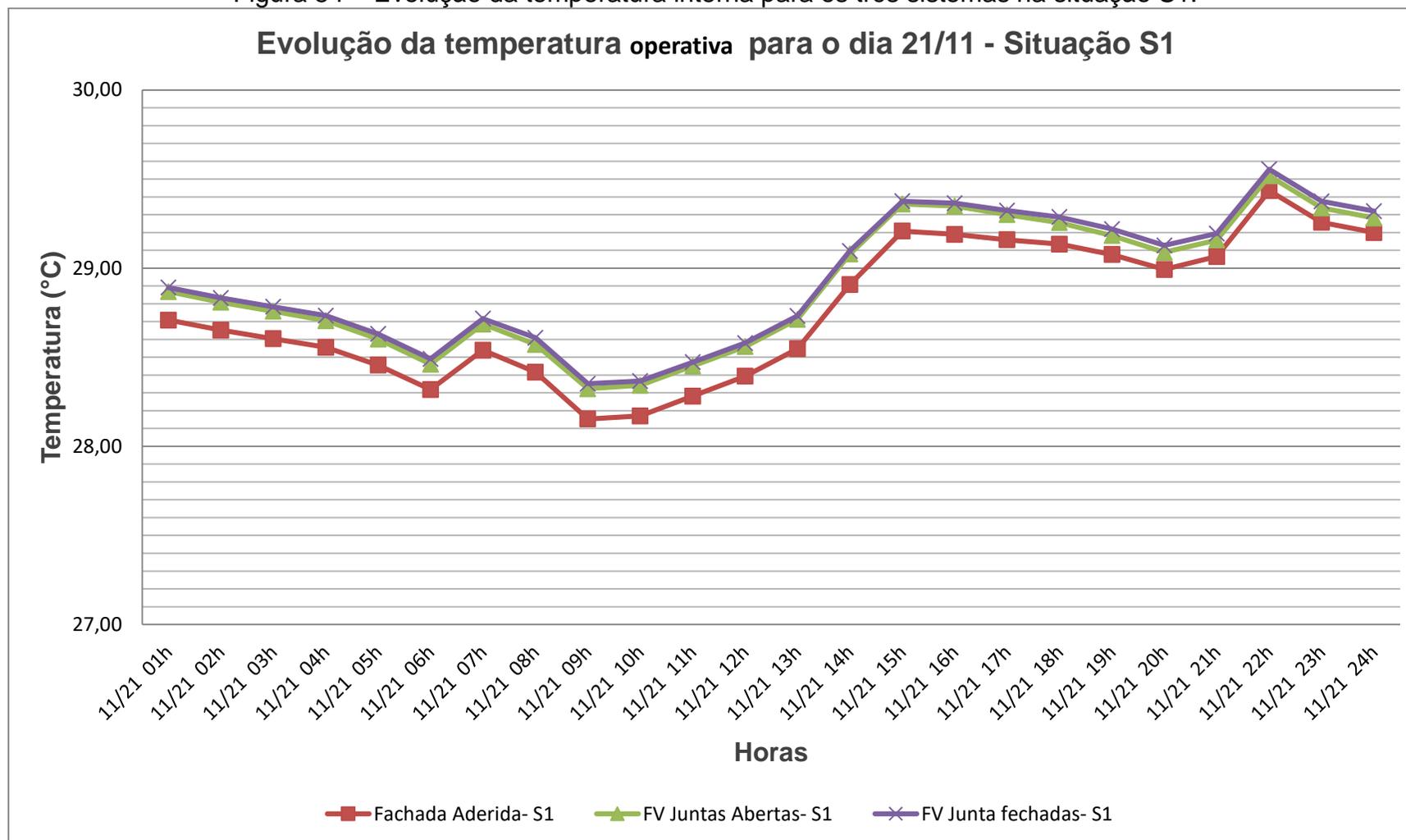
Entre as fachadas ventiladas praticamente não houve diferenças nos indicadores de GHR , menos de 1%. Com o ganho adicional de calor pela falta de sombreamento das esquadrias, há um aumento da temperatura operativa do ambiente interno, que por condução e convecção aquece a cavidade de ar interna. Como a temperatura do ar externo também está elevada, praticamente não há diferenças entre as temperaturas do ar externo e da cavidade interna, conseqüentemente, não movimentação termal nas cavidades de ar das fachadas ventiladas, não efeito estufa para remover o ar quente. Por esta razão que não há diferença da FVJA em relação a da FVJF, pois, sem o efeito chaminé, a primeira perdeu sua capacidade de arrefecimento, igualando-se a segunda em termos de ganho de calor.

A Figura 54 ilustra muito bem-este comportamento. Em nenhuma hora do dia 21 de novembro as temperaturas das duas fachadas ventiladas se igualam ou mesmo se aproximam da FAd, mas apresentam um comportamento térmico bastante similar entre si. A ausência de diferença de temperatura entre o ar externo,

o ar da cavidade interna e a parede interna não favorece o movimento termal nas fachadas ventiladas, o que faz com que apresentem um baixo desempenho térmico para esta situação de falta de sombreamento das esquadrias. Nem mesmo durante o período noturno, quando as temperaturas do ar externo diminuem e se configura um quadro de diferentes temperaturas, as fachadas ventiladas conseguem reduzir as temperaturas operativas internas, tal foi a magnitude do ganho de calor na edificação pela falta de sombreamento das esquadrias.

Em suma, a baixa absorvância das superfícies claras ocasiona uma baixa velocidade termal nas câmaras de ar dos sistemas não aderidos, que associada ao ganho adicional de calor pelas esquadrias não sombreadas criam uma condição extremamente desfavorável para a saída do calor da edificação com os sistemas não aderidos, o que resultou em acréscimos de temperatura na ordem de 40%. Estas condições não favorecem diferenças de temperaturas entre o ar externo, o ar da cavidade interna e a superfície da parede interna, o que gera uma baixa velocidade termal dentro da câmara de ar, tornando indiferente ter ou não abertura entre as placas cerâmicas dos sistemas não aderidos. Por esta razão que não houve diferenças consideráveis entre a FVJA e a FVJF.

Figura 54 – Evolução da temperatura interna para os três sistemas na situação S1.

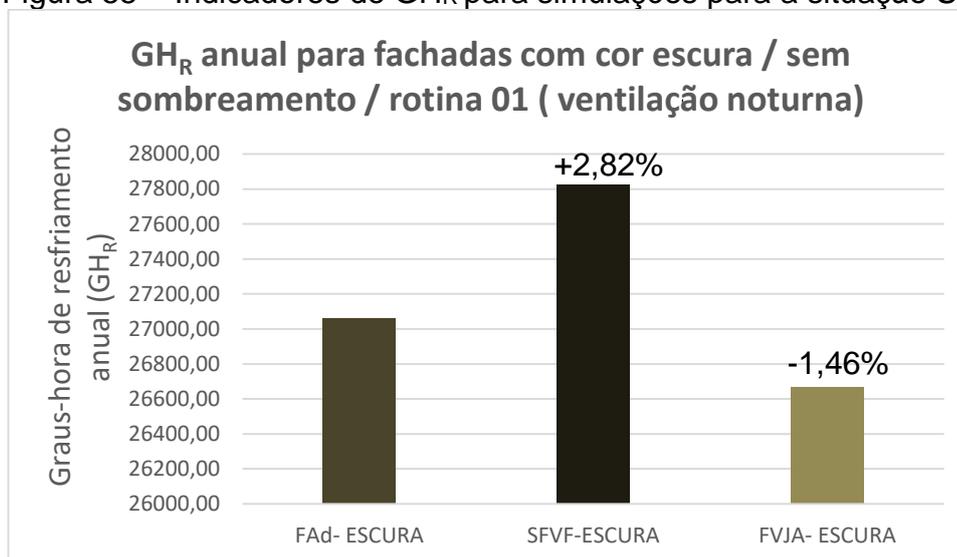


Fonte: autor do trabalho.

4.1.4 Simulação S5: ventilação noturna/cor escura/ sem sombreamento

A Figura 55 mostra o comparativo de desempenho térmico em termos GH_R para todos os três sistemas de fachada na cor clara, para as condições de ventilação noturna sem sombreamento das esquadrias. Para esta situação, que se configura como a mais desfavorável, além do ganho adicional de calor pela esquadria, tem-se o ganho oriundo do aumento da temperatura superficial decorrente da maior absorção do revestimento de cor escura. É uma situação extremamente desfavorável e oposta quando comparada a situação S3, com sombreamento das esquadrias e baixa absorção por conta da cor clara dos revestimentos. As diferenças de GH_R entre estas situações opostas ficaram entre 69 e 76%. Portanto, é imprescindível que o projetista priorize em seu processo de projeto a escolha por cores claras de revestimentos e o sombreamento das esquadrias. Contudo, o que se observa é justamente o oposto nas edificações residenciais e comerciais em Belém.

Figura 55 – Indicadores de GH_R para simulações para a situação S5.



Fonte: autor do trabalho.

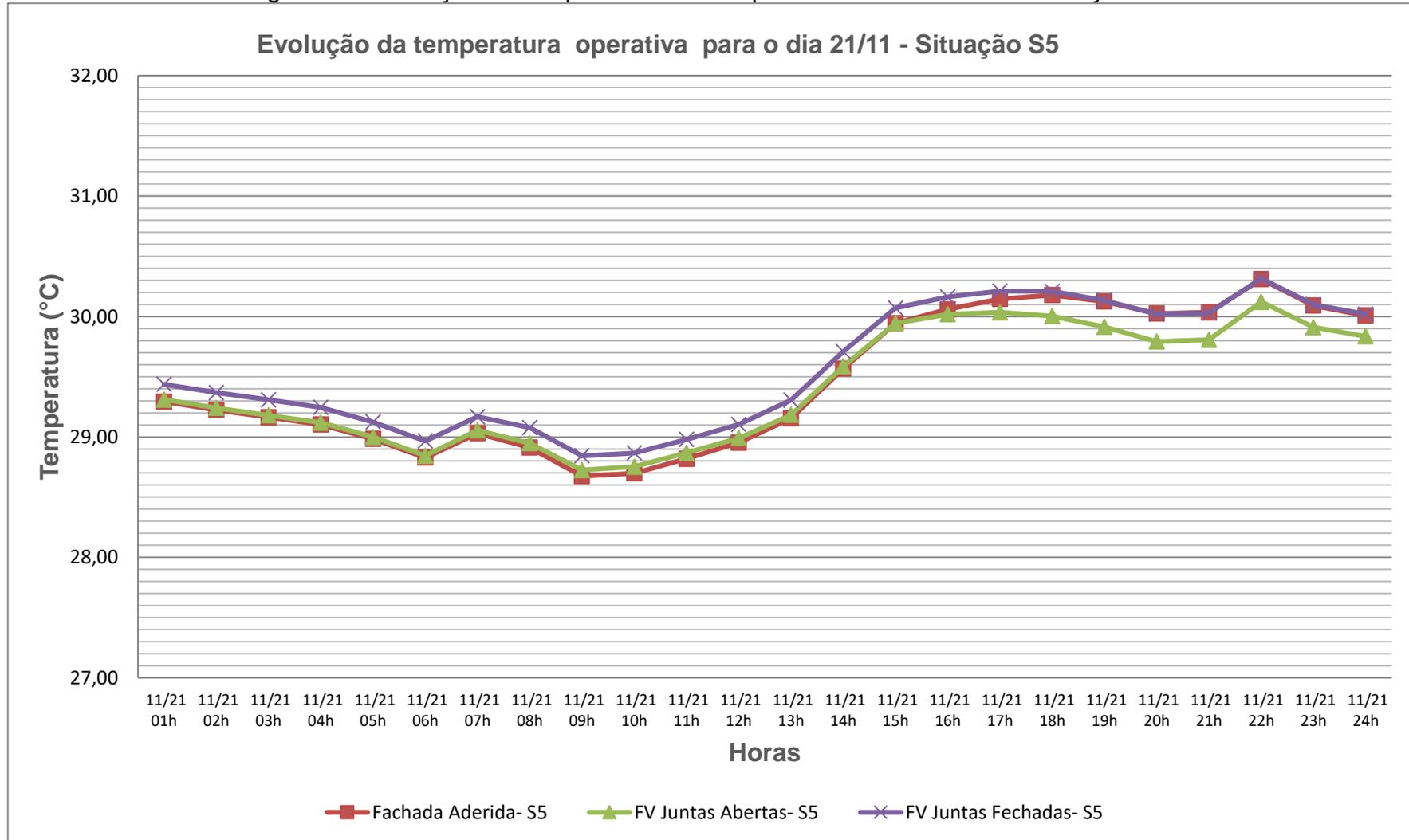
O comportamento térmico foi semelhante à situação S7 (ventilação noturna, com sombreamento), no qual a FVJA foi a que apresentou o melhor desempenho térmico em comparação ao sistema aderido e de fachada ventilada com juntas fechadas.

Em relação à FAd foi superior em cerca de 1,5% ao passo que em relação ao sistema não aderido estanque (FVJF) foi de aproximadamente 4%. Comparativamente a situação S7, em que houve o sombreamento das esquadrias, neste caso, sem sombreamento, houve uma redução da eficiência da FVJA em relação ao sistema aderido. Na comparação de ambas as situações, com e sem sombreamento das esquadrias, as diferenças de melhor desempenho da FVJA em relação à FAd caiu de 5,70 para 1,50%. Isto se deve ao maior ganho de calor pela esquadria sem sombreamento que deve ser retirado do ambiente pelo sistema não aderido.

Isto pode ser observado na Gráfico apresentado na Figura 56 na qual é mostrada a evolução da temperatura operativa da edificação para os três sistemas construtivos estudados ao longo do dia 21 de novembro. A FVJA apresentou temperaturas internas inferiores em relação ao aderido somente a partir das 15 horas, prolongando-se até as 24:00 h. Na situação de sombreamento, a partir das 9h essa situação já era observada. Isto se deve ao maior ganho de calor pela esquadria sem sombreamento que deve ser retirado do ambiente pelo sistema não aderido.

Em suma, apesar do emprego da FVJA em substituição ao sistema aderido em edifícios sem sombreamento das esquadrias e com cores escuras nas suas superfícies reduzirem em cerca de 1,5% os indicadores de GHR esta não é a solução mais significativa a ser tomada em termos de conforto e eficiência energética. Além do emprego da FVJA, a adoção de sombreamento das esquadrias e a escolha por cores claras nos revestimentos devem ser constituir como decisões compulsórias e definitivas de projeto, tendo em vista reduções de cerca de 80% nos indicadores de GHR de desconforto com a adoção destas estratégias. O que se observa na configuração dos edifícios em Belém é justamente o oposto.

Figura 56 - Evolução da temperatura interna para os três sistemas na situação S5.



4.2 SIMULAÇÕES REFERENTES AO REGIME DE VENTILAÇÃO DIURNA (S2, S4, S6, S8): COR CLARA E ESCURA, COM E SEM SOMBREAMENTO)

A rotina de ventilação diurna não alterou o comportamento dos três sistemas de fachadas apresentados nos itens **4.1.1 a 4.1.4**. Não permitir a ventilação noturna em tese, dificultaria a saída de calor ganho durante o período da manhã-tarde. Entretanto, não foi o que ocorreu. Não houve alteração nas curvas de evolução da temperatura nem nos valores dos indicadores de G_{HR} . Em termos gerais, os aumentos e reduções em termos de G_{HR} para as situações S2, S4, S6 e S8 foram inexpressivos, menores do que 1%, conforme pode ser visto na Tabela 12, na qual são mostrados os percentuais de ganhos e perdas de calor (G_{HR}) no edifício ao se empregar as fachadas ventiladas ao invés da fachada aderida para todas as situações estudadas.

Tabela 12 - Percentuais de ganhos e perdas de calor (G_{HR}) das FVs em relação a FAd.

Ventilação	Simulação	% Ganho e Perda de Calor	
		FVJA	FVJF
Noturna	S3 (Cor Clara/Sombreamento)	+1,7	+6,89
Diurna	S4 (Cor Clara/Com sombreamento)	+2,10	+6,78
Noturna	S1 (Cor Clara/Sem sombreamento)	+4,75	+5,60
Diurna	S2 (Cor Clara/Sem sombreamento)	+4,67	+5,58
Noturna	S7 (Cor Escura/Com sombreamento)	-5,70	+2,82
Diurna	S8 (Cor Escura/Com sombreamento)	-4,83	+3,10
Noturna	S5 (Cor Escura/sem sombreamento)	-1,46	+2,82
Diurna	S6 (Cor Escura/sem sombreamento)	-1,13	+3,00

Fonte: Autor do trabalho.

As curvas de evolução da temperatura mostradas nos gráficos das figuras 55 a 58 demonstram que a alteração da rotina de abertura das esquadrias para o período diurno não alterou o comportamento térmico das fachadas, quando comparadas com as situações de ventilação noturna, já mostradas nos gráficos das figuras 49, 52, 54 e 56. Este é um resultado positivo, visto que o regime de aberturas das esquadrias é uma variável na qual o projetista não possui domínio algum, pois depende das atividade e hábitos diários do usuário final da habitação, diferentemente de outras

variáveis como o sombreamento das aberturas e a escolha da cor do revestimento externo, nas quais o projetista tem maior poder de interferência na fase de projeto.

Figura 57 – Evolução da temperatura interna para os três sistemas na situação S2.

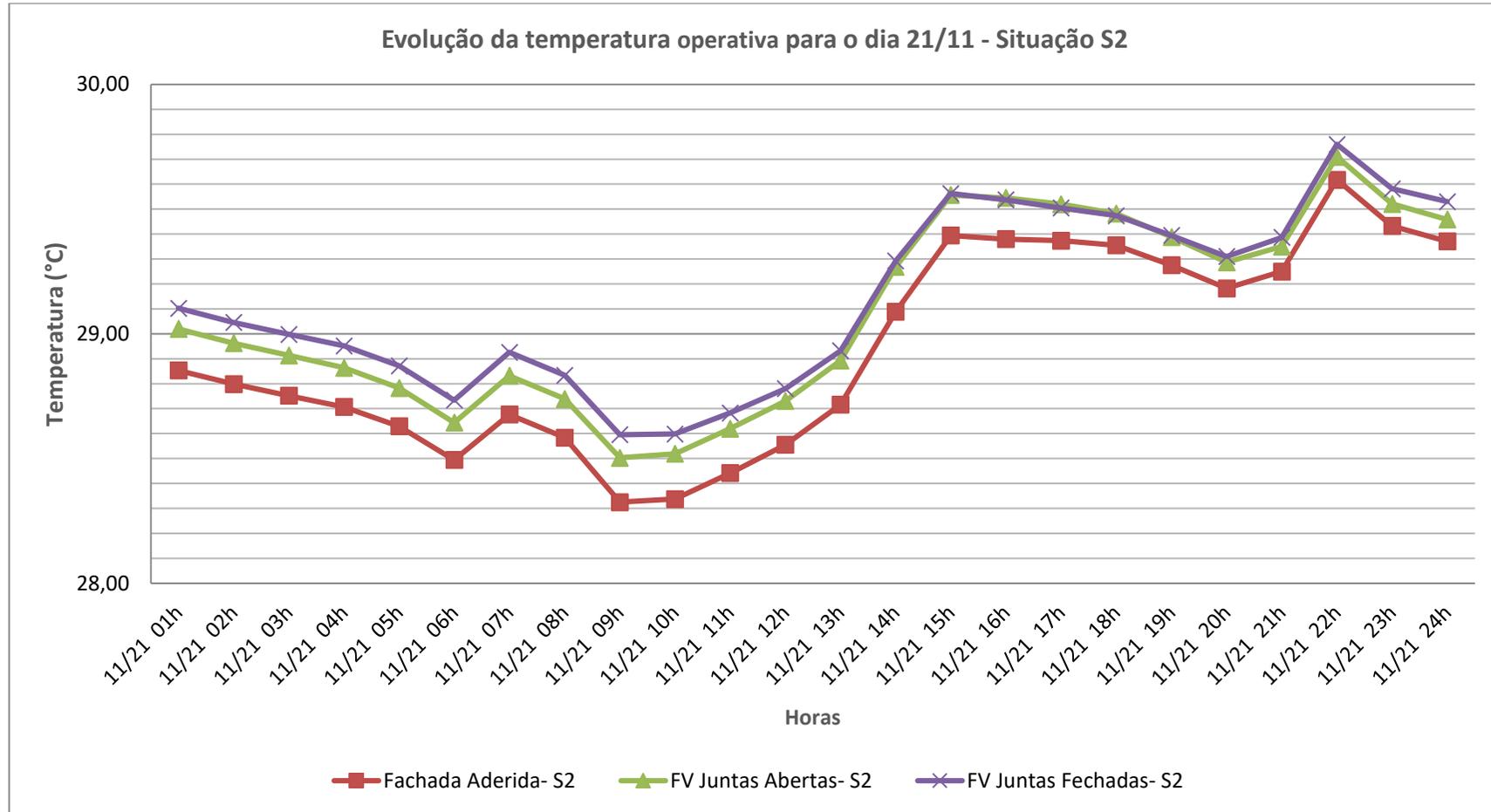


Figura 58 – Evolução da temperatura interna para os três sistemas na situação S4.

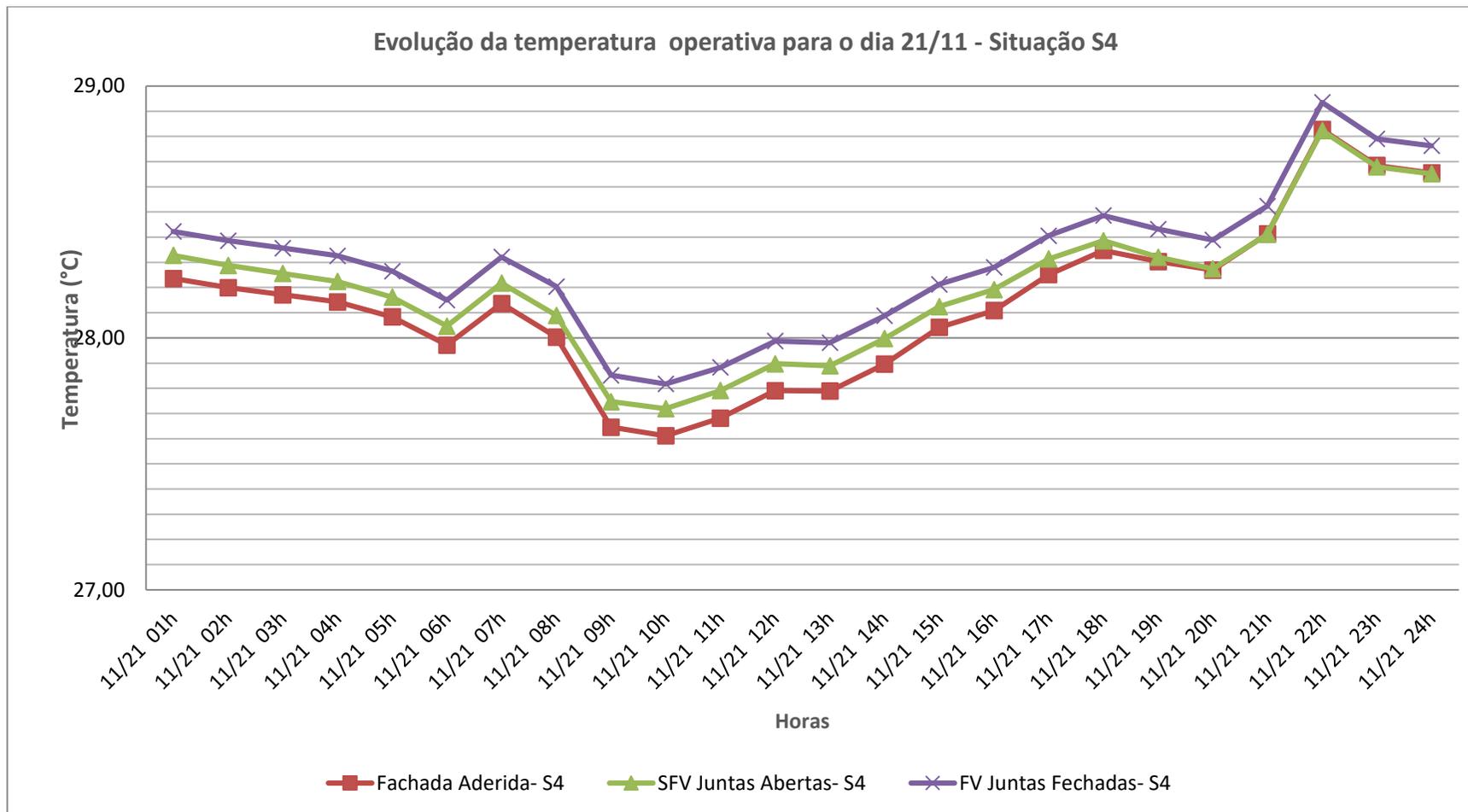
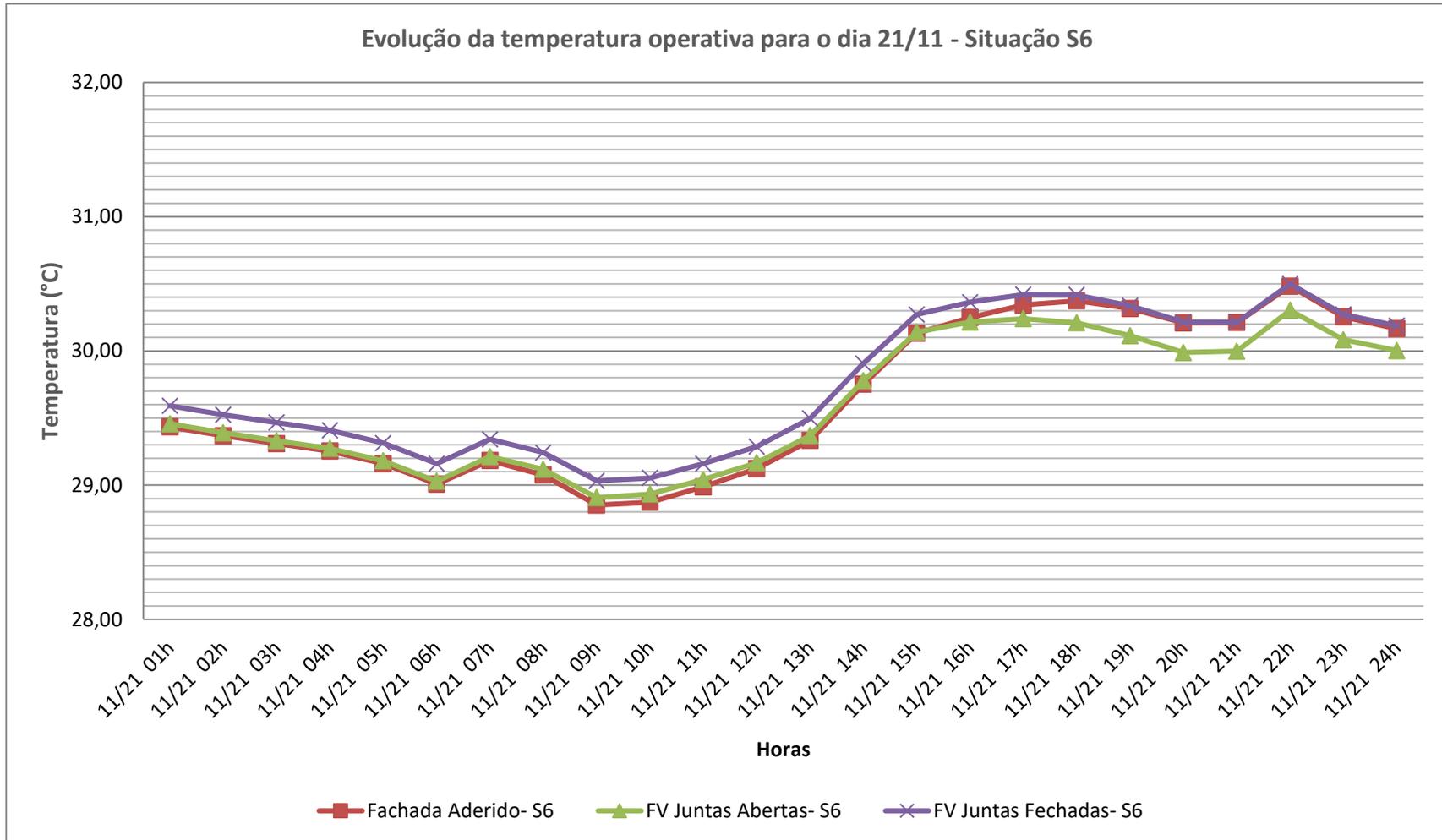


Figura 59– Evolução da temperatura interna para os três sistemas na situação S6.



Fonte: autor do trabalho.

4.3 CONSUMO DE ENERGIA ANUAL PARA RESFRIAMENTO

Os resultados do consumo de energia anual para resfriamento (kWh/ano) são apresentados na Tabela 13. Foram doze simulações, levando em consideração os três tipos de sistemas de fachadas, dois configurações de sombreamento das esquadrias (com e sem) e dois parâmetros de cor do revestimento (clara e escura). A tabela 14 mostra em termos percentuais os aumentos ou reduções no consumo de energia anual das fachadas ventiladas em relação à aderida.

Tabela 13 – Resultados do consumo de energia anual (kWh/ano).

Consumo relativo anual (kWh/ano)				
Situação	Características	FAd	FVJF	FVJA
RS1	CC-SS	3853,08	5251,05	3940,70
RS2	CC-CS	3659,65	3747,99	3691,94
RS3	CE-SS	4331,60	5806,30	4274,06
RS4	CE-CS	4167,04	4216,84	4048,34

Fonte: autor do trabalho.

Tabela 14 – Percentuais de Consumo de energia Anual das FV em relação a FAd.

Simulação	% Cr	
	FVJA	FVJF
RS1 (Cor Clara/Sem Sombreamento)	+2,2	+36,20
RS2 (Cor Clara/Com sombreamento)	+0,9	+2,4
RS3(Cor Escura/Sem sombreamento)	-1,31	+34,0
RS4 (Cor Escura/Com sombreamento)	-2,85	+1,17

Fonte: autor do trabalho.

Para o cálculo do consumo de energia anual, considerou-se o consumo relativo anual para refrigeração (CR) obtidos através das simulações, previstos no RTQ-R. O CR consiste no consumo de energia anual em kWh por metro quadrado necessário para refrigeração do ambiente durante o período de 21 h às 8 h, ao longo de todo o ano, com termostato em 24 °C. O CR foi calculado somente para os três dormitórios, conforme prescrito no RTQ-R. A Tabela 15 apresenta o valor de CR para as situações simuladas.

Tabela 15 – Resultados do consumo relativo de refrigeração (Kwh/m².ano).

Consumo relativo para refrigeração (kWh/m².ano)				
Situação	Características	FAd	FVJF	FVJA
RS1	CC-SS	108,60	148,00	111,07
RS2	CC-CS	103,15	105,64	104,06
RS3	CE-SS	122,09	163,65	120,46
RS4	CE-CS	117,45	118,85	114,10

Fonte: autor do trabalho.

De modo geral, os valores obtidos com CR apresentaram a mesma tendência de comportamento dos resultados obtidos com os indicadores de GH_R. Entretanto, as magnitudes dos valores entre Cr e GH_R foram diferentes. Enquanto que a associação de cores claras de revestimento com sombreamento das esquadrias proporcionou reduções nos GH_R na ordem de 80%, estas mesmas estratégias reduziram em apenas 18% o Cr.

Estes resultados mostram que estratégias de sombreamento das esquadrias e a escolha por cores claras, além da fachada ventilada de junta aberta, são decisões de projeto imprescindíveis para as condições climáticas de Belém.

No caso das fachadas de cor clara, com e sem sombreamento, praticamente não houve diferença no consumo energético entre as fachadas aderida (FAd) e a ventilada com juntas abertas (FVJA).

Para as fachadas de cor escura, a FVJA apresentou o melhor desempenho em termos de CR, com os menores valores anuais. Houve uma ligeira redução da eficiência da FVJA de 1,5% para a situação de não sombreamento das esquadrias em razão do maior ganho de calor para o interior da edificação (tabela 13) cujas causas já foram apresentadas e discutidas nos itens 4.1.2 e 4.1.4

Penso (2017) obteve resultados muito semelhantes com os deste trabalho para a cidade de Maceió, com diferenças entre a FAd e a FVJA entre 0,5 a 0,7%. O autor afirma que devido a absorvância solar do revestimento ser muito baixa, a radiação solar incidente não elevada a temperatura superficial do mesmo, o que ocasiona uma redução da movimentação do ar por convecção. Esta pesquisa empregou o programa EnergyPlus para a simulação do comportamento térmico, com os mesmos parâmetros empregados nesta pesquisa.

Já Atem (2016), empregando o software Trnsys 17 para a simulação computacional, obteve para Belém reduções no consumo energético na ordem de 40%, empregando FVJA com material cerâmico de baixa emissividade, de cor clara, com 15 cm de largura da cavidade de ar.

Maciel e Carvalho (2019) avaliando o uso de fachadas ventiladas com placas de granito em Belém, obtiveram reduções no consumo energético em torno de 15%. As pesquisadoras não especificam se as juntas eram abertas ou fechadas. Entretanto, para esta tipologia construtiva de fachadas ventiladas, com placas pétreas, normalmente as juntas são seladas. Empregaram a plataforma BIM para a realização da simulação, com auxílio do programa Revit para construção do modelo associado ao Green Building Studio (GBS) para simulação computacional.

A discrepância destes resultados se deve a forma com os programas processam os dados climáticos. No caso do EnergyPlus, a limitação se deve ao fato de não considerar as diferentes velocidades do vento em função das orientações. Adota um valor fixo para todas as orientações do modelo. No demais programas, as diferentes orientações e intensidades dos ventos são consideradas. Entretanto, de modo geral, as fachadas ventiladas mostraram mais eficientes que a fachada aderida para o clima de Belém. O que variou foi a magnitude. Neste trabalho, os ganhos foram entre 1 e 5% ao passo que os demais, entre 15 e 40%.

Com relação a FVJF, a situação de não sombreamento das esquadrias é muito crítica, independentemente da cor do revestimento, desfavorecendo em demasia o seu emprego. O valor de CR obtido com a FVJF foi de 148 kwh/m².ano para cor clara e 163,65 kwh/m².ano para a cor escura, cerca de 34% e 36% acima dos obtidos com a FAd (108,60 kwh/m².ano e 122 kwh/m².ano). O maior ingresso de calor pelas aberturas eleva a temperatura interna acima da calibrada no termostato (24°C), além deste tipo de fachada não permitir a remoção do ar quente na cavidade interna porque as juntas estão fechadas, conforme já discutido nos itens 4.1.1 e 4.1.3. Esta prática construtiva de FVJF associada à falta de sombreamento das esquadrias em que pese estar sendo aplicada nas construções no restante do país, principalmente na região Nordeste e Sudeste, mostra-se uma solução completamente inviável do ponto de vista da eficiência energética e de conforto térmico.

Os resultados obtidos para CR vêm reforçar a necessidade da busca de estratégias de sombreamento das esquadrias para a região amazônica, bem como a escolha de revestimentos externos de menor absorvência térmica, pois má escolha dessas variáveis podem implicar em um maior consumo energético para resfriamento. O emprego de FVJA também é uma estratégia projetual importante para Belém e regiões de mesmo clima, embora sua contribuição na redução dos ganhos de calor e no consumo energético sejam percentualmente bem menores que as de sombreamento e cor clara da envoltória. Sua maior relevância está associada aos aspectos construtivos e da vida útil da edificação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa possibilitou a obtenção de dados sobre a o desempenho térmico do sistema de fachada ventilada em relação ao sistema de fachada convencional aderido para o clima equatorial úmido da Amazônia, mais especificamente para o clima da cidade de Belém- PA.

Os resultados alcançados demonstram que o sistema de fachada ventilada de junta aberta possui desempenho térmico melhor em relação ao sistema aderido, quando a cor do revestimento externo possui alta absorvência (cor escura). No entanto, nessa condição em termos globais o ganho de carga térmica para a edificação teve um aumento entre 30% a 40% se comparada à utilização de revestimento na cor clara.

Quando se compara a FVJA com a FAd na condição de cor clara, o desempenho térmico dos dois sistemas é praticamente similar, não havendo grandes diferenças em termos de G_{HR} entre as duas condições. Para todas as situações estudadas, a fachada ventilada de junta fechada obteve o pior desempenho, pois a câmara de ar estanque na FVJF funciona como um isolante térmico durante o período noturno.

A condição de sombreamento das esquadrias foi uma variável importante. Os resultados obtidos reforçam a necessidade de uso dessa estratégia projetual para o clima amazônico, pois os ganhos resultantes da radiação que penetram pelas janelas exercem grande influência no ganho térmico da edificação, entre 30 e 40% .

Em relação ao CR , a FAd e FVJA obtiveram praticamente o mesmo consumo para todas as situações, sendo a situação de FVF a que obteve maior consumo energético quando não há o sombreamento das esquadrias, obtendo um aumento de consumo energético de 36%.

Em termos percentuais, o sombreamento das esquadrias e a adoção de revestimentos de cores claras foram substancialmente mais impactantes sobre os G_h e o consumo energético (CR) do que as fachadas ventiladas. Entretanto, o emprego da FV também é uma estratégia projetual importante para Belém e regiões de mesmo clima. Com base nos resultados desta pesquisa, sua importância está mais associada às questões construtivos e de durabilidade do que de conforto

térmico, apesar de resultados de outras pesquisas apontarem reduções no consumo energético entre 15 e 40%.

Levando-se em conta os graves problemas de destacamento precoce dos revestimentos cerâmicos das fachadas aderidas e a exigência da norma de desempenho ABNT NBR 15575 de uma vida útil de projeto mínima de 20 anos, a adoção da tecnologia de fachadas ventiladas com juntas abertas se configura como uma solução técnica economicamente viável para Belém.

Os resultados deste estudo científico oferecem aos projetistas dados pertinentes sobre a adoção do sistema de fachadas ventiladas em edificações no que tange ao desempenho térmico e consumo energético, demonstrando que o sistema de fachadas ventiladas abertas para o clima amazônico tem desempenho similar ou superior ao sistema convencional aderido, mas apresenta vantagens construtivas e de maior durabilidade, sendo sua escolha uma decisão que passa por requisitos técnicos, econômicos, de manutenção e estético.

Trabalhos futuros podem ser desenvolvidos para avaliar outros aspectos do sistema de fachada ventilada em relação ao clima amazônico, oferecendo suporte para projetistas avaliarem a viabilidade técnico financeira da utilização do sistema na região amazônica.

Em relação ao desempenho térmico, outras configurações de fachadas ventiladas podem ser estudadas, variando, por exemplo, espessura da câmara de ar, o tipo de revestimento externo. Além da possibilidade de realizar um trabalho experimental para a validação dos resultados encontrados nesse trabalho.

REFERÊNCIAS

AGUILLAR, E.M.C. **Desempenho térmico e energético de uma edificação na região amazônica brasileira**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará. Belém-PA. 2018.

ATEM, Camila Gregório. **Fachadas ventiladas: hacia un diseño eficiente en Brasil**. 310 f. Tese (Doutorado em arquitetura) Departament de Construccions Arquitectòniques I- Universitat Politècnica De Catalunya, Barcelona, Espanha. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15 220: Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro , 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15 5752: Desempenho de edificações habitacionais**. Rio de Janeiro , 2013

BALOCCO, Carla. **A simple Model to study ventilated facades energy perfomance**. Energy and Buildings, n 34, p 469- 475, 2002.

BARBOSA, K.H; GHISI,E. **Proposta de calibração de um modelo computacional de uma tipologia de residência unifamiliar em Goiânia**. XIV ENCAC- Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. Anais. Camboriu-SC, 2017.

BASTOS, T. X; *et al.* **Aspectos climáticos de Belém nos últimos cem anos**. Embrapa Amazônia Oriental. Belém, 2002.

BOGO, A. J. **Reflexões críticas quanto as limitações do texto das normas brasileiras de desempenho NBR 15220-3 e NBR 15575**. Holos, ano 32, vol. 7. 2016.

BRAGA, Nathália; *et al.* **Espacialidade Arquitetônica e Desempenho Térmico de Residências Contemporâneas em Clima Tropical Quente e Úmido**. Comparação do desempenho térmico de revestimentos brancos. XII Encontro Nacional e VIII Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído - ENCAC/ELACAC. Brasília, 2013.

CBIC. **Câmara Brasileira da Indústria da construção**. Guia orientativo para atendimento a norma ABNT NBR 15 575/2013- Desempenho de edificações Habitacionais. Brasília, 2013.

ELETOBRAS; PROCEL. **Manual para Aplicação do RTQ-R**. 2012. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/Manual_de_aplica%C3%A7%C3%A3o_do_%20RTQ-R-v01.pdf > Acesso em 7 de ago. de 2018.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus Engineering Reference**. U.S. Department of Energy. 2016.

EPE. **Balço Energético Nacional 2018: Ano base 2017** / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2018.

FERNANDES, L.O; LABAKI, C. L. **Calibração de Edifício Institucional na Cidade de Campinas- SP**. ENCAC 2015. Anais. Campinas-SP 2015.

GALVARRO, S. F. S; CARLO, J. C; *et al.* **Calibração de simulação térmica de uma unidade habitacional em edifício multifamiliar**. ENCAC, Anais. Brasília, 2013.

GALVÃO, J.; BERMANN, C. **Crise hídrica e energia: conflitos no uso múltiplo das águas**. estudos avançados 29 (84), 2015.

GIANCOLAA E.; SANJUANA C ; BLANCO E; .HERAS. M.R **Experimental assessment and modelling of the performance of an open joint ventilated façade during actual operating conditions in Mediterranean climate**. Energy Build. n 54, 2012.

GRIFFITH, B. **A model for naturally ventilated cavities on the exteriors of opaque building thermal envelopes**, 2003.

GOMES, Adriano Pinto. **Avaliação do Desempenho Térmico de Edificações Unifamiliares em Light Steel Framing**. 2007. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2007.

GU, Lixing. **Airflow Network Modeling in EnergyPlus**. 10th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition, Beijing, China. p. 964-971. 2007.

GUSMÃO L.; SOARES, D. **Produção desigual do espaço: o processo de verticalização em Belém (PA)**, Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales. Março, 2018.

GUILLÉN I, GÓMEZ-LOZANO V, FRAN JM, LÓPEZ-JIMÉNEZ PA. **Thermal behavior analysis of different multilayer façade: numerical model versus experimental prototype**. Energy Build. n 90, p 79-184, 2014.

IBANEZ-PUY, Maria; *et al.* **Opaque Ventilated façades: Thermal and energy performance review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews n 79, p 180 -191, 2017.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Aglomerados Subnormais: informações territoriais. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. Disponível em https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/552/cd_2010_agrn_if.pdf. Acesso em 10 de ago. de 2018.

LABAT M, WOLOSZYN M, GARNIER G, RUSAOUEN G, ROUX JJ. **Impact of direct solar irradiance on heat transfer behind an open-jointed ventilated cladding: experimental and numerical investigations.** Sol Energy. p. 86: 2549–60. 2012.

LOBO, E. B. C. **Desempenho térmico de painéis em light steel framing em uma habitação de interesse social frente ao clima equatorial da Amazônia.** Dissertação de mestrado (arquitetura e urbanismo) Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Pará. Belém-Pa, 2018.

MACIEL A.C.F; CARVALHO M.T. **Operational energy of opaque ventilated façades in Brazil.** Journal of Building Engineering. n 25, 2019.

MARIANE, Aline. **Fachada Ventilada- Sistema cuja execução é rápida exige cuidados minuciosos quanto á verificação de dimensionamento, locais de perfuração das placas e peso dos painéis.** Artigo, 2014. Disponível em: <<http://construcaomercado.pini.com.br/negociosincorporacaoconstrucao/153/artigo309960-1.aspx>>. Acesso em set. de 2017.

MEDEIROS, J.S. et al. **Tecnologias de vedação e revestimento para fachadas.** Rio de Janeiro: Instituto do Aço Brasil / CBCA, 2014. (Série Manual de construção em aço).

MENDES, N; WESTHPHAL, F.S; LAMBERTS, R; NETO, J.A.B.C. **Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil.** Ambiente construído, Porto Alegre, V.5, n.4, p.47-68. 2005.

MIGUEL Mora-Pérez GL-PPAL-J, LÓPEZ-PATIÑO G, LÓPEZ-JIMÉNEZ PA. **Quantification of ventilated façade effect due to convection in buildings - buoyancy and wind driven effect.** Res Appl Mech Eng 2014.

MIZGIER, M. O.; PENSO, E. A. **Desempenho térmico de fachadas ventiladas como proposta de retrofit em edifícios comerciais na cidade de São Paulo.** XVI encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. São Paulo, 2016.

MORAES, D.; FILHO, M,. **Contribuição das chuvas do período da tarde em belém e possíveis relações com a normal climatológica.** Revista Brasileira de Climatologia. ISSN: 2237-8642. Ano 14 – Vol. 23 – jul/dez, 2018.

MOURA, ERIDE. **Fachadas respirantes.**Artigo, 2009. Disponível em:http://www.inovateconsultores.com.br/lib/media/imprensa/techne/144/techne_144_fachada_ventilada_capa.pdf > Acesso em 20 de jul. de 2019.

MULLER, A. **Desenvolvimento de um protótipo e análise do comportamento térmico de fachada ventilada com placas cerâmicas de Grês porcelanato.** 173 f. Tese (Doutorado em Ciências e engenharia de materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina. 2003.

NABONI, E. **Ventilated Opaque Walls - A Performance Simulation Method and Assessment of Simulated Performance**. Presentation at Lawrence Berkeley National Laboratory Environmental Energy Technologies Division. Califórnia, 2007.

OLIVEIRA, L. K.S; *et al.* **Simulação computacional da eficiência energética para uma arquitetura sustentável**. Holos, V 4, 2016.

OLIVEIRA, P. F. **Metodologia De Manutenção De Edifícios – Fachadas Ventiladas**. 159 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2011.

Patania F.; Gagliano A. ; Nocera F.; Ferlito .; Galesi A.; **Thermofluid-dynamic analysis of ventilated facades**. Energy Build. n. 42 p.1148–1155 Elsevier Science Ltd. 2010.

PENSO, Emerson Antônio. **Análise do desempenho térmico da fachada ventilada como alternativa para retrofit de envoltória de edifícios comerciais**. Dissertação de mestrado (em Arquitetura e Urbanismo). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – PosARQ, da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis-SC. 2017.

PEREIRA, Cláudia Donald; *et al.* **Comparação do desempenho térmico de revestimentos brancos**. XII Encontro Nacional e VIII Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído - ENCAC/ELACAC. Brasília, 2013.

SÁNCHEZ MN, SANJUAN C, SUÁREZ MJ, HERAS MR. **Experimental assessment of the performance of open joint ventilated façades with buoyancy-driven airflow**. Sol Energy .n. 44, p.91:131. 2013.

SANTO, Amabelli D'ell. *et al.* **Conforto e desempenho térmico em contradição na NBR 15575**. Cadernos proarq 20. Pág 115 . 2013.

SILVA, A. S.; GHISI, E. **Análise comparativa dos resultados do desempenho térmico da envoltória de uma edificação residencial pelos métodos de simulação do RTQ-R e da NBR 15575-1**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 213-230, jan./mar. 2014.

SILVA, B. I. C. **Comportamento Térmico De Fachadas Ventiladas**. 94 f. Dissertação (mestrado em engenharia civil) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.

SILVA, P. M. A. **Aplicação do programa energyplus como ferramenta do projecto de comportamento térmico de edifícios de habitação**. Dissertação de mestrado (engenharia civil) . Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.

SIQUEIRA JÚNIOR, Amaury Antunes de. Tecnologia de fachada-cortina com placas de grês porcelanato. 220 f. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – escola politécnica da universidade de São Paulo, São Paulo. 2003.

SORGATO, Márcio José, MELO, Ana Paula, LAMBERTS, Roberto. **Análise do método de simulação de desempenho térmico da norma NBR 15.575**. XII Encontro Nacional e VIII Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído - **ENCAC/ELACAC**. Brasília –DF. 2013.

SOUZA, Fernando Manuel Fernandes De. **Fachadas Ventiladas Em Edifícios Tipificação De Soluções E Interpretação Do Funcionamento Conjunto Suporte/Acabamento**. 138 f. Dissertação (mestrado em engenharia civil) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2010.

STAZI F., VEGLIÒ A., DI PERNA C. **Experimental assessment of a zinc-titanium ventilated façade in a mediterranean climate**. Energy Build, 2014.

SUÁREZ, María José; et al. **Energy evaluation of an horizontal open joint ventilated façade**. Applied Thermal engineering, n 37, p. 302-313, 2012.

VINAGRE, Natália Daniele de Lima. **Avaliação de desempenho térmico de edificação verticalizada em Belém- PA**. Programa de pós-graduação em arquitetura e urbanismo UFPA. Pará, Belém. 2013.