UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

FILIPE GALINA COSTALONGA

A INFLUÊNCIA DOS SUBSISTEMAS DE VEDAÇÃO VERTICAL NO DESEMPENHO ENERGÉTICO DO EDIFÍCIO.

VITÓRIA

2020

FILIPE GALINA COSTALONGA

A INFLUÊNCIA DOS SUBSISTEMAS DE VEDAÇÃO VERTICAL NO DESEMPENHO ENERGÉTICO DO EDIFÍCIO.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito final para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.
Orientadora: Profª. Drª. Cristina Engel de Alvarez.

VITÓRIA

Março de 2020

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

Costalonga, Filipe Galina, 1987-
C837i A influência dos subsistemas de vedação vertical no desempenho energético do edifício. / Filipe Galina Costalonga. - 2020.
104 f. : il.

Orientadora: Cristina Engel de Alvarez.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Energia Elétrica - consumo. 2. Ar condicionado. 3. Edifícios de apartamentos. I. Alvarez, Cristina Engel de. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

A INFLUÊNCIA DOS SUBSISTEMAS DE VEDAÇÃO VERTICAL NO DESEMPENHO ENERGÉTICO DO EDIFÍCIO

Filipe Galina Costalonga

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil.

Aprovada no dia **04 de março de 2020** por:

Profa. Dra. Cristina Engel de Alvarez
Doutora em Arquitetura e Urbanismo
Orientador – UFES

Profa. Dra. Geilma Lima Vieira
Doutora em Engenharia Civil
Examinadora Interna – UFES

Profa. Dra. Edna Aparecida Nico Rodrigues
Doutora em Arquitetura e Urbanismo
Examinadora Externa - UFES

Vitória – ES, março de 2020

Às minhas sobrinhas, Alice e Heloísa.

AGRADECIMENTOS

À Prof.ª Dr.ª Cristina Engel de Alvarez, por ter me aceitado como orientando, pelas orientações esclarecedoras, pelo auxílio incondicional ao longo da pesquisa, e, principalmente, por dar sempre bons exemplos de profissionalismo.

À Prof.ª Dr.ª Geilma Lima Vieira, por todo conhecimento e experiências compartilhadas ao longo das disciplinas do mestrado, e, também, pela solicitude e paciência sempre que necessitei de sua ajuda.

À Prof.ª Dr.ª Edna Aparecida Nico Rodrigues, pelas conversas, dicas e esclarecimentos. Agradeço também por estar sempre disposta a contribuir, independentemente do que lhe for apresentado.

A todos os professores do PPGEC e PPGAU pelos ensinamentos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo – FAPES, que por meio do projeto “Por um Estado Sustentável”, propiciou bolsas de estudos para os alunos de iniciação científica que contribuíram diretamente para este trabalho.

Aos alunos de iniciação científica, Lucas Brunelli e Thiago Lima, pela ajuda e grande contribuição na fase inicial desta pesquisa.

A todos os amigos do Laboratório de Planejamento e Projetos da UFES, que contribuíram direta ou indiretamente para esta pesquisa, pela convivência agradável, pelas conversas, e, principalmente, por propiciarem um excelente ambiente de trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, que propiciou uma bolsa de estudos ao longo dos 24 meses desta pesquisa.

À Bianca, pelas conversas nos momentos mais difíceis e por todo companheirismo e paciência.

À minha mãe, Ana Maria, e a Deus, por tudo.

‘‘Quando vacilei e hesitei entre prosseguir ou desistir, minha devoção ao trabalho e meu entusiasmo pelo aprendizado prevaleceram; e onde a inteligência me falhou, muito estudo e dedicação compensaram’’.

LEON BATTISTA ALBERTI
De re aedificatoria.

RESUMO

O mundo está se tornando cada vez mais urbanizado. Nestas circunstâncias, reduzir o consumo de energia proveniente dos edifícios é um aspecto de extrema importância para o desenvolvimento sustentável das novas edificações que serão construídas para suprir o grande aumento populacional e a consequente ampliação na urbanização. O objetivo desta pesquisa foi avaliar a influência da envoltória e de estratégias passivas de resfriamento no consumo energético de um ambiente de longa permanência em uma edificação residencial multifamiliar, localizada na Região Metropolitana da Grande Vitória. A metodologia foi dividida em três etapas: na primeira, definiu-se a tipologia do edifício a partir de critérios previamente estabelecidos, e caracterizado o ambiente selecionado para as simulações de desempenho higrotérmico; na segunda etapa, foi selecionado o software para as simulações e configurados os parâmetros a serem testados com as diferentes variáveis construtivas; na terceira etapa, foi escolhido e aplicado o método de cálculo do custo financeiro para refrigeração do ambiente simulado, considerando as orientações Norte, Leste, Sul e Oeste, variando também a envoltória do ambiente(vedação vertical em blocos cerâmicos, blocos de concreto e steel frame), e outros elementos de fachada (com e sem sombreador na janela, com fachada ventilada, e com o sombreador e a fachada ventilada simultaneamente). Os resultados demonstraram que o maior consumo energético foi com o ambiente com abertura voltada para Norte, quando considerado apenas o sistema construtivo em blocos de concreto, com um consumo de 737,71 kWh/ano. Considerando a mesma configuração, porém com o uso da fachada ventilada e de elemento sombreador, este mesmo ambiente consumiu 322,69 kWh/ano, uma diminuição de 59%, o que representa uma economia de R$ 326,04/ano. Os resultados demonstraram, ainda, que o ambiente com o sistema construtivo em *steel frame* apresentou o menor consumo apenas para as situações onde não foi utilizada a fachada ventilada. Quando utilizada, o menor consumo foi com a envoltória em blocos de concreto. O ambiente com sistema construtivo em blocos de concreto em conjunto com o uso do sombreador e da fachada ventilada, voltado para a orientação Sul, foi responsável pelo menor consumo energético encontrado, com uma redução que chegou a 66% quando comparado com o pior desempenho.

Palavras-chave: Eficiência energética; Estratégias passivas; Consumo energético.

ABSTRACT

The world is becoming increasingly urbanized. In these circumstances, reducing the consumption of energy from buildings is an extremely important aspect for the sustainable development of the new buildings that will be built to supply the accelerated urbanization and the great population increase. The aim of this research was to evaluate the influence of the envelope and passive cooling strategies on the energy consumption of a prolonged stay environment in a multifamily residential building, located in the Metropolitan Region of the Greater Vitória. The methodology was divided into three stages. In the first, the building typology was defined based on previously established criteria, and characterized the environment selected for the hygrothermal performance simulations. In the second stage, the software for the simulations was selected and the parameters to be tested with the different constructive variables were configured. In the third stage, the method of calculating the financial cost for cooling the simulated environment was chosen and applied, considering the North, East, South and West orientations, varying the environment envelope with the use of the vertical envelope in ceramic blocks, concrete blocks and steel frame, and, the combination of these systems: no blinds in the window; with blinds; with the ventilated facade; and, with the blinds and the ventilated facade simultaneously. The results showed that the greatest energy consumption was with the environment with an opening facing North, when considering only the concrete block construction system, with a consumption of 737,71 kWh/year. Considering the same configuration, but with the use of the ventilated facade and shading element, this same environment consumed 322,69 kWh /year, a decrease of 59%, which represents a savings of R$ 326,04/year. The results also demonstrated that the environment with the steel frame construction system presented the lowest consumption only for situations where the ventilated facade was not used. When used, the lowest consumption was with the envelope in concrete blocks. The environment with a concrete block construction system in conjunction with the use of the blinds and the ventilated facade, facing the South orientation, was responsible for the lowest energy consumption found, with a reduction that reached 66% when compared to the worst performance.

Keywords: Energy efficiency; Passive strategies; Energy consumption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo tridimensional do edifício utilizado nas simulações 34
Figura 2: Planta baixa do pavimento tipo do modelo hipotético analisado 35
Figura 3: Perspectiva da unidade habitacional adotada nas simulações 36
Figura 4:modelo de janela utilizado.....37
Figura 5: Sistema construtivo para vedação vertical em blocos cerâmicos (U = 2,46 W/m². K).....37
Figura 6: Sistema construtivo para vedação vertical em blocos de concreto (U = 2,78 W/m². K).....38
Figura 7: Sistema construtivo para vedação vertical em *steel frame* (U = 0,38 W/m². K) 38
Figura 8: Modelo de janela adaptado com veneziana móvel 39
Figura 9: Sistema de fachada ventilada 39
Figura 10: Indicação do ambiente em relação as orientações geográficas simuladas 42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Padrão de ocupação do dormitório para dias de semana e finais de semana 42
Gráfico 2: Padrão de uso da iluminação 43
Gráfico 3: Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para norte 52
Gráfico 4: Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para Norte 53
Gráfico 5: Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para leste 54
Gráfico 6: Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para Leste 54
Gráfico 7: Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para leste 55
Gráfico 8: Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para oeste 56
Gráfico 9: Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para sul57
Gráfico 10: Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para Sul57
Gráfico 11: Consumo energético ao longo do ano para cada orientação.....58
Gráfico 12: Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para norte, com sombreador.....60
Gráfico 13: Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para norte, com sombreador.....61
Gráfico 14: Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para leste, com sombreador.....61
Gráfico 15: Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para leste, com sombreador.....62
Gráfico 16: Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para oeste, com sombreador 63
Gráfico 17: Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para oeste, com sombreador.....64
Gráfico 18: Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para sul, com sombreador.....65
Gráfico 19: Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para sul, com sombreador.....66
Gráfico 20: Consumo energético ao longo do ano para cada orientação com o uso do sombreador na abertura 67
Gráfico 21: Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para norte, com fachada ventilada.....68

Gráfico 22: Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para norte, com fachada ventilada 69
Gráfico 23: Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para oeste, com fachada ventilada 70
Gráfico 24: Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para oeste, com fachada ventilada 70
Gráfico 25: Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para leste, com fachada ventilada 71
Gráfico 26: Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para leste, com fachada ventilada 72
Gráfico 27: Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para sul, com fachada ventilada 73
Gráfico 28: Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para sul, com fachada ventilada 73
Gráfico 29: Consumo energético ao longo do ano para cada orientação com o uso da fachada ventilada 74
Gráfico 30: Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para norte, com fachada ventilada e sombreador 75
Gráfico 31: Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para norte com fachada ventilada e sombreador 76
Gráfico 32: Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para oeste com fachada ventilada e sombreador 76
Gráfico 33: Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para oeste com fachada ventilada e sombreador 77
Gráfico 34: Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para leste com fachada ventilada e sombreador 78
Gráfico 35: Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para leste com fachada ventilada e sombreador 78
Gráfico 36: Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para sul, com fachada ventilada e sombreador 79
Gráfico 37: Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para sul, com fachada ventilada e sombreador 80
Gráfico 38: Consumo energético ao longo do ano para cada orientação com o uso da fachada ventilada e do sombreador 80
Gráfico 39: Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para Norte considerando todas variáveis simuladas. 82
Gráfico 40: Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para leste, considerando todas variáveis simuladas. 83
Gráfico 41: Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para oeste considerando todas variáveis simuladas. 84
Gráfico 42: Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para sul considerando todas variáveis simuladas. 85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ofertas de unidades por tipologia. 34
Tabela 2: Taxa metabólica para cada atividade 43
Tabela 3: Densidade de potência instalada para iluminação 44
Tabela 4: Propriedades térmicas dos componentes das paredes com bloco cerâmico 45
Tabela 5: Propriedades térmicas dos componentes das paredes com bloco de concreto 45
Tabela 6: Propriedades térmicas dos componentes das paredes em *steel frame* 46
Tabela 7: Especificações do modelo e das propriedades térmicas dos materiais que compõem a janela 47
Tabela 8: Propriedades térmicas dos materiais que compõem a fachada ventilada 48
Tabela 9: Percentual de redução do consumo energético para a orientação norte, considerando cada estratégia simulada 82
Tabela 10: Percentual de redução do consumo energético para a orientação leste, considerando cada estratégia simulada 83
Tabela 11: Percentual de redução do consumo energético para a orientação oeste para cada estratégia simulada 84
Tabela 12: Percentual de redução do consumo energético para a orientação sul para cada estratégia simulada 86
Tabela 13: Custo em (R$) reais para refrigeração do ambiente voltado para a orientação norte, considerando cada variável simulada 86
Tabela 14: Custo em (R$) reais para refrigeração do ambiente voltado para a orientação leste, considerando cada variável simulada 87
Tabela 15: Custo em (R$) reais para refrigeração do ambiente voltado para a orientação oeste considerando cada variável simulada 87
Tabela 16: Custo em (R$) reais para refrigeração do ambiente voltado para a orientação sul considerando cada variável simulada 88
Tabela 17:Síntese com o somatório anual das simulações analisadas. 88

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
CO_2	Dióxido de Carbono
COFINS	Contribuição para Financiamento da Seguridade Social
COP	Coeficiente de performance
EDP	Energias de Portugal
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPS	Poliestireno expandido
ESCELSA	Espírito Santo Centrais Elétricas
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
kWh	Quilowatt hora
NBR	Norma
PASEP	Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público
PIS	Programa de Integração Social
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
pWh	Petawatt hora
RMGV	Região Metropolitana da Grande Vitória
RTQR	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
SINDUSCON	Sindicato da Industria da Construção Civil no Estado do Espírito Santo
TE	Tarifa de energia
TUSD	Tarifa de uso do sistema de distribuição
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16

1.1 OBJETIVOS 18

1.1.1 Objetivos Específicos 19

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 19

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21

2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ESTRATÉGIAS PASSIVAS 21

2.2 A INFLUÊNCIA DA ENVOLTÓRIA NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS EDIFICAÇÕES E O USO DE NOVAS TECNOLOGIAS 27

3 METODOLOGIA 33

3.1 DEFINIÇÃO DA TIPOLOGIA E DO AMBIENTE SIMULADO 33

3.2 SIMULAÇÕES ENERGÉTICAS E CONFIGURAÇÕES DOS MODELOS 40

3.2.1 Software para simulação computacional 40

3.2.2 Configuração dos parâmetros de simulação 41

3.3 CÁLCULO DO CUSTO FINANCEIRO PARA REFRIGERAÇÃO DO AMBIENTE SIMULADO 48

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS 51

4.1 DESEMPENHO ENERGÉTICO DO AMBIENTE CONSIDERANDO APENAS OS SISTEMAS CONSTRUTIVOS EM STEEL FRAME, BLOCO CERÂMICO E BLOCO DE CONCRETO 51

4.2 DESEMPENHO ENERGÉTICO DO AMBIENTE CONSIDERANDO OS SISTEMAS CONSTRUTIVOS EM STEEL FRAME, BLOCO CERÂMICO E BLOCO DE CONCRETO, COM O USO DO SOMBREADOR NA ABERTURA 59

4.3 DESEMPENHO ENERGÉTICO DO AMBIENTE CONSIDERANDO OS SISTEMAS CONSTRUTIVOS EM STEEL FRAME, BLOCO CERÂMICO E BLOCO DE CONCRETO COM O USO DA FACHADA VENTILADA E SEM SOMBREADOR NA JANELA. 67

4.4 DESEMPENHO ENERGÉTICO DO AMBIENTE CONSIDERANDO OS SISTEMAS CONSTRUTIVOS EM STEEL FRAME, BLOCO CERÂMICO E BLOCO DE CONCRETO, COM O USO DA FACHADA VENTILADA E COM SOMBREADOR NA ABERTURA. 74

4.5 ANÁLISE INDIVIDUAL DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DO AMBIENTE CONSIDERANDO TODAS AS VARIÁVEIS SIMULADAS DE ACORDO COM CADA ORIENTAÇÃO 81
4.6 GASTOS FINAIS EM MOEDA CORRENTE PARA RESFRIAR O AMBIENTE ANALISADO COM O USO DO APARELHO CONDICIONADOR DE AR COM BASE NO CONSUMO ANUAL DO AMBIENTE PARA CADA ORIENTAÇÃO.....86

5 CONCLUSÕES 91

5.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....93
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....94

REFERÊNCIAS.....96

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

O mundo está se tornando cada vez mais urbanizado. Em 1950, apenas 30% da população mundial vivia em áreas urbanas, uma proporção que cresceu para 55% em 2018, e para 2050, a expectativa é de que 68% da população mundial seja urbana (UNITED NATIONS, 2018). Estima-se, que poderá haver um aumento de 2,5 bilhões de pessoas nas cidades até 2050, devido a isso, é fundamental criar cidades com baixa produção de carbono, resilientes e habitáveis. As cidades não só apenas contribuem para as mudanças climáticas globais emitindo a maioria dos gases de efeito estufa, mas também são particularmente vulneráveis aos efeitos das alterações climáticas e do clima extremo (KAMMEN; SUNTER, 2016).

Atualmente, cerca de uma em cada oito pessoas vive em 33 megacidades com mais de 10 milhões de habitantes, e a expectativa é de que até 2030, o mundo terá 43 megacidades, sendo a maioria delas em países em desenvolvimento. Diante disso, uma comunidade urbana bem gerida, pode ajudar a maximizar os benefícios da aglomeração, minimizando a degradação ambiental e outros potenciais impactos adversos de um número crescente de habitantes da cidade (UNITED NATIONS, 2018).

Nestas circunstâncias, reduzir o consumo de energia e as emissões de carbono provenientes dos edifícios é um aspecto de extrema importância para o desenvolvimento sustentável das novas edificações que serão construídas para suprir esta acelerada urbanização (PAN; PAN, 2018).

Sendo um dos principais componentes das cidades, as edificações têm sido responsáveis por grande parte dos problemas ambientais atuais, isso devido, entre outros aspectos, à energia que alimenta os edifícios e as atividades desenvolvidas dentro deles. Estima-se, que a indústria da construção civil é responsável por consumir mais de 32% dos recursos naturais do planeta, 25% da água, 40% da energia, gerar mais de 25% dos resíduos sólidos e emitir cerca de 35% do total dos gases de efeito estufa globalmente (YEHEYIS *et al.*, 2013; SOUST-VERDAGUER; LLATAS; GARCÍA-MARTÍNEZ, 2017).

Em relação a emissão de gases de efeito estufa, o setor da construção civil deve ser o principal alvo dos esforços de mitigação destes gases, uma vez que representaram 36% do uso final de energia e 39% das emissões de dióxido de carbono (CO_2)

relacionadas a energia e processos em 2018 (GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION, 2019). Destaca-se, ainda, que aproximadamente 80% do consumo energético ocorre ao longo da vida útil das edificações (WELKER, 2013). O valor absoluto do consumo de energia do setor de construção era, em 2010, em torno de 23,7 PWh, e de acordo com o cenário de referência da Agência Internacional de Energia, pode chegar a 38,4 PWh em 2040 (INTERNATIONAL ..., 2013).

Em todo planeta urbanizado, independentemente de seu uso, edifícios consomem uma grande quantidade de energia. Contudo, vale destacar a relevância do setor residencial, e segundo Xia *e outros* (2019), esta categoria quase triplicou seu consumo desde 2001. De acordo com os autores, isso é devido à acelerada urbanização, ao aumento da área de construção por pessoa e também pela popularização dos aparelhos condicionadores de ar.

Estima-se que em 2018, os edifícios representavam 30% do uso total de energia global, dos quais, 22% eram provenientes de edifícios residenciais e 8% de edifícios não residenciais (GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION, 2019). Dados sobre o uso de energia global demonstram um aumento generalizado em inúmeros países, no entanto, nos países em desenvolvimento esse crescimento é ainda mais impactante, com um aumento médio anual de 2,2% na última década (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018).

Isto vem sendo impulsionado, principalmente, pelo aumento da renda nos países emergentes e em desenvolvimento. À medida que esses países se tornam mais ricos, mais pessoas estão obtendo acesso a residências de melhor qualidade e serviços modernos de energia, uma tendência que provavelmente continuará, pois ainda há uma lacuna significativa de acesso a estes serviços. Por exemplo, dos quase 3 bilhões de pessoas que vivem nas regiões mais quentes do mundo, menos de 10% atualmente têm acesso a um aparelho condicionador de ar. O aumento da adoção de aparelhos condicionadores de ar, particularmente nessas regiões, pode triplicar a demanda por eletricidade utilizada para a refrigeração de ambientes até 2050, respondendo por mais de 20% do potencial de crescimento da demanda global de eletricidade (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019).

No Brasil, apenas o setor residencial é responsável por 21,5% do consumo energético, ficando atrás somente do setor industrial, que representa 31,8% do consumo total de energia (BALANÇO..., 2018). Além disso, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE)

(2016), destacou, que o consumo de energia no setor residencial aumentaria em 1,6% ao ano entre 2013 e 2050. Este setor foi responsável por 16% do consumo energético final e por mais de 50% do consumo elétrico em 2016. A maior parte do aumento deste consumo de energia proveniente dos edifícios está associado a atividades do setor econômico terciário e usuários residenciais. Destaca-se, ainda, o crescimento populacional e a demanda por energia e por novos edifícios, que está aumentando cada vez mais (ZUO; ZHAO, 2014; SANTAMOURIS, 2016).

Sendo assim, o aumento da eficiência energética das edificações pode ser considerado como uma estratégia primordial na mitigação dos impactos ambientais provenientes da ação do dióxido de carbono (NAGY, *et al.*, 2015). Neste contexto, a melhoria no desempenho energético dos edifícios é uma das formas mais simples, imediatas e econômicas para reduzir o consumo de energia de um país (ZHANG, *et al.*, 2015).

Adicionalmente, Lamberts, Dutra e Pereira (2014), enfatizam a necessidade da implementação de práticas sustentáveis e soluções efetivas nas edificações, considerando as peculiaridades locais e possibilitando, assim, a construção de edifícios energeticamente eficientes. Caso contrário, até 2035 a demanda global por energia poderá crescer mais de um terço em comparação com o nível de consumo atual, e a maior parcela deste aumento será proveniente de países em desenvolvimento (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2015).

Diante do exposto, este trabalho justifica-se por buscar avaliar alternativas de diferentes modelos de envoltória juntamente com estratégias passivas de resfriamento que visam mitigar o consumo energético proveniente do uso de aparelhos condicionadores de ar em edificações residenciais.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a influência dos subsistemas de vedação vertical e de estratégias passivas de resfriamento no consumo energético de um ambiente de longa permanência em uma edificação residencial multifamiliar, localizada na Região Metropolitana da Grande Vitória.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da pesquisa foram:

- Estabelecer uma tipologia de edifício residencial representativa do setor, bem como selecionar materiais para a composição das fachadas;
- Simular diferentes configurações do ambiente, tais como orientação, subsistemas de vedação vertical e uso de sombreadores, visando mensurar a variação no consumo e no custo de energia para cada solução adotada.

1.2 Estrutura da dissertação

O desenvolvimento da dissertação está estruturado em seis capítulos, conforme descrito a seguir:

- **Capítulo 1**, refere-se à introdução, contendo a contextualização da pesquisa, objetivo geral e específicos, bem como a estrutura de redação da dissertação;

- **Capítulo 2**, apresenta a revisão bibliográfica dos temas principais abordados nesta pesquisa, ou seja, o tema eficiência energética e a relevância do uso de estratégias passivas, assim como a influência dos subsistemas de vedação vertical no consumo energético de edificações;

- **Capítulo 3**, apresenta a metodologia utilizada para a obtenção dos resultados, sendo composto basicamente pelas seguintes etapas: etapa 1 - definição da tipologia do edifício utilizado, justificativa e caracterização do ambiente selecionado para as simulações; etapa 2 – escolha do software utilizado nas simulações, configuração dos parâmetros construtivos com as diferentes variáveis propostas; e, etapa 3 – apresentação do método utilizado para calcular o custo (R$) financeiro para refrigeração.

- **Capítulo 4**, são apresentados os resultados e as discussões, considerando os valores obtidos nas simulações e a interpretação dos dados a partir do referencial teórico estabelecido;

- **Capítulo 5** contempla as conclusões obtidas pela análise dos resultados, limitações da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros; e

- **Referências bibliográficas**, onde são listados os títulos utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda os principais temas necessários ao embasamento conceitual e metodológico da pesquisa, enfatizando a necessidade de as edificações serem mais eficientes energeticamente, utilizando, principalmente, estratégias passivas de resfriamento. Trata, também, dos aspectos relacionados à influência da envoltória para a obtenção de eficiência energética nos edifícios.

2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ESTRATÉGIAS PASSIVAS

Reconhece-se que as decisões de projetos arquitetônicos têm um efeito importante no desempenho ambiental e energético dos edifícios. Em seu livro "*Design with Climate*" (OLGYAY,1963 *apud* NABONI *et al.*, 2015), Victor Olgyay já descrevia como a arquitetura deve ser inspirada pela biologia para uma definição da medida e finalidade dos requisitos de conforto; pela meteorologia, para uma descrição precisa das condições climáticas existentes; e pelas ciências da engenharia, para uma solução e execução racional. Usando as descobertas de outras ciências e aplicando-as em quatro regiões climáticas distintas – temperada, fria, quente e árida – Victor Olgyay mostrou como se pode chegar a novas interpretações e uma maior exatidão nas teorias arquitetônicas de orientação, sombreamento e forma de construção, movimentos do ar, localização e efeitos dos materiais no desempenho das edificações.

Quase 30 anos depois, Lechner (1991), discutiu como a sustentabilidade no projeto de sistemas de aquecimento, resfriamento e iluminação em edifícios poderia ser realizada com mais facilidade, entendendo a lógica de uma abordagem em três níveis, dos quais, o primeiro e o segundo níveis estão profundamente enraizados na pesquisa de Olgyay.

O primeiro nível, consiste em decisões de projeto arquitetônico e estrutural de edifícios. Se todas as decisões corretas forem tomadas com o objetivo de minimizar o consumo de energia, é possível obter uma redução de até 60% da demanda de energia para aquecimento, resfriamento e iluminação. O segundo nível envolve o uso de fontes naturais de energia através de métodos como aquecimento passivo, resfriamento passivo e aproveitamento da luz natural. Segundo o autor, as decisões

adequadas tomadas neste momento podem reduzir a demanda de energia em até 20% (LECHNER, 1991).

Assim, de acordo com Lechner (1991), as estratégias dos níveis um e dois, ambas puramente arquitetônicas, podem reduzir a demanda de energia dos edifícios em até 80%. Já o nível três, consiste em projetar os equipamentos mecânicos utilizados nos edifícios para serem o mais energeticamente eficientes possível.

O conceito de eficiência energética em edifícios, refere-se à quantidade de energia necessária para alcançar as condições ambientais desejadas, minimizando o seu consumo de energia (OMER, 2008). Aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC) são os maiores consumidores de energia em edifícios (CHAN; RIFFAT; ZHU, 2014). Ekici e Aksoy (2011) listaram os parâmetros que afetam os requisitos de energia do edifício da seguinte forma: parâmetros físico-ambientais – temperatura externa diária, radiação solar, velocidade e direção do vento – e parâmetros de projeto, tais como fatores de forma, transparência da superfície, orientação, temperatura, propriedades físicas dos materiais de construção e até mesmo o espaçamento entre os edifícios.

O termo arquitetura bioclimática refere-se a um método alternativo de construção de edifícios nos quais as condições climáticas locais são consideradas e diversas tecnologias solares passivas são usadas com o objetivo de melhorar a eficiência energética das edificações (SINGH; MAHAPATRA; ATREYA, 2010). O termo tecnologias solares passivas, refere-se a técnicas de aquecimento ou resfriamento que absorvem ou protegem passivamente a energia proveniente do sol (TZIKOPOULOS; KARATZA; PARAVANTIS, 2005). O projeto arquitetônico quando elaborado com ênfase em estratégias bioclimáticas emprega tecnologias e princípios de projeto apropriados, com base e um foco reflexivo no clima e no meio onde está inserido (MARIA, 2009).

Desta forma, a economia de energia em edifícios residenciais pode ser obtida através de intervenções passivas que minimizam o consumo energético. Nesta abordagem, intervenções para reduzir o consumo de energia podem ser implementadas no próprio projeto do edifício ou através do uso de materiais e componentes específicos. Essas intervenções tentam reduzir a demanda líquida de energia em edifícios residenciais (CHEN; YANG; LU, 2015).

Em síntese, o projeto bioclimático utiliza meios passivos para atingir um certo nível de conforto, com o mínimo uso possível de energia e baixas emissões de carbono. A abordagem do projeto Bioclimático, especialmente para clima tropical, é usada para minimizar, principalmente, o uso da ventilação mecânica, da iluminação artificial e do ar condicionado, que consomem uma grande quantidade de energia (AGUGLIARO *et al.* 2015).

De acordo com a *International Energy Agency* (2018), as medidas de eficiência energética têm o potencial de fornecer mais de 60% das reduções de emissões de CO_2 relacionadas à energia. Alguns autores já comprovaram este potencial, como Invidiata e Ghisi (2016), por exemplo, que demonstraram que é possível reduzir em até 50% a demanda futura de energia para refrigeração e aquecimento nas residências brasileiras por meio de estratégias projetuais passivas.

Estas estratégias também referem-se à disposição dos edifícios, que está ligada principalmente à orientação relativa ao sol e ao vento; ao espaço, que está relacionado ao planejamento do local, o movimento do ar e as aberturas - que tem influência direta dependendo do tamanho-posição -; da proteção que recebem, com destaque para os sombreadores; e, da envoltória do edifício, que envolve as paredes, coberturas e materiais utilizados (LATHA; DARSHANA; VENUGOPAL, 2015).

Em relação a orientação mais adequada para a implantação das edificações e, consequentemente, uma melhor distribuição dos espaços internos das edificações, estudos provaram que uma orientação adequada do edifício é essencial para a eficiência energética, e que isso pode impactar o desempenho energético dentro do edifício de modo a proporcionar conforto térmico aos ocupantes. Além da orientação do edifício, pesquisas mostram que a ventilação natural, que pode ser potencializada por uma correta implantação, melhora o conforto térmico em edifícios localizados em climas quentes e úmidos (DAEMEI; EGHBALI; KHOTBEHSARA, 2019). Estudos demonstram, ainda, que a sensação térmica humana em um ambiente naturalmente ventilado é muito melhor do que a sensação térmica em um ambiente controlado mecanicamente (LATHA; DARSHANA; VENUGOPAL, 2015)

Chro e Istvan (2017) salientam, também, que a orientação do edifício em relação ao sol é considerada uma das primeiras decisões de projeto e é de grande importância tanto para o aquecimento como para o resfriamento passivo, podendo ainda desempenhar um papel significativo na redução do consumo de energia.

Considerando uma planta genérica retangular, em termos de radiação solar, a orientação norte-sul é indicada como melhor opção, pois a orientação leste - oeste recebe radiação solar máxima. Assim, o eixo longitudinal da edificação deve ser implantado no sentido leste - oeste pois as menores áreas de fachada estarão voltadas para a maior incidência solar. Consequentemente, o eixo transversal da edificação deve ser voltado para o eixo norte-sul, desta forma, as maiores áreas de fachada da edificação receberão uma menor incidência solar, contribuindo assim, para um menor aquecimento do edifício.

A adoção de uma recomendação ótima de projeto passivo para cada clima é uma maneira importante de ajudar os edifícios a se tornarem eficientes em termos energéticos, especialmente para edifícios residenciais (HARKOUSS; FARDOUN; BIWOLE, 2018).

A configuração da parede, por exemplo, é um fator crítico na redução da demanda de energia na construção. A transferência de calor entre o ambiente interior e o exterior através da vedação vertical do edifício depende diretamente da condutividade térmica. Ao usar técnicas como paredes duplas ou fachadas ventiladas com materiais isolantes e otimizar parâmetros como a relação da área de janela-parede, a energia gasta para aquecimento e resfriamento pode ser reduzida (PACHECO; ORDONEZ; MARTINEZ, 2012).

No que diz respeito às fachadas ventiladas, Halawa e outros (2018), destacam o uso desta estratégia como uma escolha sensata para climas quentes, já que o principal objetivo é manter o calor fora da edificação. Ao ventilar a camada entre as superfícies que envolvem a edificação, grande parte da energia solar pode ser impedida de entrar no espaço ocupado. Ressalta-se, também, que diversos estudos demonstraram a eficácia da fachada ventilada em climas tropicais e subtropicais (HAASE; AMATO, 2009; WEI; WONG; PRASAD; BEHNIA, 2008; WEI; ZHAO; CHEN, 2010).

É importante evidenciar ainda, que a envoltória de um edifício não é apenas um separador do ambiente externo, mas também uma proteção contra elementos climáticos que afetam diretamente o edifício. O conforto térmico interno depende também das propriedades dos materiais de construção utilizados na envoltória, que por sua vez, são afetados diretamente pela temperatura e umidade externa (LATHA; DARSHANA; VENUGOPAL, 2015)

Com isso, deve-se também, buscar a economia de energia por meio do uso de materiais mais eficientes. Ao usar um isolamento que retém o calor e é opaco à radiação solar ou que é capaz de refletir a luz do sol, pode-se evitar perdas de calor/frio e superaquecimento, como por exemplo, em paredes de tijolo ou concreto construídas com isolamento térmico de lã mineral ou poliestireno (LEWANDOWSKI; LEWANDOWSKA, 2014; SADINENI; MADALA; BOEHM, 2011).

Destaca-se, ainda, que alguns componentes específicos – como janelas e sombreadores – podem ser projetados para economizar energia. Janelas com vidros eficientes e dispositivos de sombreamento, além da forma, tamanho, correta orientação e posicionamento adequado, são tecnologias e estratégias passivas que podem ser usadas para controlar o movimento do calor entre o edifício e o meio externo. Quando adotadas, estas medidas reduzem a necessidade de refrigeração e aquecimento ativos, e ao mesmo tempo, aumentam o conforto térmico para os usuários das edificações (PACHECO; ORDONEZ; MARTINEZ, 2012). Outras tecnologias, como paredes trombe e telhados solares, também têm a capacidade de capturar a energia solar e podem contribuir para reduzir a demanda energética residencial por meios passivos (SADINENI; MADALA; BOEHM, 2011).

Em relação ao uso de sombreadores, a principal função de um sistema de sombreamento é a proteção de janelas e paredes envidraçadas contra a radiação solar excessiva, evitando o superaquecimento, e bloqueando o acesso de fluxo de energia indesejado ao edifício. De fato, embora vários fatores contribuam para o ganho de calor no verão, como por exemplo, equipamentos elétricos, o calor demandando pelos ocupantes e suas respectivas atividades, luzes e etc., em climas quentes, uma fração significativa deriva do ganho de calor solar que entra pelas áreas envidraçadas. Entre as várias soluções de sombreamento para limitar essa carga térmica, interceptar a radiação solar antes que ela atinja a área envidraçada, por meio do uso de dispositivos de sombreamento externos, é a mais eficaz (BELLIA; DE FALCO; MINICHIELLO, 2013).

Balogun, Morakinyo e Adegun (2014), estimaram que o sombreamento pode reduzir de maneira considerável a demanda da carga de resfriamento. Os autores estimaram que projetos de sombreamento adequados ao local onde serão inseridos podem gerar uma economia de energia na faixa de 10 – 40%.

Vale ressaltar que os dispositivos de sombreamento servem não apenas como estratégias de resfriamento passivo para reduzir significativamente o consumo de energia, como também podem proporcionar um ambiente interno saudável, sendo ainda elementos que podem valorizar o projeto arquitetônico (TALEB, 2014) que devem ser explorados por arquitetos em seus projetos. Além disso, os dispositivos tradicionais de sombreamento não apenas reduzem a penetração da radiação solar, mas também fornecem iluminação diurna difusa para o espaço interior, propiciando um ambiente mais agradável para seus usuários, além de permitir uma constante ventilação no ambiente (KISTELEGDI; RADHA; BALINT, 2019).

Apesar de todos benefícios apresentados, reitera-se que a integração de algumas intervenções passivas no projeto de edifícios residenciais pode levar a um aumento significativo no custo final (DU *et al.* 2014). Devido a isso, pode haver alguma relutância em adotar essas medidas entre arquitetos, designers, engenheiros e principalmente, os proprietários. Em contrapartida, edifícios residenciais com menor demanda de energia podem ganhar um valor de mercado mais alto, beneficiando com isso, seus proprietários no longo prazo. Assim, os compradores de imóveis podem estar dispostos a pagar preços mais altos por imóveis considerados energeticamente eficientes (HARNEY, 2012).

Em suma, como já enfatizado anteriormente, o desempenho térmico de um edifício, além da economia de energia é influenciado por vários fatores, incluindo as propriedades termo físicas dos materiais de construção, orientação, ventilação, uso do espaço de construção e integração de tecnologias modernas e passivas de economia de energia (LATHA; DARSHANA; VENUGOPAL, 2015).

Neste sentido, a missão da arquitetura sempre foi a proteção do homem do ambiente externo e, com isso, a arquitetura bioclimática tenta alcançar o conforto térmico humano, interagindo energicamente com o clima exterior. A arquitetura sempre teve o objetivo de alcançar o conforto climático, sendo inerente ao conhecimento necessário na área desde suas origens (HARKOUSS; FARDOUN; BIWOLE, 2018).

Durante tempos de crise ambiental e acelerado desenvolvimento urbano, parece lógico para arquitetos e projetistas produzirem edificações ecológicas/sustentáveis com ênfase sempre no conforto térmico dos usuários, haja vista que edifícios (residenciais, comerciais e públicos) consumiram mais de 30% do suprimento total de energia primária do mundo desde 2014 (SUN; HUANG; HUANG, 2015). Desta

parcela, apenas o setor residencial responde por mais de 65% deste consumo (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018).

2.2 A INFLUÊNCIA DA ENVOLTÓRIA NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS EDIFICAÇÕES E O USO DE NOVAS TECNOLOGIAS

A envoltória de um edifício compreende os elementos externos de uma construção, incluindo fundação, paredes, teto, janelas, portas e pisos, assim sendo, é também o separador físico entre o ambiente condicionado e o não condicionado. Portanto, é responsável por oferecer resistência ao ar, calor, ruído, luz e água (ASHRAE, 2013). Além de ser encarregada por fornecer uma divisão térmica entre o ambiente interno e externo, a envoltória é crucial para determinar com que eficácia um edifício pode utilizar iluminação natural, ventilação e recursos de aquecimento e refrigeração. Desta forma, uma envoltória adequadamente projetada e construída pode aumentar consideravelmente a economia de energia de um edifício (BANO; SEGHAL, 2019).

Ademais, tecnologias utilizadas nas envoltórias dos edifícios podem reduzir as trocas descontroladas de ar e umidade, diminuir as perdas e ganhos térmicos e melhorar o conforto dos ocupantes (OPOKO *et al.*, 2016). Com isso, o desenvolvimento de estratégias e de novas tecnologias para as envoltórias das edificações, são consideradas um passo crucial para a construção de edifícios energeticamente eficientes (AKINOLA *et al.,* 2018).

Atualmente, vários pesquisadores, arquitetos e engenheiros estão promovendo novas tecnologias - juntamente com os governos que têm promovido de forma proativa a implementação de medidas que minimizam o consumo de energia - para garantir a eficiência energética ao longo de toda a vida útil dos edifícios. Neste cenário, diversas pesquisas relacionadas ao consumo energético de edificações confirmam que, para reduzir o consumo de energia nos edifícios, é necessário melhorar o desempenho da envoltória das edificações (OMRANY *et al*., 2016; WANG *et al*., 2017; CHEN; YANG; ZAHNG, 2018). Segundo Harish (2016), um projeto de envoltória bem elaborado e que seja adequado para as condições locais onde está inserido, pode possibilitar uma redução entre 20% - 50% no consumo energético.

Como já mencionado, a energia usada pelos edifícios é ditada principalmente pelo ganho e/ou perda de energia através da envoltória das edificações (SUN *et al*., 2019). Entre os componentes da envoltória, Sun e outros (2019), destacaram os principais

responsáveis pelo consumo energético de um edifício. O maior destaque, segundo os autores, são as paredes, responsáveis por 25% do consumo energético, seguidas pelas janelas com 23%, telhados com 22% e outros componentes que representam cerca de 30% do consumo relacionado a envoltória de edificações.

Confirmando a importância das paredes no desempenho energético dos edifícios, nas últimas décadas, um grande esforço foi dedicado por pesquisadores e profissionais da construção civil para desenvolver novas abordagens e técnicas para melhorar o desempenho térmico e energético de paredes externas. Tradicionalmente, aumentar a espessura da parede (JIE *et al*., 2018) ou instalar uma camada de isolamento na parte externa ou interna da superfície da parede foi a abordagem mais utilizada para melhorar o isolamento térmico de uma vedação vertical em edifícios (PEKDOGAN; BASARAN, 2017; MENG *et al*., 2018).

Devido a isso, com o avanço tecnológico, o aprimoramento de novas técnicas de resfriamento/aquecimento passivo, e, principalmente, a necessidade de aumentar a eficiência das paredes - devido sua grande importância no desempenho energético dos edifícios -, tem surgido cada vez mais, soluções para aprimorar o desempenho das vedações verticais dos edifícios.

Materiais super isolantes, como painéis de isolamento a vácuo, que já são muito utilizados em refrigeradores, foram considerados entre 5 e 8 vezes melhores isolantes que os tradicionais, como o poliestireno expansível (EPS), por exemplo (KUCUKPINARA *et al*., 2015). Os autores demonstraram ainda, que estes painéis reduziram o consumo energético anual em 25% para ambientes simulados na Polônia e Espanha.

Os painéis de isolamento a vácuo são compostos por um núcleo (material micro poroso à base de sílica pirogenada), que é introduzido em um envelope composto por multicamadas de alta proteção. O envelope é então embalado a vácuo (pressão < 0,5 mbar) e selado, formando assim, painéis com alta resistência térmica. Os painéis podem ser instalados internamente ou externamente nas superfícies opacas dos edifícios (ALAM *et al*., 2018). Para aplicações em fachadas envidraçadas, materiais de isolamento transparentes estão sendo desenvolvidos (KUCUKPINARA *et al*., 2015; SUN *et al.,* 2016*).*

Outros exemplos de materiais que vêm sendo estudados são os materiais isolantes a base de aerogel (BERARDI, 2018). Os produtos aprimorados com aerogel estão se espalhando cada vez mais no mercado que envolve a construção civil, isso devido a expectativa de reduzir as perdas de energia com camadas mínimas de espessura. De fato, os produtos aprimorados com aerogel fornecem resistência térmica significativamente mais alta por unidade de espessura, quando comparado com materiais isolantes tradicionais (JELLE, 2011; RIFFAT; QIU, 2013; CUCE *et al*., 2014).

Isso ocorre porque os aerogéis são formados quase que inteiramente por um gás, consequentemente, são péssimos condutores térmicos. Os aerogéis são géis secos com uma porosidade excepcionalmente alta, o que lhes permite ter uma condutividade térmica mais baixa que o ar. Nano poros com diâmetros que chegam a medir 1 bilionésimo de metro ($1x10^{-9}$) ocupam mais de 90% do volume total do aerogel. Destaca-se ainda, a alta transmitância de luz e as boas propriedades de absorção sonora dos aerogéis (BURATTI; MERLI; MORETTI, 2017).

Dada a fragilidade do aerogel, uma abordagem comumente adotada para seu uso, é incorporar grânulos de aerogel em materiais da construção civil, como argamassas, rebocos e concretos aprimorados (CUCE *et al*., 2014; FICKLER *et al*., 2015; CUCE; CUCE, 2016; GHAZI *et al.*, 2014).

Mais um exemplo da aplicação de aerogéis, são os gessos utilizados para isolamento térmico que são comercializados como soluções para aumentar a resistência térmica, ao mesmo tempo em que são simples de implementar e flexíveis em relação às superfícies desniveladas, permitindo criar camadas contínuas de isolamento térmico (LUCCHI *et al*., 2017; BURATTI; MORETTI; BELLONI, 2016; BERARDI, 2018).

Foram desenvolvidas também, mantas isolantes aprimoradas com aerogel de sílica (VENKATARAMAN *et al*., 2014; GALLIANO *et al*., 2016). As mantas de aerogel são flexíveis, resistentes ao esmagamento e podem ser cortadas, costuradas e laminadas, como já comprovado por várias aplicações em paredes. Apesar do uso de mantas de aerogel ser relativamente novo para a indústria da construção civil, seu uso é muito comum em aplicações industriais para dutos em sistemas aeroespaciais (BERARDI; NOSRATI, 2018).

Outra abordagem promissora, no que tange as soluções passivas de resfriamento/aquecimento, é o uso de materiais no controle das condições

higrotérmicas internas dos ambientes. De acordo com Zhang e outros (2017), materiais higroscópicos e seu uso em paredes podem funcionar como uma abordagem passiva para moderar as flutuações da umidade interna e reduzir a demanda de energia para refrigeração e aquecimento. Os materiais higroscópicos quando compõem a superfície interna de uma parede podem absorver a umidade do ar quando a mesma estiver alta ou aumentá-la quando estiver muito baixa.

O controle da umidade por meio dos materiais de construção, pode moderar as flutuações da umidade interna e reduzir significativamente o pico de umidade relativa dentro dos ambientes. A economia de energia no edifício é alcançada principalmente pelo seguinte modo: o material higroscópico absorve a umidade durante o período condicionado (o que reduzirá a carga latente) e libera a umidade durante o período não condicionado (removido por ventilação natural). Portanto, a ventilação e o clima externo durante o período não condicionado são críticos para “secar” o material higroscópico e prepará-lo para o próximo ciclo (por exemplo, no dia seguinte). Destaca-se ainda, a importância da umidade relativa no ambiente interno, haja vista seu efeito significativo no conforto térmico, na qualidade do ar interno e na eficiência do trabalho dos ocupantes (ZHANG *et al*., 2017).

Mais uma tecnologia utilizada na envoltória das edificações são os materiais com capacidade de mudança de fase. Muitos pesquisadores apontaram que a integração de painéis compostos por materiais que têm esta característica pode levar a uma alta densidade de armazenamento de energia e aumentar a eficiência energética dos edifícios (SOUAYFANE *et al*., 2019; LUO *et al*., 2017; LABIHI *et al*., 2017).

A integração de materiais de mudança de fase (MMF) com a envoltória do edifício é capaz de reduzir o consumo de energia, melhorar o conforto térmico interno e alterar o pico da carga de eletricidade. Comparado com o sistema de armazenamento de calor sensível, o sistema de armazenamento de calor latente com MMF tem maior densidade de armazenamento de energia e requer massas e volumes menores de material. Com o aumento da temperatura os MMF absorvem calor enquanto mudam de sólido para líquido e liberam calor enquanto mudam de líquido para sólido com a temperatura decrescente (Li *et al.,* 2017).

Ou seja, durante o dia, os MMF na envoltória do edifício absorvem o calor que incide sobre o edifício, o que resulta em uma menor carga para resfriamento. À noite, quando o ar fica frio, os MMF congelam e liberam o calor armazenado durante o dia, em

direção ao ambiente interno e externo, reduzindo assim, a carga para aquecimento Ressalta-se, contudo, que o uso desta tecnologia é mais indicado para locais com grandes amplitudes térmicas, desta forma, a eficácia dos MMF será máxima (BANIASSADI; SAILOR; BRYAN, 2019; KANT; SHUKLA; SHARMA, 2017).

Yan, Huo e Li (2012), analisaram as propriedades térmicas da parede com MMF formadas por diferentes métodos e descobriram que a temperatura da superfície e o fluxo de calor através das paredes com MMF eram inferiores às das paredes tradicionais. Já Lei, Yang e Yang (2016), estudaram o desempenho energético da envoltória de edifícios com o uso de MMF para redução da carga de resfriamento no clima tropical de Singapura por meio de simulações computacionais. Os resultados demonstraram, que os MMF poderiam efetivamente reduzir os ganhos de calor ao longo de todo ano.

Por fim, considerando que cerca de 23 a 50% da energia primária global é consumida por edifícios (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME*, 2018)*, e que a envoltória das edificações podem contribuir para uma economia de energia de até 22% em relação ao consumo de energia apenas para resfriamento (STEFANOVIC; GORDIC, 2016) o uso de novas abordagens passivas, a escolha por sistemas de vedação mais eficientes entre os disponíveis no mercado, assim como o avanço de novas tecnologias para melhorar o desempenho da envoltória das edificações, tornam se essenciais na busca por edifícios energeticamente eficientes.

METODOLOGIA

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a abordagem relacionada aos procedimentos metodológicos adotados no desenvolvimento desta pesquisa. Para a elaboração do método desenvolvido, três etapas fundamentais foram implementadas: na primeira, definiu-se a tipologia do edifício, caracterizando-se o ambiente selecionado para as simulações; na segunda etapa, foi selecionado o *software* utilizado nas simulações e foram configurados os parâmetros de simulação com as diferentes variáveis propostas; na terceira etapa, foi apresentado o método utilizado para calcular o custo financeiro para refrigeração do ambiente simulado.

3.1 DEFINIÇÃO DA TIPOLOGIA E DO AMBIENTE SIMULADO

De modo a embasar a escolha de uma tipologia representativa para a Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV) – composta pelas cidades de Cariacica, Serra, Viana, Vila Velha, Vitória, Guarapari e Fundão[1] – observou-se a quantidade de unidades habitacionais (apartamentos) em edifícios residenciais multifamiliares à venda em junho de 2018, considerando que esse tipo de empreendimento é o mais comercializado na RMGV (SINDICATO ..., 2018)

Adotou-se como base a última análise de mercado imobiliário (junho de 2018) realizada na RMGV (BRAIN PESQUISA E CONSULTORIA *apud* SINICATO ..., 2019) que considera empreendimentos verticais de incorporação imobiliária em um dado mercado – com quatro ou mais pavimentos e com tipologias de 1; 2; 3; 4 ou mais dormitórios – que mantinham no mês de referência da pesquisa – junho de 2018 –, unidades ainda em comercialização no seu ciclo primário, ou seja, eram comercializadas diretamente com o incorporador e não por revendas de terceiros adquirentes.

De acordo com a pesquisa realizada sobre as ofertas de unidades à venda (Tabela 1), e considerando as tipologias de 1, 2, 3, 4 ou mais dormitórios, foram contabilizadas um total de 5.809 unidades habitacionais. Deste total, as tipologias de 1 e 4 dormitórios apresentaram as menores participações, com 5% (316 unidades) e 6% (355

[1] As cidades de Guarapari e Fundão foram desconsideradas em função de que apenas as cidades de Vitória, Vila Velha, Serra, Cariacica e Viana são compreendidas como a Grande Vitória. De acordo com o SINDUSCON (2017), os municípios dessa área são os que apresentam maior interação socieconômica e de deslocamento da população entre si cotidianamente, além de possuirem áreas contíguas tornando invisíveis as fronteiras geográficas em várias porções de seus territórios.

unidades), respectivamente. Já a tipologia com 3 dormitórios representou uma parcela de 20% (1.192 unidades) das unidades à venda. Por sua vez, a tipologia com 2 dormitórios foi a mais representativa, totalizando 68% (3.717 unidades) do total das unidades, sendo assim a tipologia selecionada para este estudo.

Tabela 1 - Ofertas de unidades por tipologia.

Tipologia	Vitória	Vila Velha	Serra	Cariacica	Total	Part. (%)
1 Dormitório	232	36	48	-	316	5%
2 Dormitórios	866	1.220	1.631	229	3.717	68%
3 Dormitórios	458	665	32	37	1.192	20%
4 ou + Dormitórios	118	204	-	33	355	6%
Total	1.674	2.124	1.711	299	5.809	*99%

* De acordo com o SINDUSCON (2017), o município de Viana foi desconsiderado devido sua baixa representatividade

Fonte: Adaptado de Brain Pesquisa e Consultoria apud Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado do Espírito Santo (2019b).

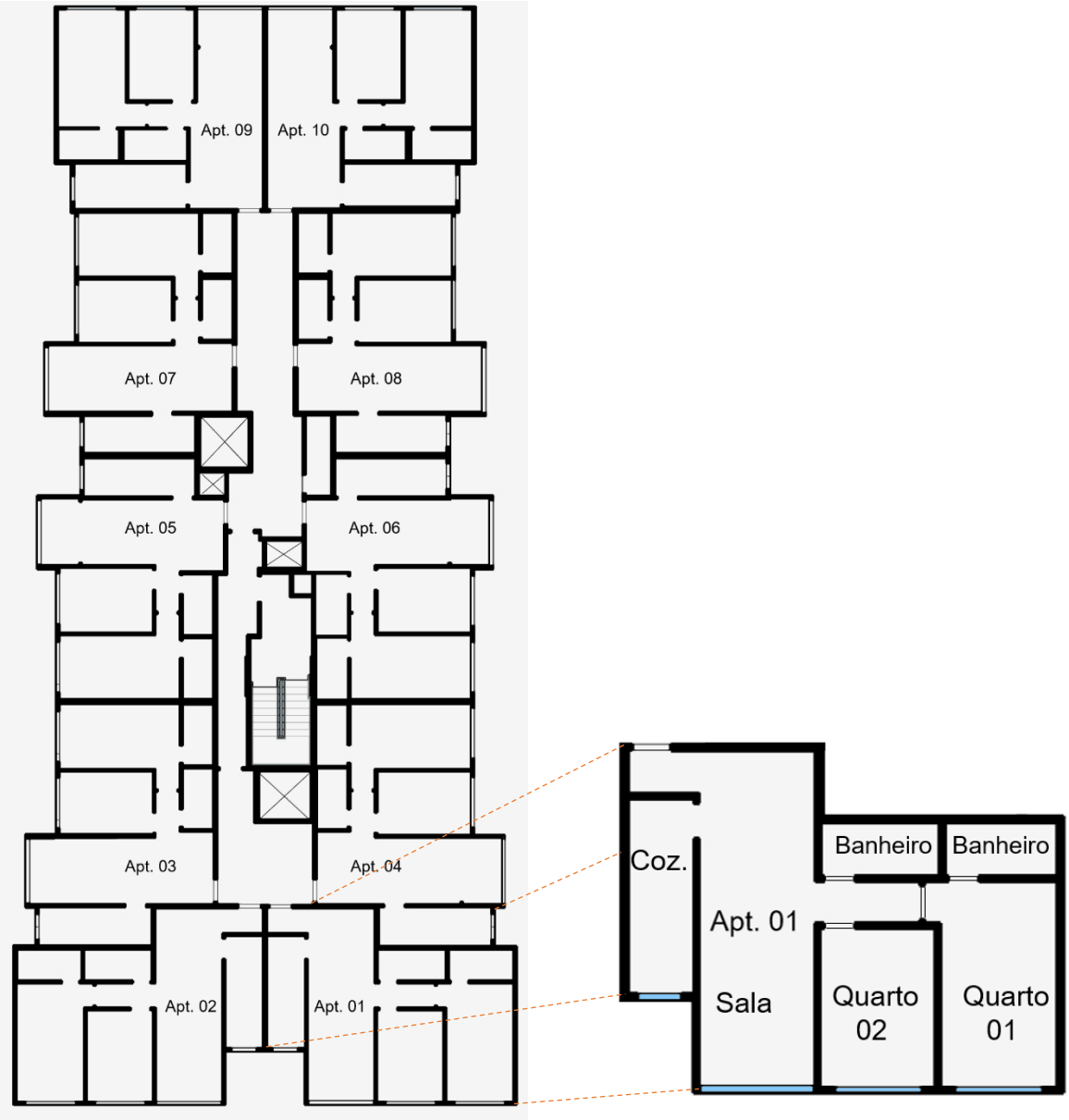
Após a seleção de uma tipologia representativa, adotou-se um modelo de edifício hipotético que atendesse as necessidades da pesquisa ao longo das simulações. A edificação em questão é constituída por um subsolo (garagem), um pavimento térreo (com portaria, três lojas e vagas de garagem), um pilotis (área de lazer e mais vagas de garagem), dez pavimentos tipo com os apartamentos, e por fim, o barrilete e a caixa d'água (Figura 1).

Figura 1 - Modelo tridimensional do edifício utilizado nas simulações

Fonte: adaptado pelo autor a partir de Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado do Espírito Santo (2019b).

Cada pavimento é constituído por 10 unidades habitacionais, compostas por uma sala de estar, dois dormitórios, cozinha, área de serviço, dois banheiros e área técnica, totalizando uma área útil de aproximadamente 60m² (Figura 2).

Figura 2 - Planta baixa do pavimento tipo do modelo hipotético analisado



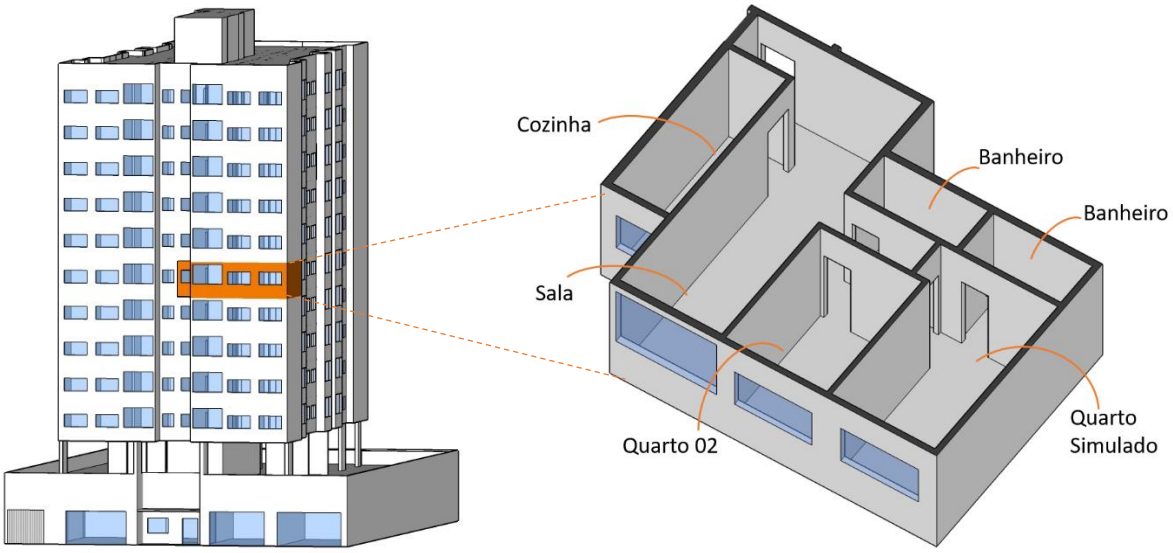
Fonte: adaptado pelo autor a partir de Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado do Espírito Santo (2019b).

Após a definição de uma edificação para a realização da pesquisa, baseou-se em Sorgato e outros (2012) para a escolha da unidade habitacional a ser analisada. De acordo com os autores, o desempenho térmico/energético das unidades habitacionais do primeiro pavimento sofre influência com as perdas térmicas pela proximidade com o solo, assim como as unidades localizadas no último pavimento são influenciadas

pelos ganhos de calor proveniente da cobertura. Optou-se, então, pela escolha de um pavimento intermediário, cujas interferências provenientes do solo e da cobertura fossem anuladas, maximizando assim, a influência das fachadas no desempenho energético do ambiente analisado, que é o cerne da pesquisa.

Após a definição da unidade habitacional, selecionou-se o dormitório 1 para a realização das simulações. A razão pela escolha, foi por se tratar de um ambiente de longa permanência, como estabelece o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência de Edificações Residenciais - RTQR (2012), e também por estar situado na extremidade do edifício (Figura 3), possuindo duas fachadas expostas a radiação solar simultaneamente, o que de acordo com a NBR 15.575 (ASSOCIAÇÃO..., 2013) representa a situação mais crítica em termos de conforto térmico.

Figura 3 - Perspectiva da unidade habitacional adotada nas simulações



Fonte: adaptado pelo autor a partir de Sindicato... (2019b).

O ambiente selecionado para as simulações possui uma área de 12,82m², e apenas uma abertura para o exterior, onde foi adotado um modelo padrão de janela, considerado o mais usado na região (NICO-RODRIGUES, 2015), e que segue a NBR 15575-4 (ASSOCIAÇÃO... , 2013) com uma dimensão mínima de 2,20m², o que representa 8% da área do piso, como indicado para ambientes localizados na Zona Bioclimática 8, onde a edificação está inserida. Este modelo é constituído por um sistema de abertura de correr em duas folhas, formado por esquadrias em alumínio

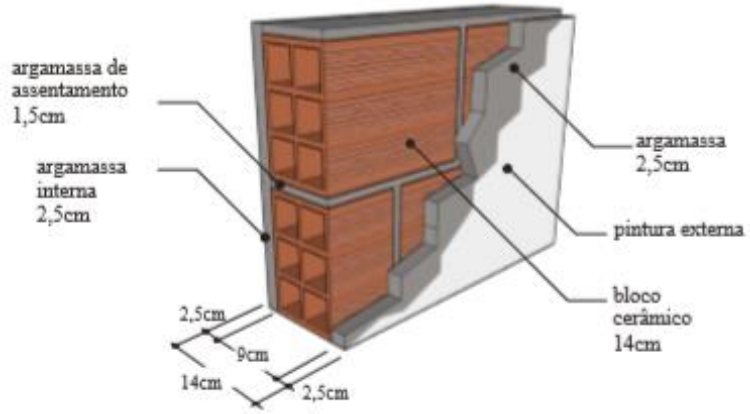
com panos de vidro incolor, que permitem a abertura de 50% da área de janela para ventilação natural (Figura 4).

Figura 4 - modelo de janela utilizado

Fonte: Sasazaki (2019).

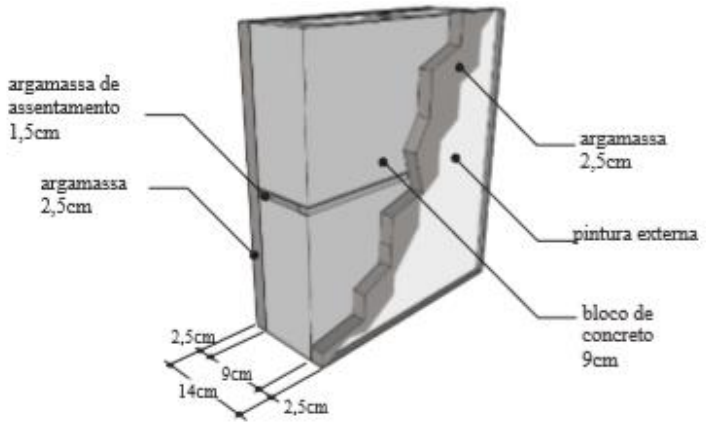
Já em relação as paredes da envoltória, foram analisados três tipos de vedações: bloco cerâmico (Figura 5) e bloco de concreto (Figura 6), por serem considerados materiais usuais no território nacional; e o sistema de *steel frame* (Figura 7), por estar se tornando cada vez mais conhecido e utilizado na construção civil.

Figura 5 - Sistema construtivo para vedação vertical em blocos cerâmicos (U = 2,46 W/m². K)



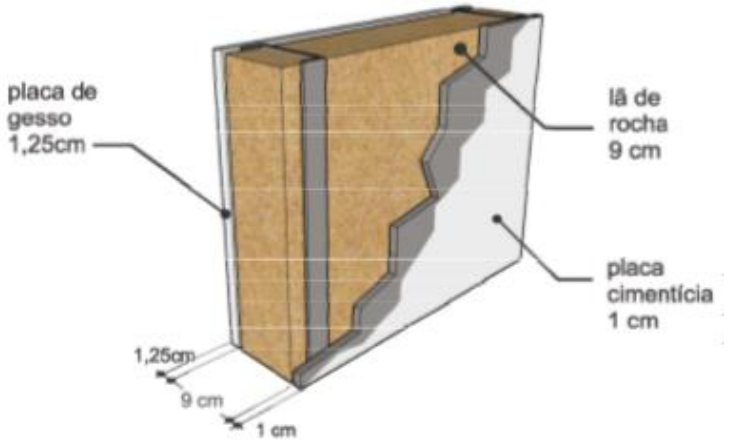
Fonte: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO (2013).

Figura 6 - Sistema construtivo para vedação vertical em blocos de concreto (U = 2,78 W/m². K)



Fonte: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia– INMETRO (2013).

Figura 7 - Sistema construtivo para vedação vertical em *steel frame* (U = 0,38 W/m². K)



Fonte: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia– INMETRO (2013).

Os blocos cerâmicos e de concreto possuem 9cm de espessura e acabamento com reboco e pintura na cor clara em ambas as faces, totalizando uma espessura final de 14cm. Já o sistema em *steel frame* possui montantes e isolante térmico em lã de rocha com 9cm de espessura, ambos revestidos por uma placa de gesso na parte interna com 1,25cm e por uma placa cimentícia de 1cm de espessura na parte externa, com acabamento em cores claras para ambas as faces.

Além dos três sistemas construtivos considerados e da janela adotada como padrão, avaliou-se outras duas variáveis: o uso do sombreador na janela, e o uso da fachada ventilada adaptada aos sistemas construtivos.

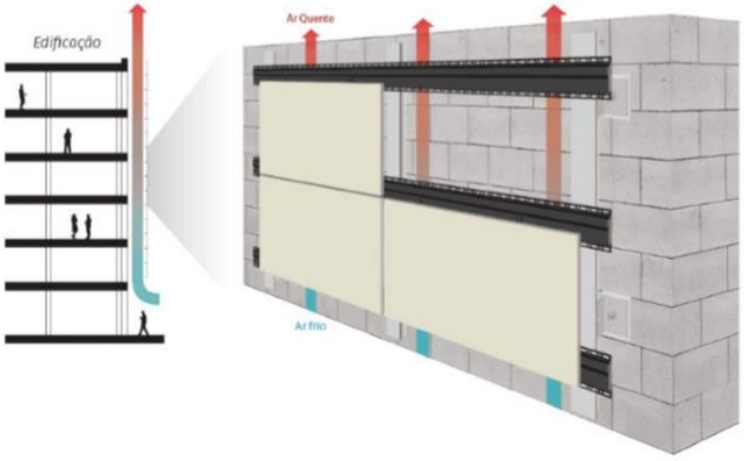
Em relação a janela, considerou-se o mesmo modelo, com as mesmas características e dimensões, porém, com venezianas (Figura 8) para possibilitar seu total sombreamento e ao mesmo tempo permitir a ventilação contínua no local, o que permitiu analisar a influência do sombreamento no desempenho energético do ambiente.

Figura 8 - Modelo de janela adaptado com veneziana móvel

Fonte: Sasazaki (2019a).

A outra variável avaliada foi a combinação da fachada ventilada (Figura 9) com os sistemas de vedação vertical mencionados anteriormente. Foi considerado um sistema com perfis metálicos fixados à vedação vertical do edifício que, por sua vez, recebe o fechamento por meio de placas cimentícias com 1,5 cm de espessura, afastadas 10 cm da vedação, proporcionando um fluxo contínuo de ventilação e podendo vir a minimizar o impacto causado pela incidência solar nas paredes que envolvem os ambientes.

Figura 9 - Sistema de fachada ventilada



Fonte: Eliane Tec (2019).

3.2 SIMULAÇÕES ENERGÉTICAS E CONFIGURAÇÕES DOS MODELOS

Para a realização das simulações energéticas, partiu-se do pressuposto que a ferramenta escolhida, além de ser adequada aos objetivos da pesquisa, deveria ter respaldo no meio científico. Em relação a configuração dos modelos simulados no *software* selecionado, utilizou-se como base as diretrizes indicadas pelo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais - RTQR (2012), órgão responsável por especificar requisitos técnicos, bem como métodos para classificação de edificações residenciais quanto à eficiência energética.

3.2.1 ***Software* para simulação computacional**

O propósito das simulações foi identificar o comportamento das diversas estratégias construtivas em relação ao consumo energético nas edificações de acordo com as características climáticas e econômica do local onde a edificação está inserida. Para a realização das simulações computacionais, utilizou-se o *software* EnergyPlus (ENERGYPLUS, 2019). Este *software* é uma ferramenta para a avaliação do desempenho energético de edifícios, desenvolvida pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, que permite simular os sistemas de aquecimento/resfriamento, iluminação e ventilação, de forma a quantificar seu consumo de energia em kWh (ENERGYPLUS, 2019a).

A escolha do *software* EnergyPlus ocorreu devido sua relevância em relação ao tema desta pesquisa e ao seu reconhecido valor científico no meio acadêmico. Além de ser referência no campo das simulações computacionais de edificações, o *software* é gratuito e existem diversas plataformas de apoio, como o próprio *web site* (ENERGYPLUS, 2019) que fornece suporte e treinamento para seus usuários.

Em relação a modelagem da geometria da edificação a ser simulada, foi utilizado o *software* Google Sketchup que, por meio do *plug-in* (extensão) OpenStudio, possibilita e facilita a criação e edição da geometria do edifício nos arquivos de entrada do EnergyPlus. Este *plug-in* também é gratuito e foi desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos com código aberto, o que possibilita sua alteração e utilização de maneira livre pelos usuários (OPENSTUDIO, 2019). Por meio desta extensão, é possível iniciar as simulações do EnergyPlus e visualizar os resultados sem sair do Google Sketchup, o que facilita e agiliza o processo de simulação.

Desta forma, o EnergyPlus, em conjunto com o Sketchup e o OpenStudio, permitem introduzir dados sobre a geometria da edificação; as características dos materiais utilizados na sua envoltória; o perfil de ocupação (número de pessoas que pode variar ao longo do ano); a potência dos equipamentos de iluminação, instalações e o perfil de uso; entre outros. Além disso, é possível incluir informações sobre sombreadores, sistemas de climatização e de geração de energia, como geradores e células fotovoltaicas, o que possibilita a inserção de diretrizes construtivas mais eficientes ainda na fase de projeto.

O EnergyPlus permite, também, avaliar o consumo energético – em kWh – diário, mensal ou anual de uma edificação e, com isso, analisar os seus potenciais níveis de redução e uso racional de energia (ENERGYPLUS, 2019). Desta forma, o *software* possibilitou a realização de um estudo comparativo por meio do consumo em kWh, entre as propostas de modificações construtivas simuladas.

3.2.2 **Configuração dos parâmetros de simulação**

Inicialmente, para se iniciar uma simulação no *software* EnergyPlus, é imprescindível a inserção dos dados climáticos do local onde a edificação está situada. Para tanto, o próprio *web site* do *software* disponibiliza arquivos climáticos em formatos “.epw” de diversas cidades do mundo (ENERGYPLUS – WEATHER DATA BY REGIONS, 2019).

Foram então inseridos os dados climáticos da cidade de Vitória-ES. De acordo com o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais - RTQR (2012), os dados climáticos devem ser representativos da Zona Bioclimática onde o projeto sob avaliação será locado e, caso o local do projeto não possua arquivo climático, deve-se utilizar dados climáticos de uma região próxima que possua características climáticas semelhantes.

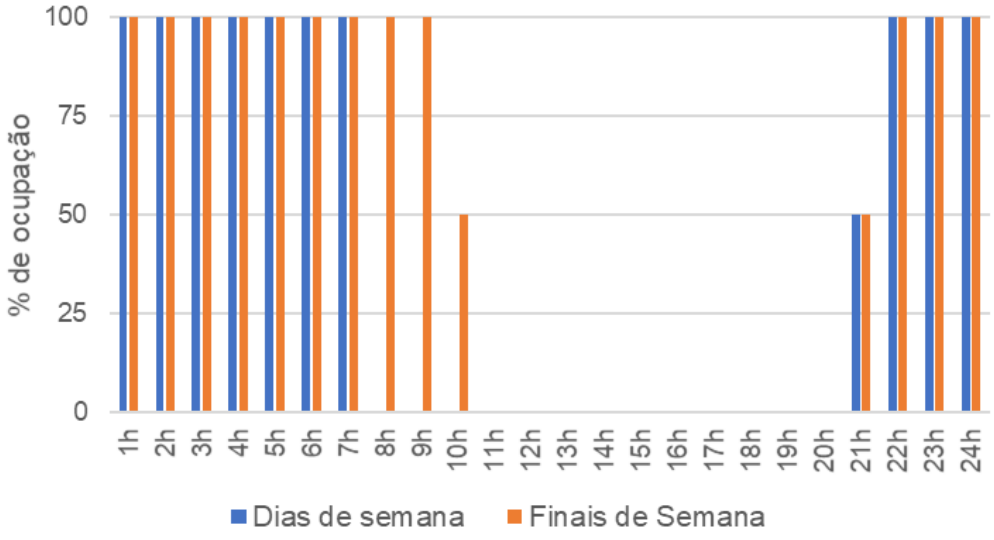
Após a definição do arquivo climático, foi realizada a inserção do edifício no terreno, que por sua vez, foi feita de forma genérica, sendo adotado a abertura do quarto simulado como referência para as orientações Norte, Leste, Sul, e Oeste, como destacado na Figura 10.

Figura 10 - Indicação do ambiente em relação as orientações geográficas simuladas

Fonte: adaptado pelo autor a partir do Sindicato... (2019b).

Para o quarto simulado, o RTQR (2012) estabelece um padrão mínimo de ocupação de duas pessoas por ambiente (dormitório). Deve ser modelado ainda, um padrão de ocupação do ambiente para os dias de semana, e outro para os finais de semana. A ocupação do ambiente é representada pela porcentagem das pessoas disponíveis no horário, como demonstrado no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Padrão de ocupação do dormitório para dias de semana e finais de semana



Fonte: Adaptado pelo autor a partir do Regulamento... (2012).

Em função do tipo de atividade desempenhada no ambiente analisado, foi adotada a taxa metabólica para cada atividade, conforme demonstrado na Tabela 2. Os valores recomendados para as taxas foram baseados na *American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers* - ASHRAE (2009), considerando uma área de pele de 1,80 m², o que equivale a uma área de pele de uma pessoa média.

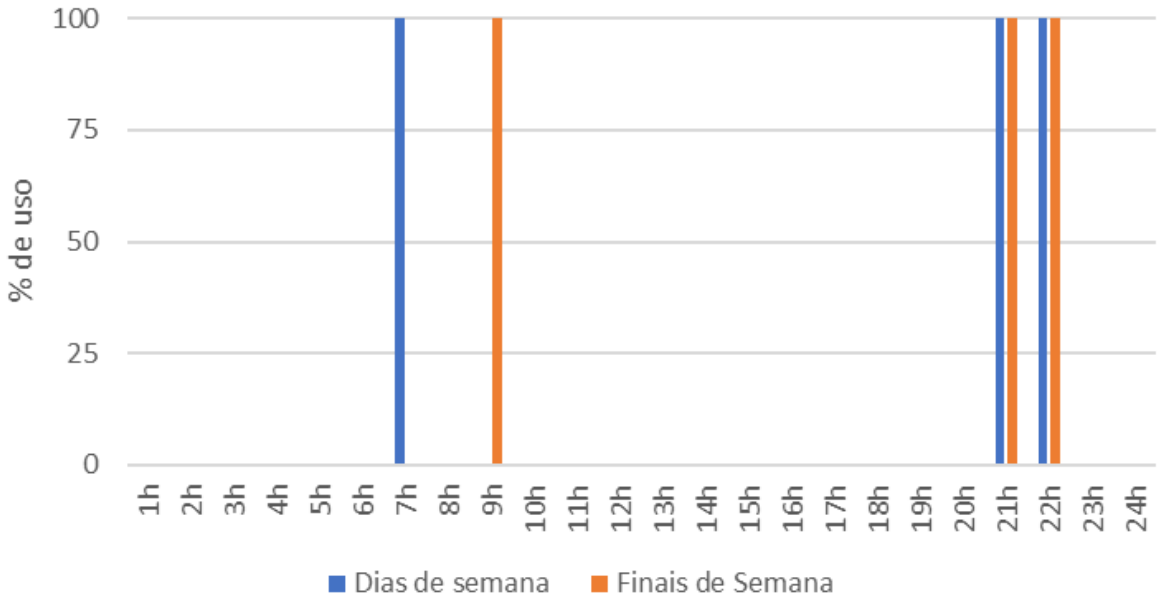
Tabela 2 - Taxa metabólica para cada atividade

Ambiente	Atividade realizada	Calor produzido (W/m²)	Calor produzido para área de pele = 1,80 m² (W)
Dormitório	Dormindo ou descansando	45	81

Fonte: *American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers* - ASHRAE (2009).

Assim como na modelagem do padrão de ocupação do dormitório, foram considerados dois padrões de uso para a iluminação, sendo um para os dias de semana e outro para os finais de semana (Gráfico 2). O valor de 100% representa os horários do uso da iluminação e o valor de 0% indica que a iluminação está desligada.

Gráfico 2 - Padrão de uso da iluminação



Fonte: Adaptado pelo autor a partir do Regulamento... (2012).

Destaca-se, ainda, que os ambientes de permanência prolongada, como o quarto simulado, devem ser modelados com densidades de potência instalada de iluminação conforme a Tabela 3. Em relação as cargas internas dos equipamentos, o RTQR

(2012) estabelece que apenas quando as simulações considerarem a sala de estar, a potência dos equipamentos deve ser considerada.

Tabela 3 - Densidade de potência instalada para iluminação

Ambiente	DPI (W/m²)
Dormitório	5,0

Fonte: Adaptado pelo autor a partir do Regulamento... (2012).

Para que fosse possível contabilizar o consumo energético do ambiente simulado, foi considerado um sistema de condicionamento de ar. O consumo do aparelho foi calculado no período das 21horas às 8 horas, e a temperatura do termostato de refrigeração foi estabelecida em 24º C (RTQR, 2012). Desta forma, toda vez que a temperatura do ambiente ultrapassasse os 24º C, ao longo do período considerado, o parelho era acionado. Isso possibilitou calcular o consumo energético – em kWh – de cada situação simulada. Para o restante das horas do dia, o ambiente foi considerado naturalmente ventilado, como estabelece o RTQR (2012).

Para a modelagem do sistema de condicionamento de ar, foram considerados ainda, com base no RTQR (2012), os seguintes requisitos:

- Taxa de fluxo de ar por pessoa de 0,00944 m/s;
- Modo de operação do ventilador 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 (COP) de 3,00 W/W;
- Razão entre o calor fornecido ao ambiente e a energia consumida pelo equipamento (COP) de 2,75 W/W;
- Número máximo de horas não atendidas do sistema de condicionamento de ar de 10%;
- Capacidade do sistema de condicionamento de ar dos ambientes dimensionada automaticamente pelo programa de simulação, de forma que atenda à exigência do limite de horas não atendidas.

Após a configuração de todos os parâmetros mencionados anteriormente, considerados “fixos” ao longo das simulações, iniciou-se o processo de modelagem

da edificação. Para tanto, considerou-se as variáveis relacionadas às superfícies das paredes. Foram então, configuradas as propriedades térmicas referentes as paredes em blocos cerâmicos, blocos de concreto e no sistema em *steel frame*, como apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6.

Tabela 4 - Propriedades térmicas dos componentes das paredes com bloco cerâmico

Alvenaria com bloco cerâmico (9 x 14 x 24) com 6 furos quadrados e reboco de 2,5cm nas faces externa e interna	14cm de espessura	
Transmitância térmica da parede (U)	2,46 W/(m².K)	
Emissividade (ε) das paredes	0,9	
Absortância (α) das paredes	0,3	

Detalhamento das camadas que compõem a parede

Camadas	Componentes	Espessura (m)	Condutib. (W/m.K)	Densidade (kg/m³)	Calor específico (kJ/kg.K)
1ª	Reboco	0,025	1,15	2000	1,00
2ª	Bloco cerâmico	0,01	0,90	1600	0,92
3ª	Ar	0,03	-	-	-
4ª	Bloco cerâmico	0,01	0,90	1600	0,92
5ª	Ar	0,03	-	-	-
6ª	Bloco cerâmico	0,01	0,90	1600	0,92
7ª	Reboco	0,025	1,15	2000	1,00

Fonte: Elaborado a partir da ABNT NBR 15.220:2005 (ASSOCIAÇÃO... , 2019).

Tabela 5 - Propriedades térmicas dos componentes das paredes com bloco de concreto

(continua)

Alvenaria com bloco de concreto (9 x 19 x 39) com 2 furos retangulares e reboco de 2,5cm nas faces externa e interna	14cm de espessura	
Transmitância térmica da parede (U)	2,78 W/(m².K)	
Emissividade (ε) das paredes	0,9	
Absortância (α) das paredes	0,3	

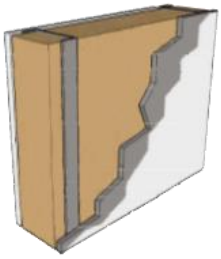
Detalhamento das camadas que compõem a parede

(conclusão)

Camadas	Componentes	Espessura (m)	Condutib. (W/m.K)	Densidade (kg/m³)	Calor específico (kJ/kg.K)
1ª	Reboco	0,025	1,15	2000	1,00
2ª	Bloco concreto	0,02	1,75	2200	1,00
3ª	Ar	0,05	-	-	-
4ª	Bloco concreto	0,02	1,75	2200	1,00
5ª	Reboco	0,025	1,15	2000	1,00

Fonte: Elaborado a partir da ABNT NBR 15.220:2005 (ASSOCIAÇÃO... ,2019).

Tabela 6 - Propriedades térmicas dos componentes das paredes em *steel frame*

Sistema em *Light Steel Frame* composto por perfis metálicos com 9cm e lã de rocha com 9cm, revestido internamente com placa de gesso acartonado de 1,25cm e externamente por placa cimentícia de 1cm	11,25cm de espessura	
Transmitância térmica da parede (U)	0,38 W/(m².K)	
Emissividade (ε) das paredes	0,9	
Absortância (α) das paredes	0,3	

Detalhamento das camadas que compõem a parede

Camadas	Componentes	Espessura (m)	Condutibi. (W/m.K)	Densidade (kg/m³)	Calor específico (kJ/kg.K)
1ª	Placa de gesso	0,0125	0,35	1000	0,84
2ª	Perfil metálico	0,09	55	7800	0,46
	Lã de rocha	0,09	0,045	100	0,70
3ª	Placa cimentícia	0,01	0,95	2200	0,84

Fonte: Elaborado a partir da ABNT NBR 15.220:2005 (ASSOCIAÇÃO... , 2005) e Souza; Amparo e Gomes (2011).

Para todos modelos de subsistemas de vedação vertical detalhados anteriormente, foi adotado o mesmo padrão de abertura, sendo considerado o modelo de janela mais utilizado na região, conforme demonstrado por Nico-Rodrigues (2015), como já demonstrado anteriormente. Contudo, ressalta-se que foram consideradas duas situações para a abertura que compõe o ambiente simulado. Na primeira, foi simulada apenas o modelo apontado por Nico-Rodrigues (2015), como o mais usual na região. Na segunda, foi acrescido ao modelo mencionado, um pano em venezianas que possibilitasse o total sombreamento da abertura e, ao mesmo tempo, permitisse o fluxo contínuo do ar, com o intuito de analisar a influência do sombreamento no consumo energético do ambiente.

Destaca-se, ainda, que as dimensões da janela seguem a NBR 15.575 – 4, que determina as diretrizes para a região onde a edificação está situada, ou seja, Zona Bioclimática 8, e a NBR 15.220 - 3, que prescreve um percentual mínimo de 8% da área do piso para abertura de ventilação. As características, o modo de operação e as propriedades térmicas dos materiais que compõem a janela são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Especificações do modelo e das propriedades térmicas dos materiais que compõem a janela

Características	**Dimensões**
Área do ambiente	12,82 m²
Dimensões da janela	200 x 110 x 110 (largura x altura x peitoril) Área total = 2,20 m²
Área de ventilação	1,10 m²
Modelo de janela	**Controle de abertura**
Folhas com pano em vidro	08h00 – 21h00 = 100% janela aberta = 50% do vão 21h00 – 08h00 = janela fechada se a temperatura interna for maior que 24º C (o ar condicionado é ativado).
Folhas com pano em vidro e veneziana	Mesmo funcionamento ao longo das 24 horas, porém, com venezianas. Foi considerado o total sombreamento da janela. Obs: o sistema de abertura de correr possibilita apenas 50% de abertura do vão.
Propriedades térmicas dos materiais que compõem a janela	
Transmitância térmica (U) do quadro e veneziana em alumínio	5,88 W/(m².K)
Transmitância térmica do vidro 6mm incolor (U)	5,77 W/(m².K)

Fonte: elaborado a partir da ABNT NBR 15.575 -4 (ASSOCIAÇÃO..., 2013; NICO-RODRIGUES, 2015).

A outra variável considerada foi a utilização da fachada ventilada em conjunto com os sistemas construtivos já mencionados. Com isso, foi possível analisar o efeito do sombreamento em conjunto com cada sistema construtivo no desempenho energético do ambiente analisado. Os componentes da fachada ventilada proposta são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades térmicas dos materiais que compõem a fachada ventilada

Materiais	Espessura (m)	Condutibilidade (W/m.K)	Densidade (kg/m³)	Calor específico (kJ/kg.K)	Resistência térmica (m².k/W)
Placa cimentícia	0,015	0,95	2200	840	-
Ar	0,10	-	-	-	0,17

Fonte: Elaborado a partir da ABNT NBR 15.220:2005 (ASSOCIAÇÃO..., 2005) e Souza; Amparo e Gomes (2011).

Em síntese, foram consideradas as mesmas configurações do edifício para todas as situações analisadas, variando apenas o sistema construtivo, o uso do sombreador na janela, a fachada ventilada e a combinação entre eles, considerando as orientações Norte, Leste, Sul e Oeste. Diante do exposto, com os resultados das simulações, foi possível analisar à influência de cada variável no desempenho energético do ambiente simulado.

3.3 CÁLCULO DO CUSTO FINANCEIRO PARA REFRIGERAÇÃO DO AMBIENTE SIMULADO

Para a obtenção dos custos financeiros em Reais (R$) referentes ao consumo de energia elétrica para refrigerar o ambiente com cada variável simulada, foram utilizados os dados da distribuidora de energia elétrica do Espírito Santo, EDP (Energias de Portugal) e ESCELSA (Espírito Santo Centrais Elétricas S.A), tendo como base a resolução homologatória nº 2.589 de 06 de agosto de 2019, que determina as Tarifas de Energia (TE) e as Tarifas de Uso dos Sistemas de Distribuição (TUSD) referentes à ESCELSA. A edificação analisada se enquadra como parte do subgrupo “B1-Residencial” com tarifa para TUSD de 0,27440 R$/kWh e para a TE 0,25141 R$/kWh (EDP ESCELSA, 2019).

É importante salientar que foi considerado para os cálculos a Bandeira Tarifária Verde, que não causa nenhuma alteração nos valores das tarifas. Além dos valores tarifários, considerou-se também os impostos (tributos) do Programa de Integração Social - PIS; o Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público - PASEP; e a Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social – COFINS, que sofrem uma leve variação mensalmente. Foram considerados os meses de janeiro a dezembro de 2019 para o cálculo (EDP ESCELSA, 2019a) e o Imposto sobre Circulação de Mercadoria e Serviços – ICMS, que tem o valor fixo de 25%, seguindo os valores de cálculos utilizados pela EDP ESCELSA (EDP ECELSA, 2019b). A Equação 1

representa o cálculo da tarifa com tributos. Vale ressaltar, que não foi considerada a taxa de iluminação pública no cálculo do consumo.

$$\text{Tarifa com tributos} = \frac{\text{Tarifa ANEEL}}{1-\frac{\text{Tributos \%}}{100}} \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

-Tarifa ANEEL é a soma das tarifas TUSD + TE [R$];
-Tributos é a soma dos impostos de PIS/PASEP + COFINS + ICMS [%].

O valor encontrado é multiplicado pela quantidade de kWh de acordo com a Equação 2. Assim, para calcular o consumo energético em kWh do aparelho condicionador de ar utilizado no ambiente, foram utilizados os valores em kWh encontrados nas simulações, e estes valores foram multiplicados pelas tarifas vigentes.

$$\text{Valor final da fatura} = \text{tarifa com tributos [R\$] x Consumo [kWh]} \quad \text{(Equação 2)}$$

É importante destacar que, para o cálculo do custo anual para refrigerar o ambiente, foi feito primeiramente o cálculo mensal para cada situação. Isso foi necessário devido a variação mensal dos impostos cobrados, sendo que o valor encontrado mensalmente foi então somado ao longo dos doze meses, obtendo-se assim o custo anual.

.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para melhor apresentar os resultados obtidos na pesquisa, a análise dos mesmos foi dividida em etapas. A primeira, apresentou e comparou o desempenho energético do ambiente, utilizando os três sistemas de vedação vertical - *steel frame*, bloco cerâmico, bloco de concreto - sem sombreador na abertura do ambiente e sem o uso da fachada ventilada. Após isso, analisou-se cada sistema construtivo apenas com a janela sombreada, depois, apenas com a fachada ventilada. Por último, foi verificado o desempenho da combinação de cada sistema construtivo com o uso do sombreador e com o uso da fachada ventilada simultaneamente.

Na segunda etapa, foi feita uma análise individual do desempenho energético anual do ambiente, considerando todas variáveis simuladas de acordo com cada orientação. Verificou-se também, o percentual de redução do consumo energético para as quatro orientações de acordo com cada estratégia simulada.

Por fim, na terceira etapa, foram apresentados os gastos finais em moeda corrente (R$) para resfriar o ambiente analisado, com base no consumo do aparelho condicionador de ar. Para isso, foi usado como referência os valores apresentados na etapa anterior.

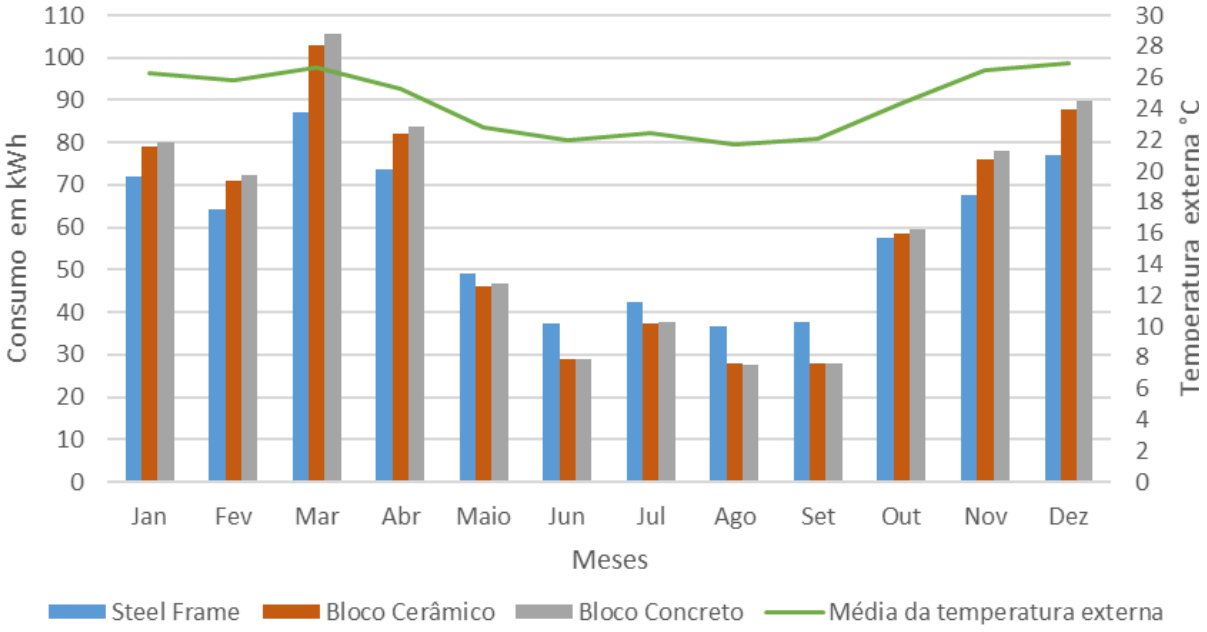
4.1 Desempenho energético do ambiente considerando os sistemas construtivos em *steel frame*, bloco cerâmico e bloco de concreto

Com os resultados das simulações, foi possível analisar o desempenho energético do ambiente para cada situação. Primeiramente, analisou-se os resultados do ambiente variando apenas as paredes – para as quatro orientações, tendo sempre como referência a abertura do ambiente –, sem considerar o uso do sombreador e da fachada ventilada. Para esta situação, o pior desempenho foi com a abertura voltada para Norte, seguida da orientação Leste, Oeste e Sul, como demonstrado a seguir.

Considerando apenas a orientação Norte, a parede em *steel frame* propiciou o menor consumo energético do ambiente, tendo a parede em bloco cerâmico em segundo e a vedação em bloco de concreto o pior desempenho (Gráfico 3). Destaca-se, ainda, os resultados obtidos para os meses mais quentes do ano – outubro a abril –, onde houve o maior consumo, com ênfase para o mês de março, onde o consumo em kWh/mês, considerando a vedação em bloco de concreto, chegou a 105,71 kWh, pior

desempenho entre todos meses do ano. No mesmo mês, o ambiente com bloco cerâmico e com o sistema em *steel frame*, apresentou um consumo de 102,88 kWh e 86,98 kWh respectivamente. Assim, apenas para o mês de março, entre o sistema construtivo em *steel frame* e o sistema construtivo em bloco de concreto, houve uma diferença de 18,73 kWh.

Gráfico 3 - Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para norte



Fonte: o autor (2020).

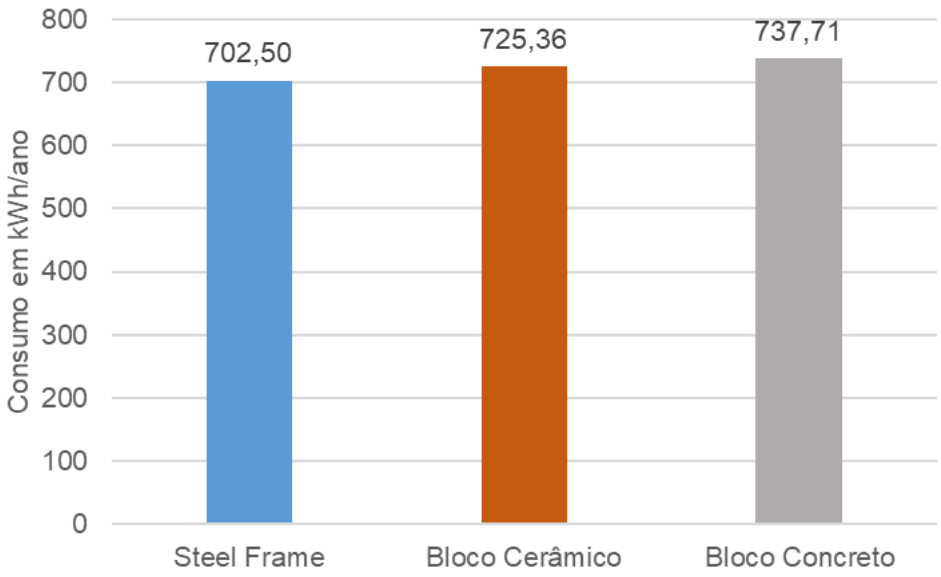
Para as diferentes vedações analisadas, o melhor desempenho do sistema em *steel frame* justificou-se por ter a menor transmitância térmica, consequentemente apresentou também um melhor isolamento térmico, o que explica também, sua “pior” performance em relação ao bloco cerâmico e ao bloco de concreto nos meses de maio a setembro, meses onde as temperaturas são mais amenas, incluindo toda estação de inverno.

Conforme demonstrado no gráfico anterior, a média da temperatura externa nestes meses esteve abaixo dos 24º C. Contudo, devido ao seu melhor isolamento térmico, podem ter ocorrido flutuações térmicas onde a temperatura interna ficou acima dos 24º C, consequentemente, o fluxo de calor gerado dentro do ambiente ocasionou um maior consumo, haja vista a menor possibilidade de troca de ar entre o meio interno e externo por meio desta vedação, devido sua maior resistência térmica frente aos sistemas em bloco cerâmico e de concreto. Ressalta-se, ainda, o fato do aparelho

condicionador de ar ser utilizado efetivamente – considerando situações reais – com maior frequência nos meses mais quentes.

Ainda assim, considerando o somatório ao longo de todo ano, o sistema em *steel frame* apresentou o melhor desempenho, com um consumo de 702,50 kWh/ano, seguido pelo bloco cerâmico com 725,36 kWh/ano, e pelo bloco de concreto com 737,71 kWh/ano, apenas para a orientação Norte, como apresentado na Gráfico 4.

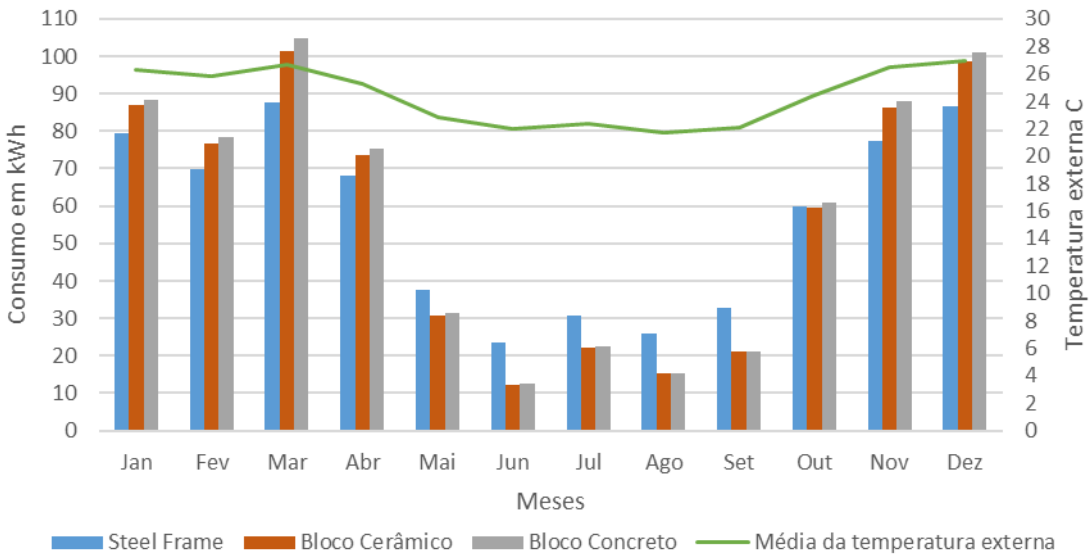
Gráfico 4 - Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para Norte



Fonte: o autor (2020).

Já em relação ao consumo energético do ambiente quando considerado a abertura voltada para Leste, obteve-se o segundo pior desempenho ao longo de todo ano. Mais uma vez, o sistema em *steel frame* apresentou os melhores resultados, com destaque novamente para os meses mais quentes do ano, enfatizando o mês de março, onde houveram as maiores oscilações, alcançando um consumo energético para o sistema em *steel frame* de 87,82 kWh/mês, e de 101,41 kWh/mês e 104,66 kWh/mês para o ambiente com bloco cerâmico e com bloco de concreto, respectivamente. Destaca-se, também, o mês de dezembro, onde o ambiente simulado apresentou um consumo maior do que o consumo do ambiente com abertura voltada para Norte, considerando todos três modelos de paredes (Gráfico 5).

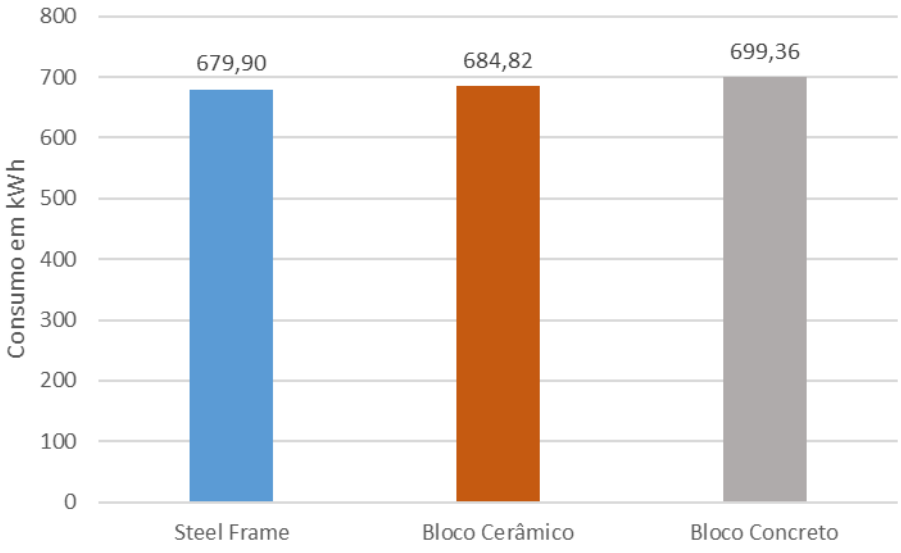
Gráfico 5 - Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para leste



Fonte: o autor (2020).

Como ocorrido para a orientação norte e justificado anteriormente, para a orientação leste, nos meses mais frios, o sistema em *steel frame* apresentou os piores resultados, com diferenças ainda mais acentuadas do que na orientação norte, o que resultou em uma menor diferença de consumo ao longo do ano. Ainda assim, no somatório anual, como demonstrado no Gráfico 6, seu desempenho foi melhor, tendo apresentado um consumo de 679,90 kWh/ano, enquanto que o ambiente com bloco cerâmico obteve um consumo de 684,82 kWh/ano e com o bloco de concreto 699,36 kWh/ano.

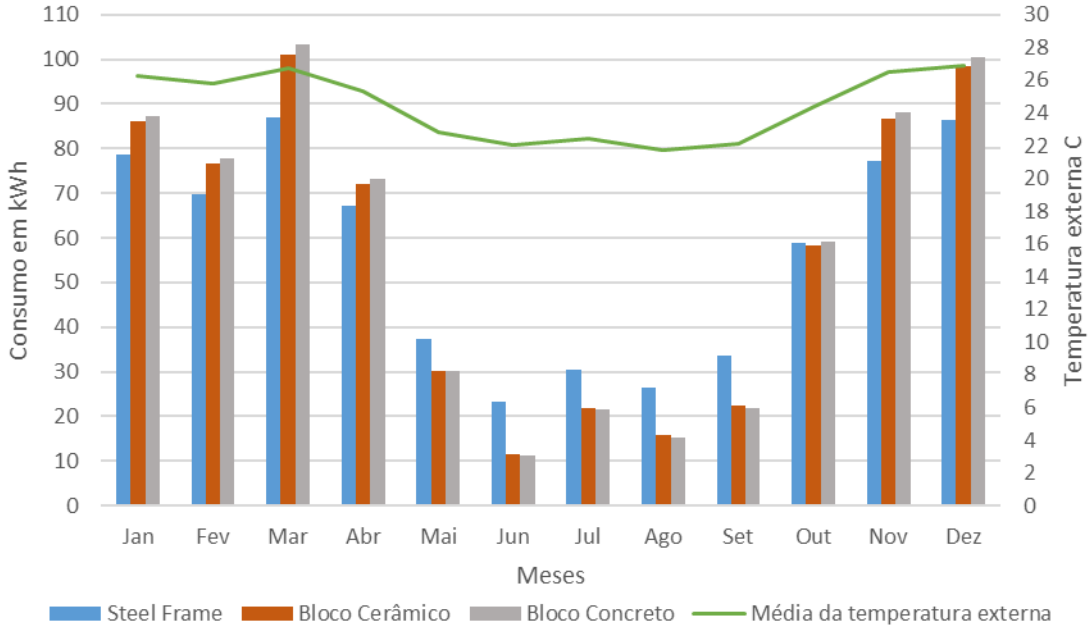
Gráfico 6 - Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para Leste



Fonte: o autor (2020).

Para o ambiente com abertura voltada para Oeste, o consumo energético foi o segundo melhor. Ainda assim, a maior discrepância de consumo foi nos meses mais quentes, com destaque novamente para os meses de março e dezembro, que apresentaram resultados similares. Outra vez, o menor consumo foi para o ambiente utilizando o sistema em *steel frame* ao longo dos meses mais quentes, tendo apresentado novamente também, o pior desempenho nos meses de inverno, como ocorrido nas simulações já apresentadas (Gráfico 7).

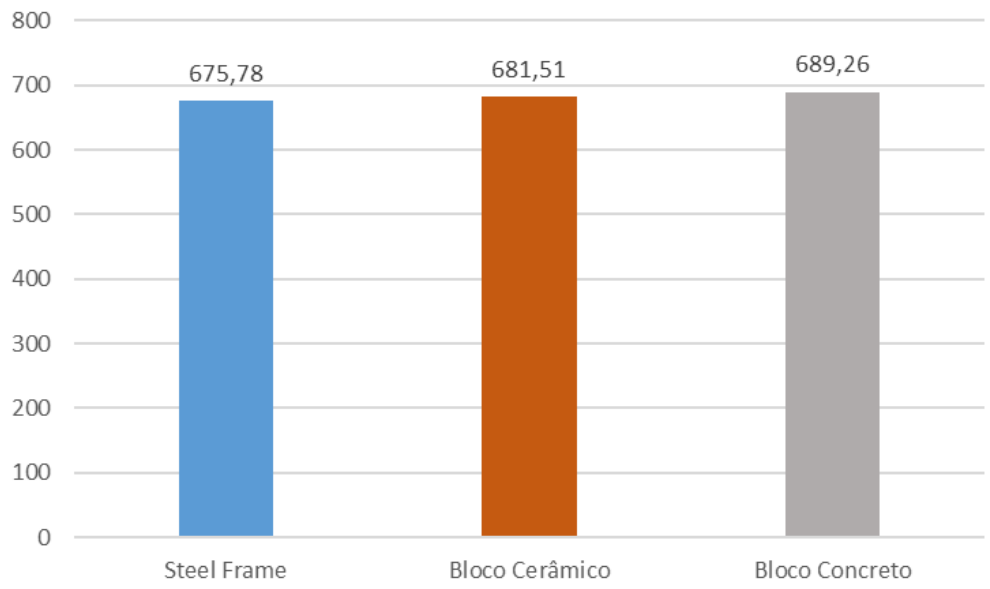
Gráfico 7 - Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para leste



Fonte: o autor (2020).

No somatório anual do consumo energético, relativo ao ambiente com abertura voltada para Oeste, apesar de pequena, percebeu-se uma diminuição no consumo em relação as orientações Leste e Norte. Ao longo de todo ano, o sistema em *steel frame* propiciou ao ambiente simulado um consumo energético de 675,78 kWh/ano, seguido pelo sistema construtivo em bloco cerâmico com 681,51 kWh/ano e do bloco de concreto com 689,26 kWh/ano, como ilustrado no Gráfico 8.

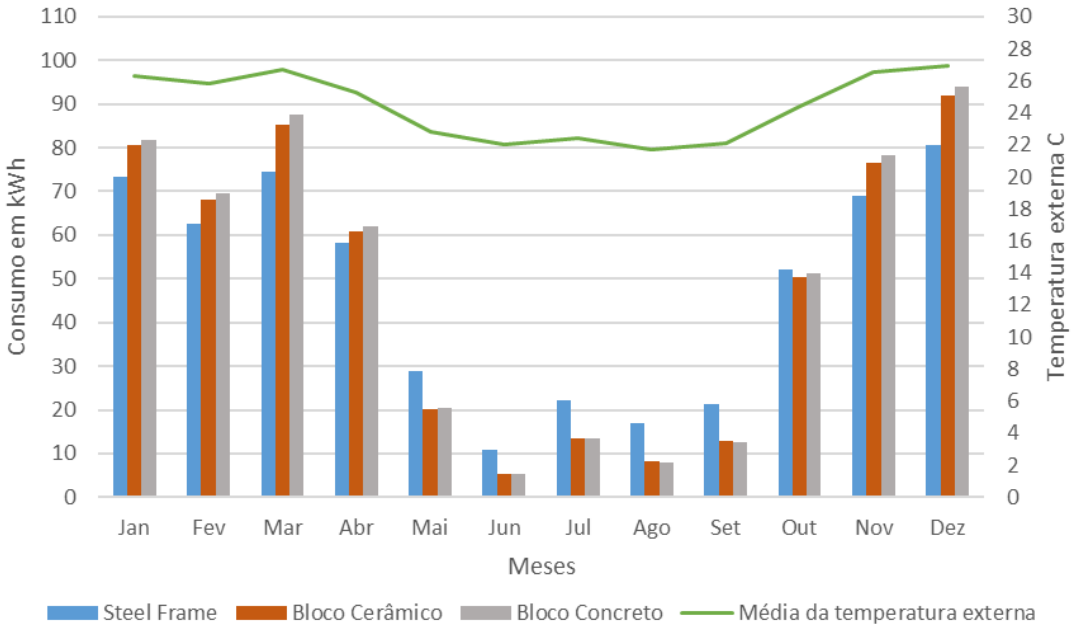
Gráfico 8 - Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para oeste



Fonte: o autor (2020).

Por último, considerando apenas os sistemas construtivos mencionados e com o ambiente com abertura voltado para sul, obteve-se o menor consumo energético ao longo de todo ano. Novamente, o melhor desempenho foi do ambiente utilizando o sistema em *steel frame*, repetindo assim, o melhor desempenho nos meses mais quentes e o pior nos meses mais frios. Destaca-se o mês de dezembro, que apresentou os maiores consumos, sendo 80,47 kWh/mês, 91,83 kWh/mês e 93,86 kWh/mês para os sistemas em *steel frame*, bloco cerâmico e bloco concreto, respectivamente (Gráfico 9).

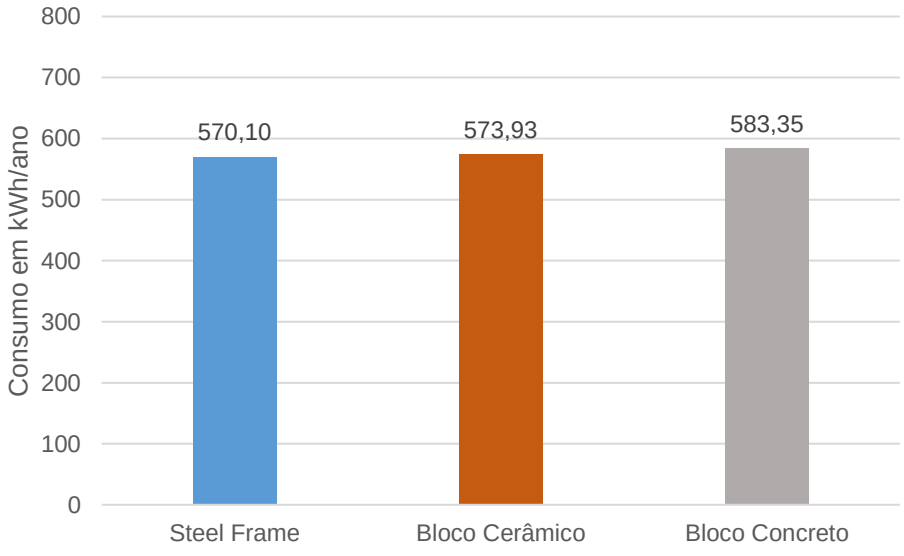
Gráfico 9 - Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para sul



Fonte: o autor (2020).

Em relação ao consumo anual relativo ao ambiente voltado para Sul, houve uma diminuição considerável, que ultrapassou os 100 kWh/ano quando comparado com as outras três orientações analisadas. Com o sistema em *steel frame*, o ambiente apresentou um consumo energético de 570,10 kWh/ano, seguido de perto pelo sistema em bloco cerâmico com 573,93 kWh/ano e pelo bloco de concreto com 583,35 kWh/ano (Gráfico 10).

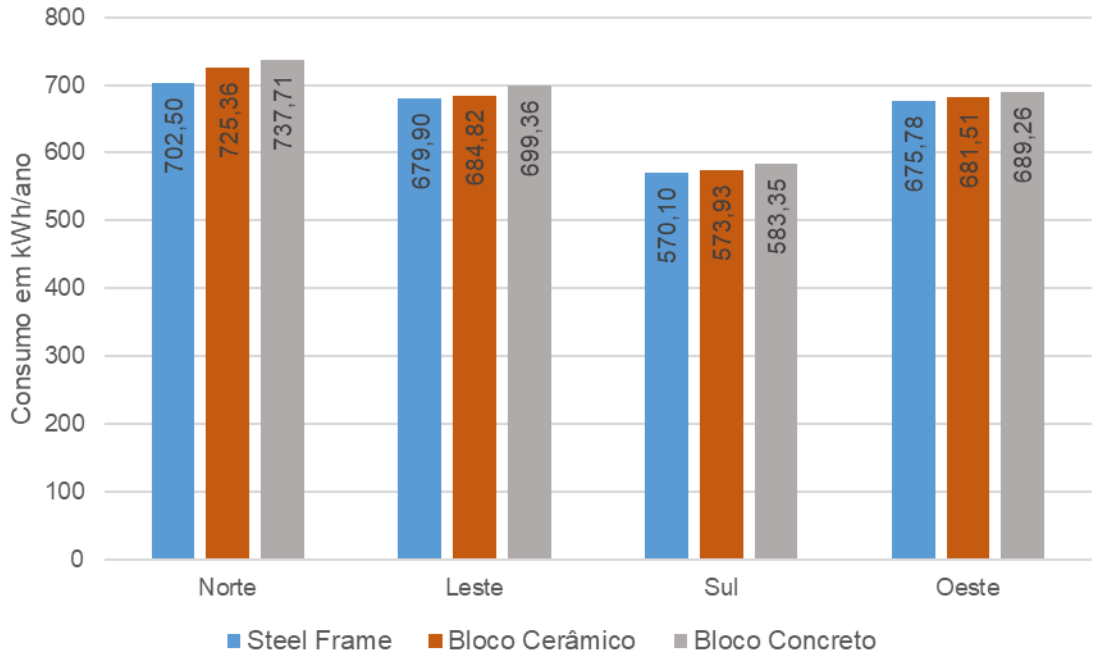
Gráfico 10 - Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para Sul



Fonte: o autor (2020).

Após a realização de uma análise individualizada para cada orientação, comparou-se o desempenho do ambiente com os três sistemas construtivos para as quatro orientações ao longo de todo ano, como demonstrado no Gráfico 11.

Gráfico 11 - Consumo energético ao longo do ano para cada orientação



Fonte: o autor (2020).

Como observado e já mencionado anteriormente, o ambiente com abertura voltada para Norte, apresentou o maior consumo energético, seguido pela orientação leste, oeste e sul. O maior consumo em relação a orientação norte, ocorreu devido a abertura do ambiente está voltada para norte, o que propiciou um acentuado ganho de calor devido a incidência solar ao longo da maior parte do ano. Outro fator relevante, foi o fato da fachada adjacente ao ambiente está voltada para oeste, o que resulta em um maior ganho de calor proveniente da forte incidência solar no período mais quente do dia, ao longo dos 12 meses analisados.

Já a orientação leste, que propiciou o segundo pior desempenho, pode ser justificada pelo fato da fachada adjacente à fachada com abertura, está voltada para a orientação norte, consequentemente, está exposta a uma alta radiação solar ao longo da maior parte do dia. Por sua vez, o melhor desempenho do ambiente com abertura voltada para oeste, em relação a fachada norte e leste, justifica-se pelo fato de sua fachada adjacente estar voltada para a orientação sul. Ainda que o ambiente sofra com a incidência solar no período da tarde, a temperatura foi amenizada devido a pouca incidência solar na fachada sul. Por fim, o ambiente voltado para sul, apresentou o

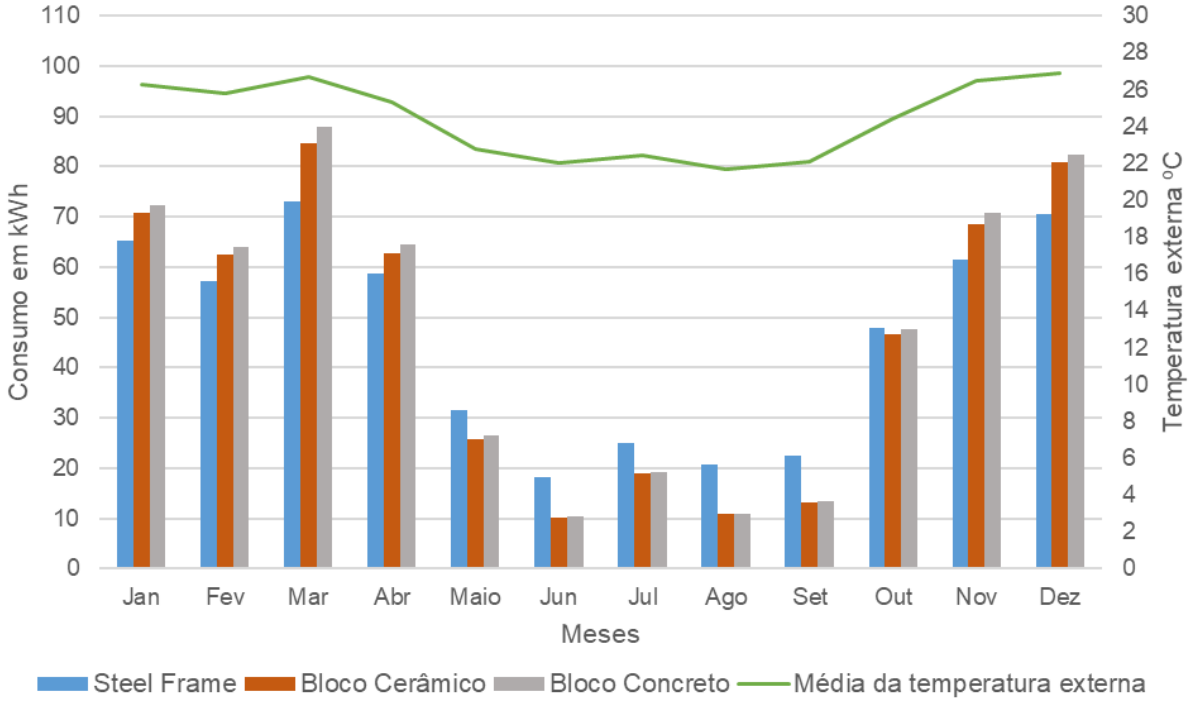
melhor desempenho. A abertura voltada para Sul, em conjunto com a fachada adjacente, voltada para leste, propiciaram o menor consumo energético. Isso devido ao fato do ambiente com abertura voltada para esta orientação não sofrer grande influência dos raios solares e, também, pela fachada voltada para leste receber insolação apenas no período da manhã, quando as temperaturas externas são mais amenas.

4.2 Desempenho energético do ambiente considerando os sistemas construtivos em *steel frame*, bloco cerâmico e bloco de concreto, com o uso do sombreador na abertura

O desempenho energético do ambiente com sombreador, apresentou melhorias consideráveis quando comparado com o consumo sem sombreador. Seu comportamento ao longo de todo ano foi similar ao ambiente descrito anteriormente, tendo o ambiente com abertura voltada para Norte apresentado o pior resultado, seguido da orientação Leste, Oeste e Sul. Mesmo com o uso do sombreador, mais uma vez, o sistema em *steel frame* propiciou o melhor desempenho, principalmente nos meses mais quentes, seguido pelo sistema com bloco cerâmico e pelo sistema com blocos de concreto. Contudo, ressalta-se, que houve uma menor discrepância entre as quatro orientações analisadas.

Analisando primeiramente a pior situação, o ambiente com abertura voltada para norte apresentou resultados com uma melhora significativa em relação ao ambiente sem sombreador. Considerando o mês de maior consumo, março, e tendo como parâmetro o pior desempenho entre os sistemas construtivos, o sistema com blocos de concreto apresentou uma redução de 17,82 kWh apenas para o mês de março. Destaca-se ainda, o pior desempenho do sistema em *steel frame* ao longo dos meses mais frios, como ocorrido nas simulações apresentadas anteriormente (Gráfico 12).

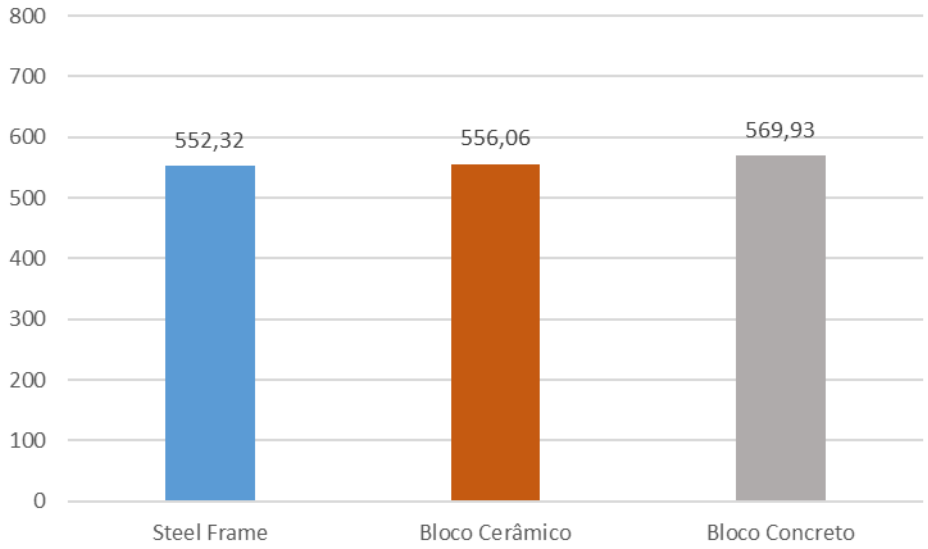
Gráfico 12 - Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para norte, com sombreador



Fonte: o autor (2020).

Em relação ao somatório do consumo energético ao longo do ano, o sistema em *steel frame* com o uso do sombreador na abertura, propiciou ao ambiente um consumo energético de 552,32 kWh/ano, o que representa 150,18 kWh/ano a menos que o ambiente sem sombreador. Já com o sistema em bloco cerâmico, o ambiente apresentou um consumo de 556,06 kWh/ano, uma redução de169,30 kWh/ano em comparação com o ambiente sem sombreador. Por sua vez, o ambiente com o sistema construtivo em blocos de concreto, consumiu 569,93 kWh/ano, 167,78 kWh/ano a menos do que o consumido pelo ambiente sem o uso do sombreador (Gráfico 13).

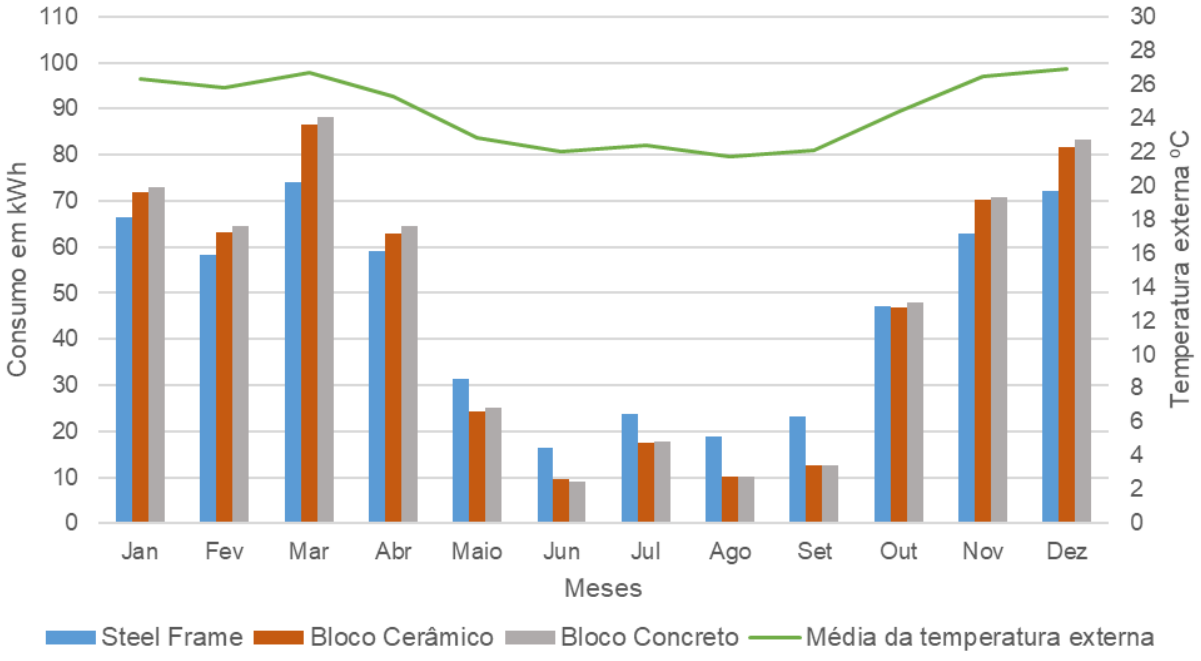
Gráfico 13 - Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para norte, com sombreador



Fonte: o autor (2020).

Para o ambiente com sombreador voltado para a orientação leste, observou-se também, uma grande diminuição no consumo em relação ao ambiente voltado para mesma orientação e sem sombreador. O sistema em *steel frame* foi novamente o mais eficiente nos meses mais quentes, percebeu-se também, uma alta no consumo com o uso deste sistema nos meses mais frios, indicando uma maior influência do sombreador sobre a temperatura interna do ambiente simulado com os blocos cerâmicos e os blocos de concreto (Gráfico 14).

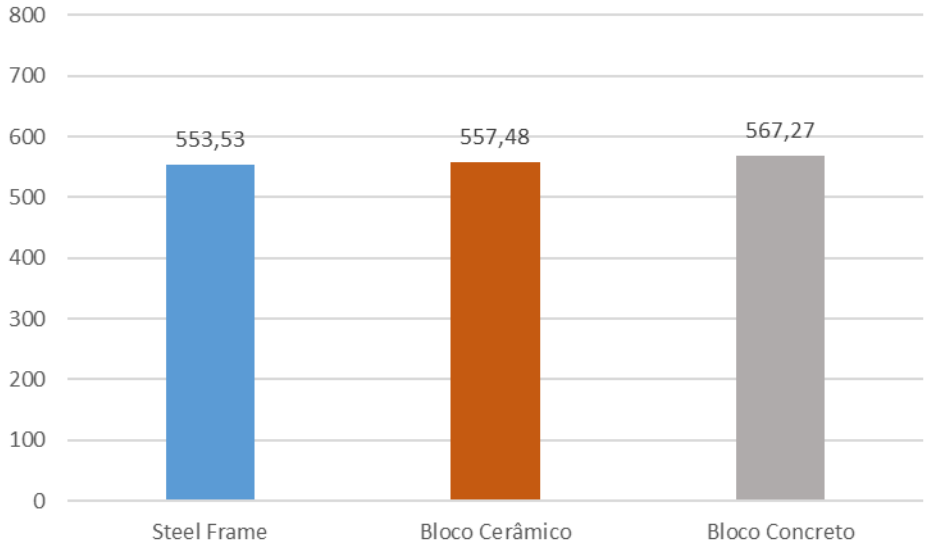
Gráfico 14 - Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para leste, com sombreador



Fonte: o autor (2020).

Como observado, a inserção do sombreador na abertura do ambiente fez com que a diferença do desempenho energético nos meses mais frios representassem um maior consumo para o sistema em *steel frame*, o que resultou em uma menor diferença de consumo anual entre os sistemas analisados, principalmente entre o sistema em *steel frame* e o sistema com blocos cerâmicos. Para a orientação leste, o ambiente apresentou um consumo anual de 553,53 kWh com o sistema em *steel frame*, 557,48 kWh/ano com o sistema em bloco cerâmico e 567,27 kWh/ano com o sistema em bloco de concreto (Gráfico 15).

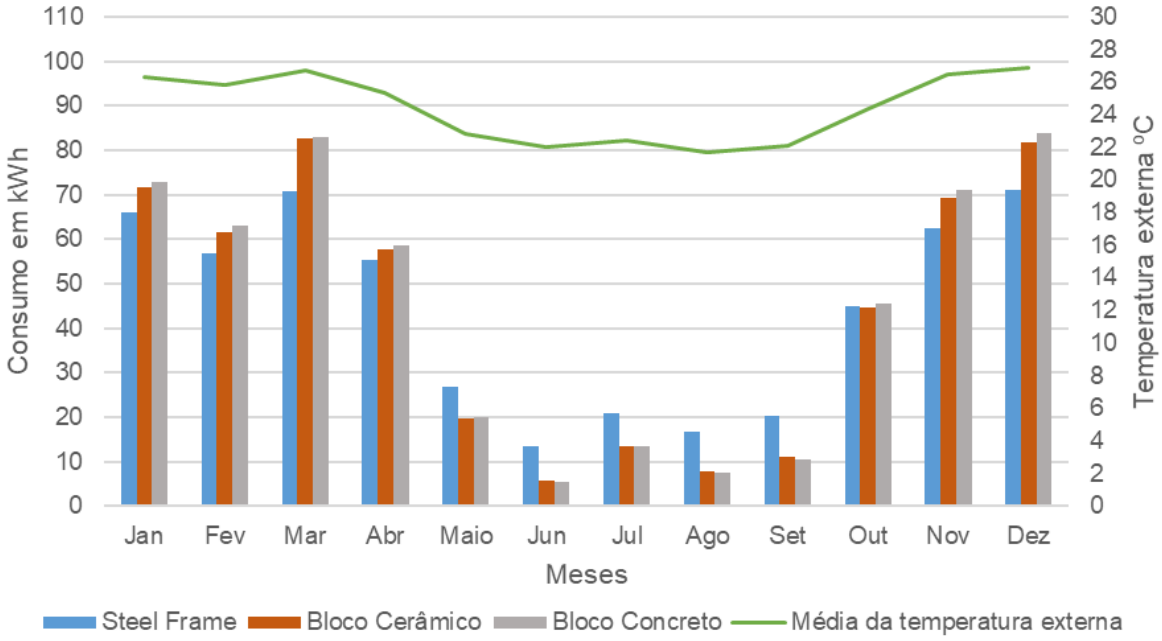
Gráfico 15 - Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para leste, com sombreador



Fonte: o autor (2020).

Como ocorrido nas simulações com o ambiente sem sombreador, o ambiente com abertura sombreada voltada para oeste, obteve o segundo menor consumo energético, e o sistema em *steel frame* apresentou os melhores resultados. Entretanto, devido as melhores condições internas, graças a uma melhor orientação e uma menor influência do meio externo, o sistema em bloco de concreto se destacou, diminuindo a diferença de consumo, principalmente quando comparado com o sistema em bloco cerâmico. Este comportamento pôde ser observado ao longo de todo ano (Gráfico 16).

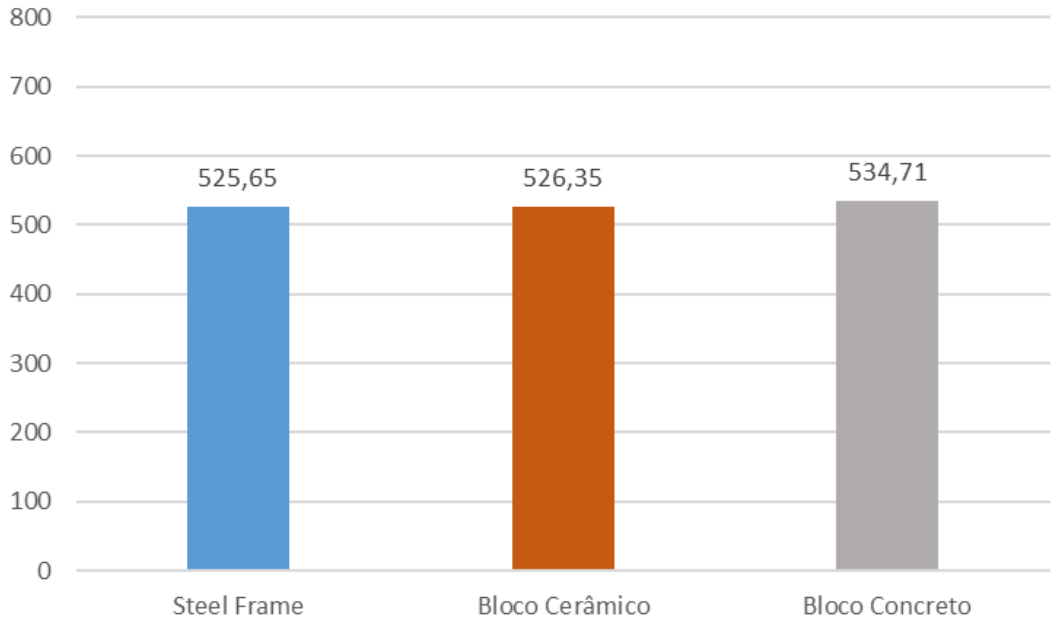
Gráfico 16 - Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para oeste, com sombreador



Fonte: o autor (2020).

No consumo anual do ambiente com sombreador voltado para oeste, observou se novamente, uma diminuição no consumo energético para todos os sistemas, contudo, percebeu-se, também, uma menor diferença entre os três sistemas analisados. Isso ocorreu não apenas devido ao uso do sombreador, mas também pela melhoria das condições internas correspondente a um melhor posicionamento geográfico em relação a insolação, devido a fachada sem abertura estar voltada para sul. O ambiente com sistema em *steel frame* foi responsável por consumir 525,65 kWh/ano, seguido de perto pelo sistema em bloco cerâmico, com 526,35 kWh/ano – menor diferença até então – e o sistema em bloco de concreto, com um consumo de 534,71 kWh/ano, que apresentou a maior melhoria, como demonstrado no Gráfico 17.

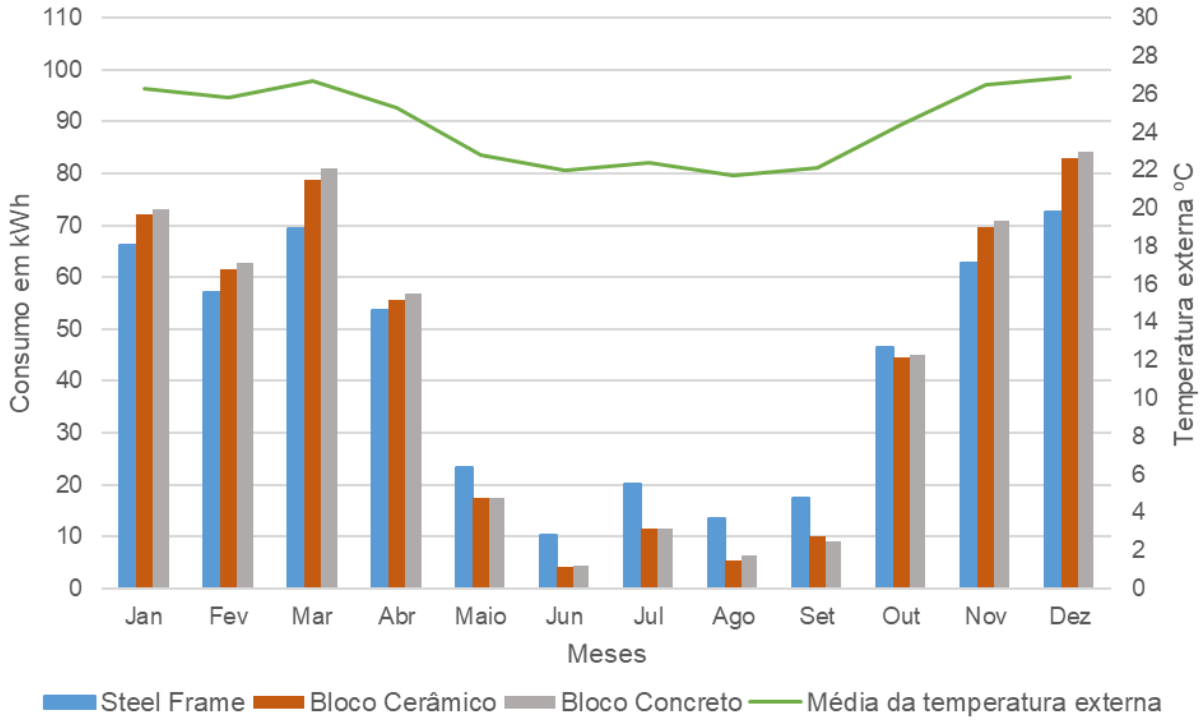
Gráfico 17 - Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para oeste, com sombreador



Fonte: o autor (2020).

Por fim, para o ambiente com abertura sombreada voltada para sul, observou-se o menor consumo entre todas as orientações. Reitera-se, mais uma vez, a melhora no consumo energético com o uso do sombreador e também o fato da parede adjacente estar voltada para a orientação leste, o que possibilitou o melhor desempenho do ambiente entre todas as orientações analisadas. Assim como em todas simulações apresentadas, o sistema em *steel frame* se destacou positivamente nos meses mais quentes e apresentou o maior consumo energético nos meses mais frios. Novamente, observou-se uma melhoria considerável no sistema com blocos de concreto, apresentando um comportamento similar ao do mesmo ambiente com orientação voltada para oeste (Gráfico 18).

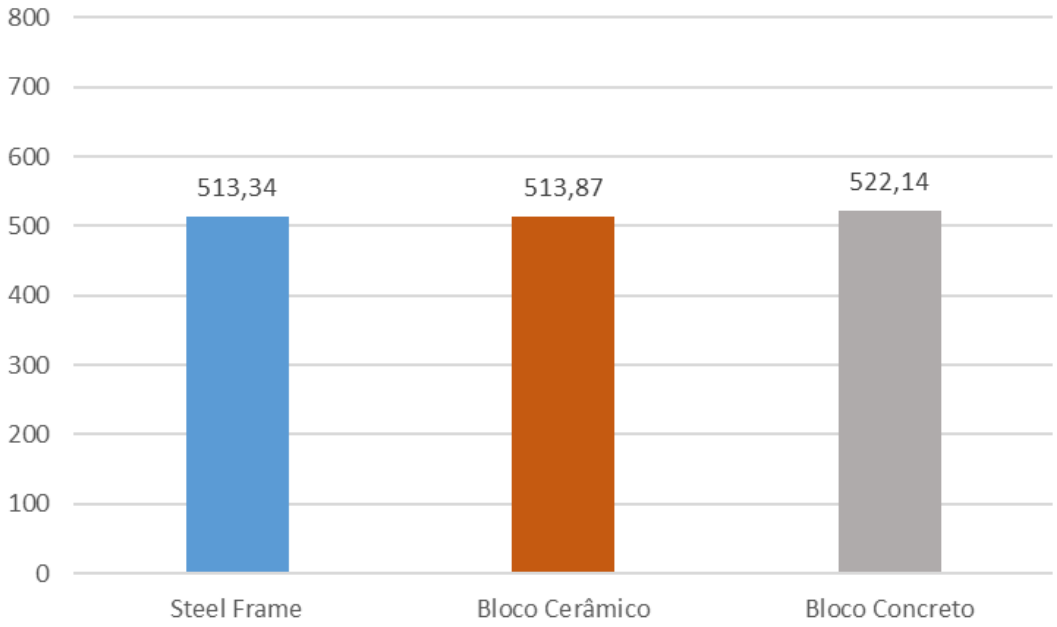
Gráfico 18 - Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para sul, com sombreador



Fonte: o autor (2020).

No somatório anual da performance energética do ambiente com abertura sombreada voltada para sul, observou-se o menor consumo em comparação a todas situações analisadas até então. Contudo, apesar do sistema em *steel frame* ter apresentado o melhor desempenho, com 513,34 kWh/ano, o ambiente com o sistema em blocos cerâmicos quase igualou este resultado, com um consumo de 513,87 kWh/ano. Já o ambiente com o sistema construtivo em blocos de concreto teve um consumo de 522,14 kWh/ano, como observado no Gráfico 19.

Gráfico 19 - Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para sul, com sombreador

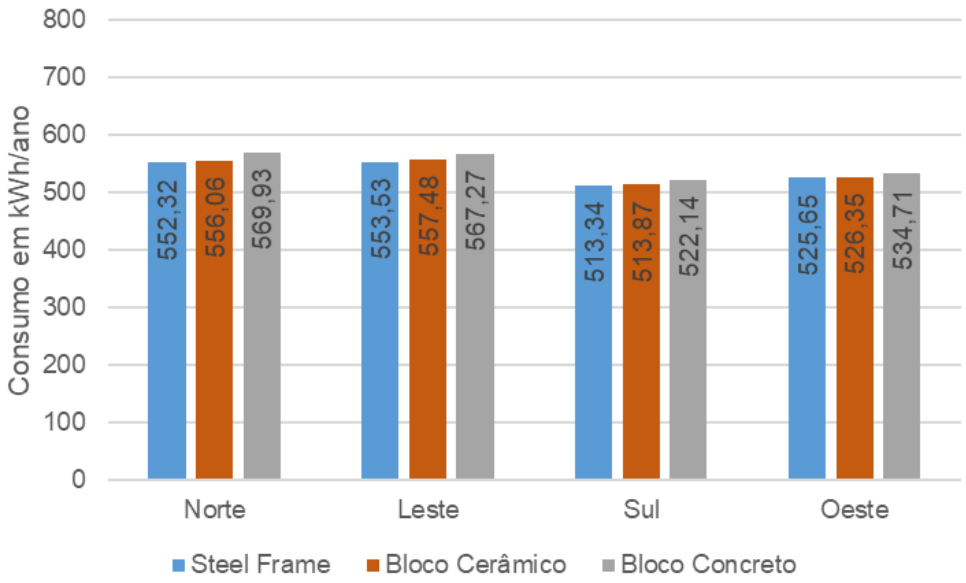


Fonte: o autor (2020).

Após as análises realizadas em todas as orientações para o ambiente com sombreador, foi possível observar o menor consumo energético deste ambiente para todas situações, quando comparado com o ambiente sem a abertura sombreada. Destaca-se, assim, a importância do uso do sombreador na abertura do ambiente, esta estratégia adotada influenciou consideravelmente na minimização do consumo energético do quarto simulado, considerando todas as orientações avaliadas.

Para exemplificar a relevância do sombreador, considerando apenas a orientação norte e o sistema construtivo em bloco de concreto, onde o consumo foi de 569,93 kWh/ano – pior desempenho – (Gráfico 20), em comparação com a mesma situação, porém, com o ambiente sem sombreador, onde o consumo anual foi de 737,71 kWh, houve uma diminuição de 167,78 kWh/ano, o que representa 22,7% de redução em relação ao ambiente sem sombreador.

Gráfico 20 - Consumo energético ao longo do ano para cada orientação com o uso do sombreador na abertura



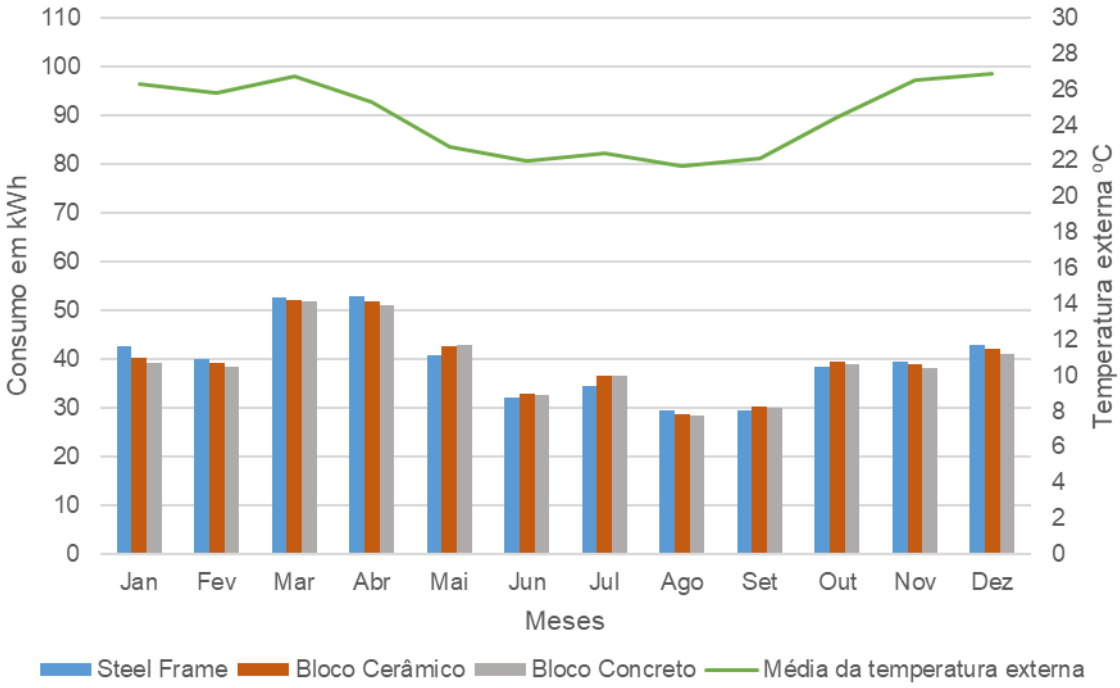
Fonte: o autor (2020).

4.3 Desempenho energético do ambiente considerando os sistemas construtivos em *steel frame*, bloco cerâmico e bloco de concreto com o uso da fachada ventilada e sem sombreador na janela.

Na análise do desempenho energético do ambiente considerando os três sistemas construtivos em conjunto com o uso da fachada ventilada, e não considerando o sombreador na abertura, observou-se que houve uma maior homogeneidade entre o consumo energético em todos os meses e para todas situações consideradas. Contudo, é importante ressaltar o grande impacto da diminuição no consumo energético de todas situações analisadas com o uso da fachada ventilada, e, também, o melhor desempenho do sistema construtivo em blocos de concreto frente ao demais, diferentemente do ocorrido nas simulações apresentadas anteriormente.

Apesar do sistema mais eficiente não ser o *steel frame*, o ambiente com fachada ventilada, apresentou novamente o maior consumo energético para a orientação norte. Entretanto, os sistemas analisados apresentaram um comportamento muito regular ao longo de todo ano, variando entre o sistema em *steel frame* e o bloco de concreto como os sistemas mais eficientes, como ilustrado no Gráfico 21.

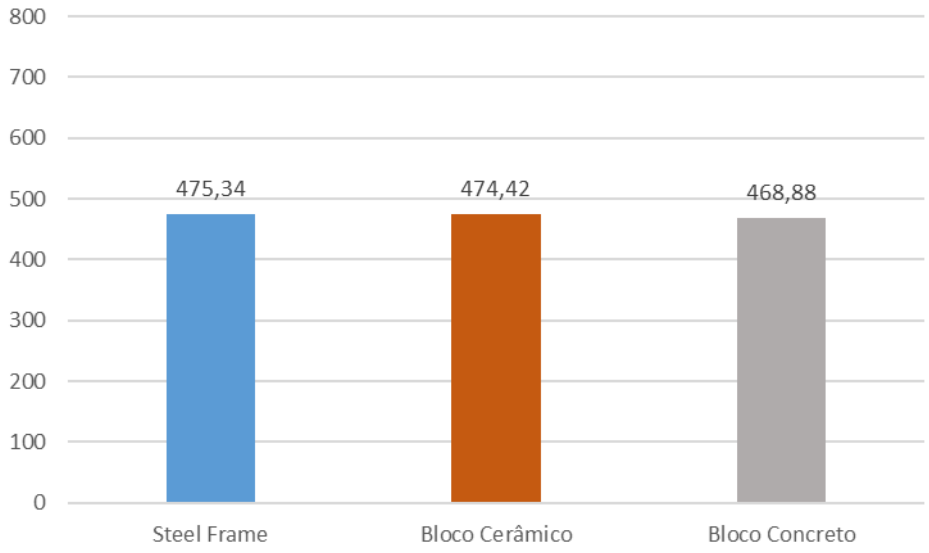
Gráfico 21 - Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para norte, com fachada ventilada



Fonte: o autor (2020).

Ressalta-se, ainda, que houveram menos oscilações em relação ao consumo energético anual, devido ao total sombreamento das paredes com o sistema de fachada ventilada, o que provocou uma regularidade no comportamento dos materiais. Ainda assim, o sistema construtivo em blocos de concreto apresentou o melhor desempenho (Gráfico 22). Isso ocorreu devido sua maior transmitância térmica, causando um efeito contrário ao observado até então para todas as orientações analisadas.

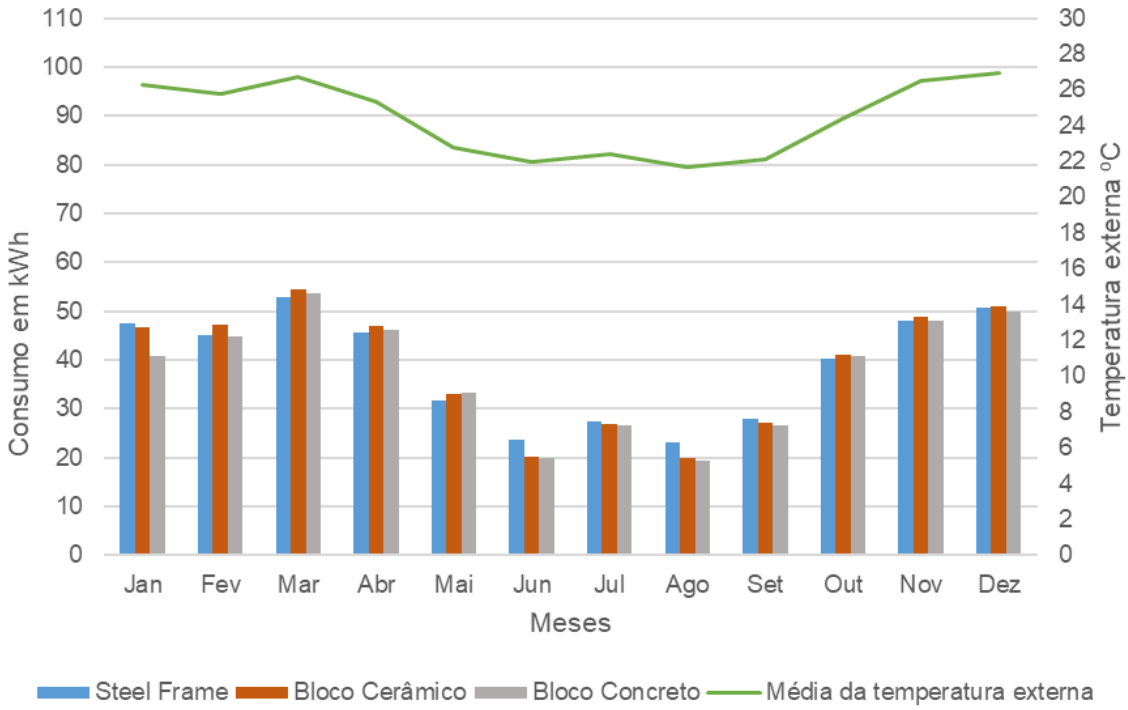
Gráfico 22 - Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para norte, com fachada ventilada



Fonte: o autor (2020).

Depois da orientação norte, o ambiente com abertura voltada para oeste apresentou o segundo pior consumo ao longo dos doze meses analisados, como demonstrado no Gráfico 23. Apesar da fachada adjacente ao ambiente estar voltada para sul, o fato da fachada ventilada minimizar e “igualar” a incidência solar que atinge as paredes do ambiente, a abertura deste local torna-se a maior responsável pelo ganho energético. Por estar voltada para oeste, e sem sombreador, os raios solares incidem diretamente no ambiente ao longo de toda tarde, o que influenciou diretamente no aumento da temperatura interna, e consequentemente, no consumo energético para resfriamento deste ambiente.

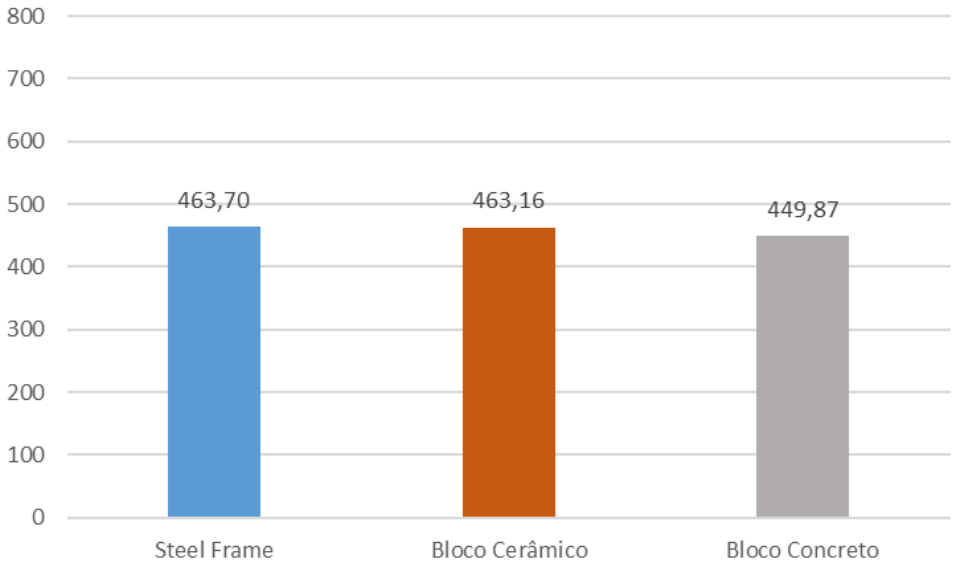
Gráfico 23 - Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para oeste, com fachada ventilada



Fonte: o autor (2020).

Já em relação ao somatório anual do consumo energético para a orientação oeste (Gráfico 24), percebeu-se, assim como para a orientação norte, um melhor desempenho do sistema construtivo com blocos de concreto, e mais uma vez, um desempenho significativamente melhor quando comparado com os sistemas sem o uso da fachada ventilada.

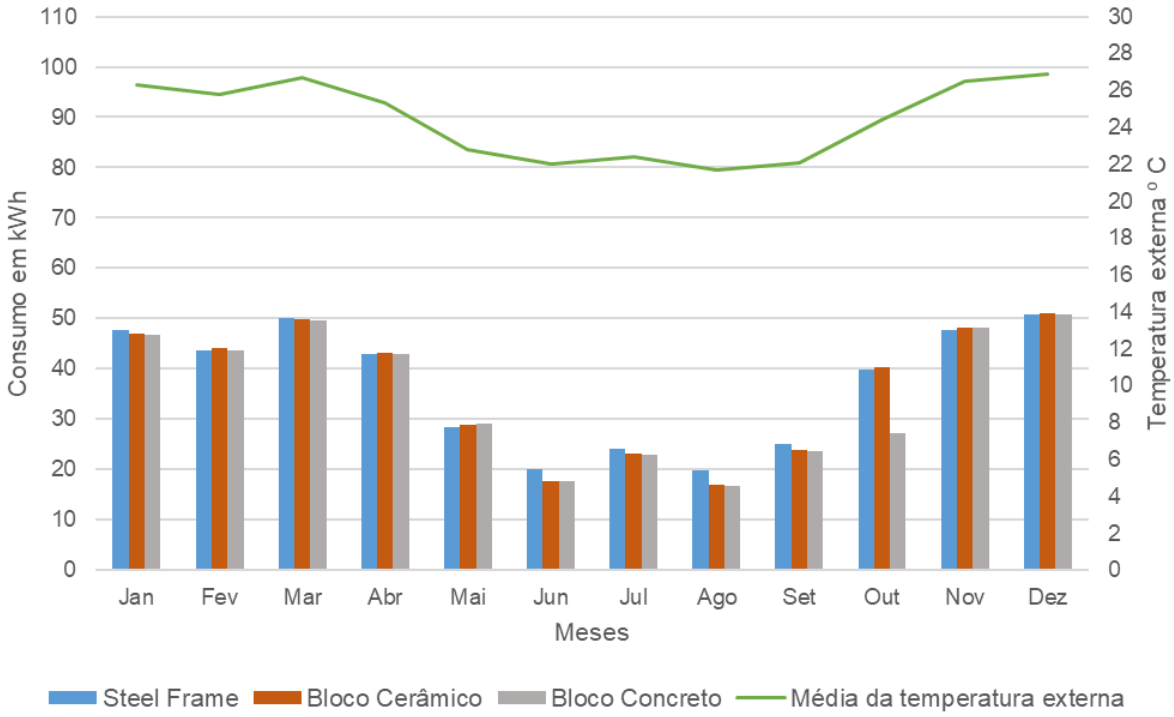
Gráfico 24 - Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para oeste, com fachada ventilada



Fonte: o autor (2020).

Assim como ocorrido no ambiente com apenas o sombreador na abertura, o ambiente com fachada ventilada e abertura voltada para leste, apresentou o segundo melhor desempenho. Novamente, houve um consumo homogêneo ao longo de todo ano (Gráfico 25), o que reforça mais uma vez a eficácia da fachada ventilada na performance energética do ambiente.

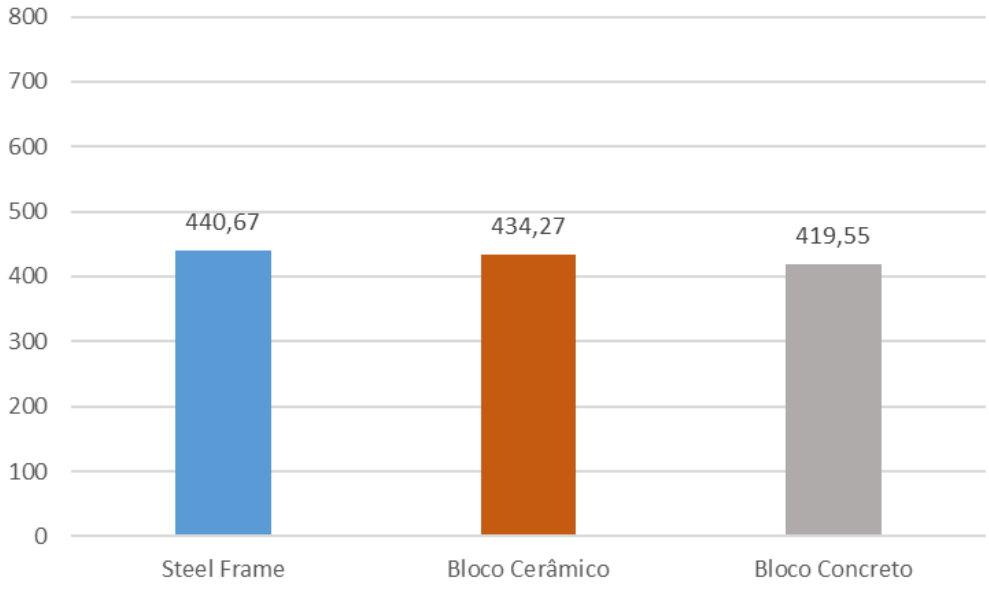
Gráfico 25 - Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para leste, com fachada ventilada



Fonte: o autor (2020).

Para o somatório anual do consumo energético, mais uma vez, o sistema com blocos de concreto se destacou, apresentando um consumo de 419,55 kWh/ano, seguido pelo sistema com bloco cerâmico, com 434,27 kWh/ano, e, com o pior desempenho, o sistema em *steel frame*, com 440,67 kWh/ano (Gráfico 26).

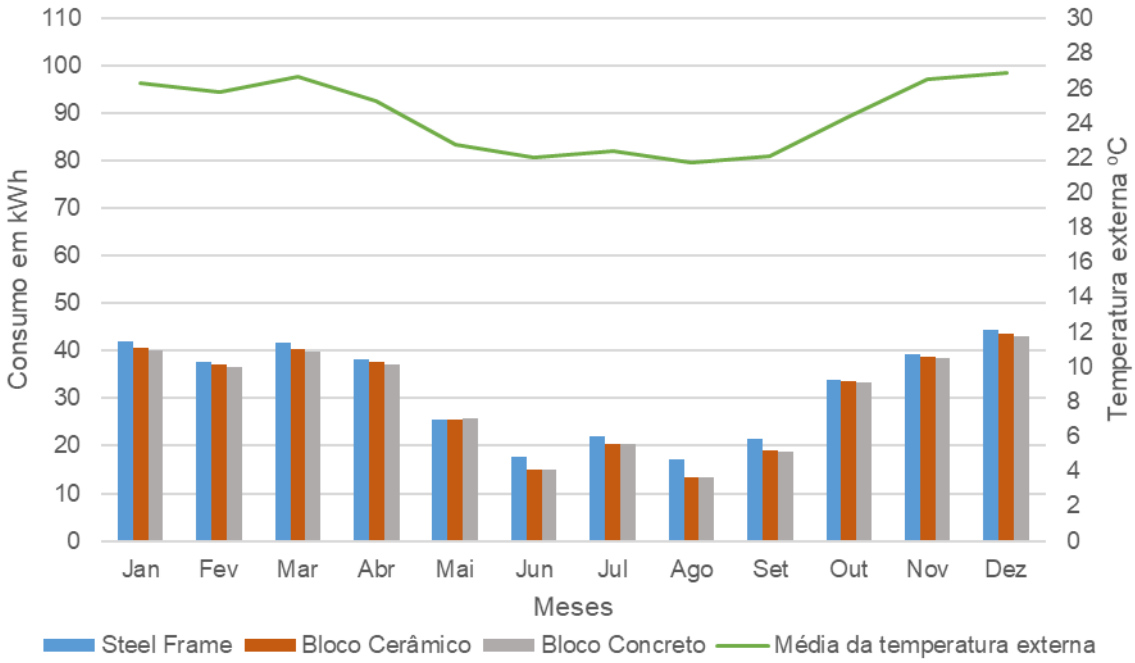
Gráfico 26 - Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para leste, com fachada ventilada



Fonte: o autor (2020).

Por fim, o ambiente com abertura voltada para sul, apresentou o melhor desempenho entre as orientações analisadas. Observou-se em todos os meses analisados um consumo abaixo dos 45 kWh (Gráfico 27), o que representa uma grande diminuição no consumo energético, principalmente quando comparado com os valores apresentados em algumas das primeiras simulações com o ambiente sem sombreador e sem fachada ventilada, por exemplo, que ultrapassavam os 100 kWh/mês de consumo.

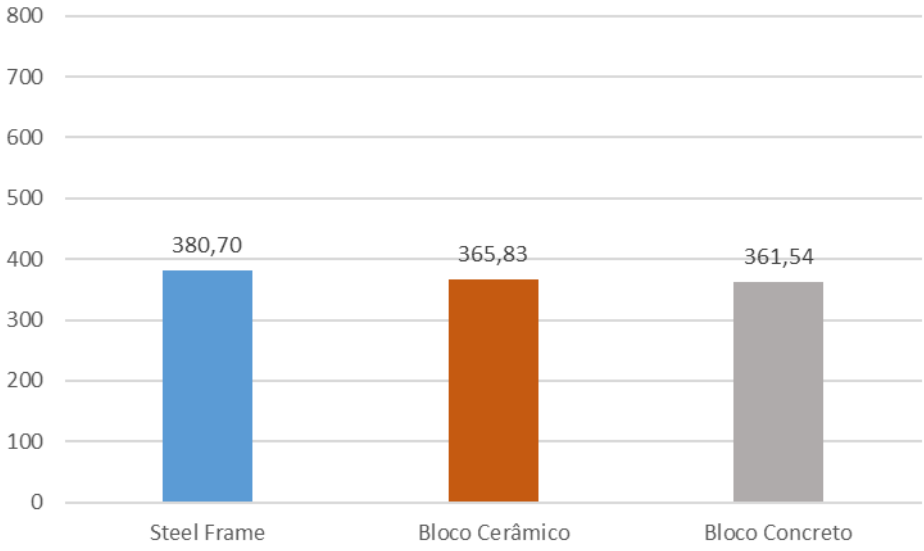
Gráfico 27 - Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para sul, com fachada ventilada



Fonte: o autor (2020).

Já no somatório anual do consumo energético para a orientação sul, foi possível perceber ainda mais a influência da fachada ventilada. O consumo do ambiente, independentemente do sistema construtivo utilizado, ficou abaixo dos 400 kWh/ano (Gráfico 28). Uma diferença muito expressiva quando comparado, por exemplo, com o mesmo ambiente sem o uso da fachada ventilada, que apresentou um consumo entre 550 e 600 kWh/ano considerando os mesmos três sistemas construtivos.

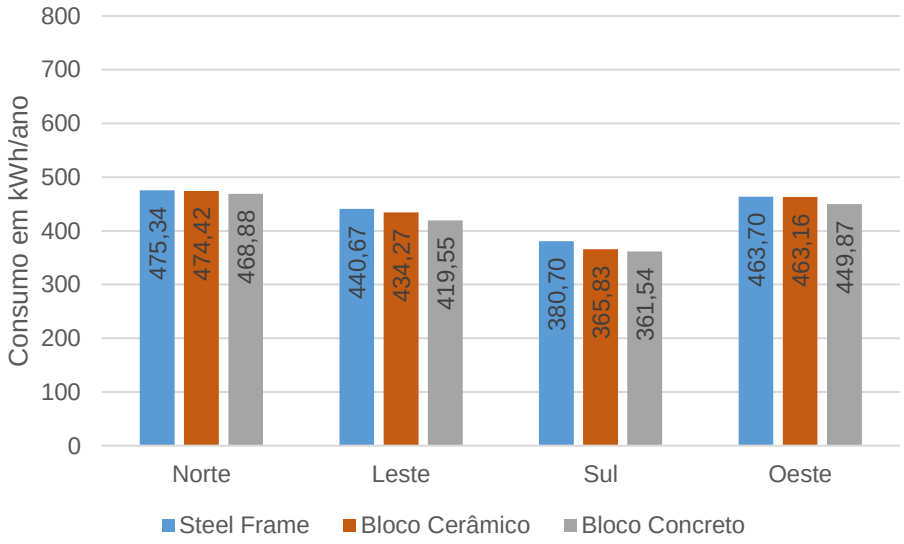
Gráfico 28 - Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para sul, com fachada ventilada



Fonte: o autor (2020).

O Gráfico 29 apresentado a seguir, traz o consumo energético do ambiente ao longo de todo ano, onde foi possível observar claramente, como já mencionado, o melhor desempenho do sistema construtivo com blocos de concreto. Isso ocorreu devido ao total sombreamento das paredes do ambiente e, além disso, a constante troca de ar entre a fachada ventilada e as paredes do ambiente, combinado com a menor capacidade de reter o calor do sistema construtivo em blocos de concreto, graças a sua maior porosidade, o que fez com que o fluxo de calor acumulado dentro do ambiente pudesse ser eliminado com maior facilidade. Isso influenciou diretamente na temperatura interna, diferentemente dos sistemas construtivos em *steel frame* e com blocos cerâmicos, que possuem uma menor transmitância térmica e, consequentemente, retiveram mais calor dentro do ambiente.

Gráfico 29 - Consumo energético ao longo do ano para cada orientação com o uso da fachada ventilada



Fonte: o autor (2020).

4.4 Desempenho energético do ambiente considerando os sistemas construtivos em *steel frame*, bloco cerâmico e bloco de concreto, com o uso da fachada ventilada e com sombreador na abertura.

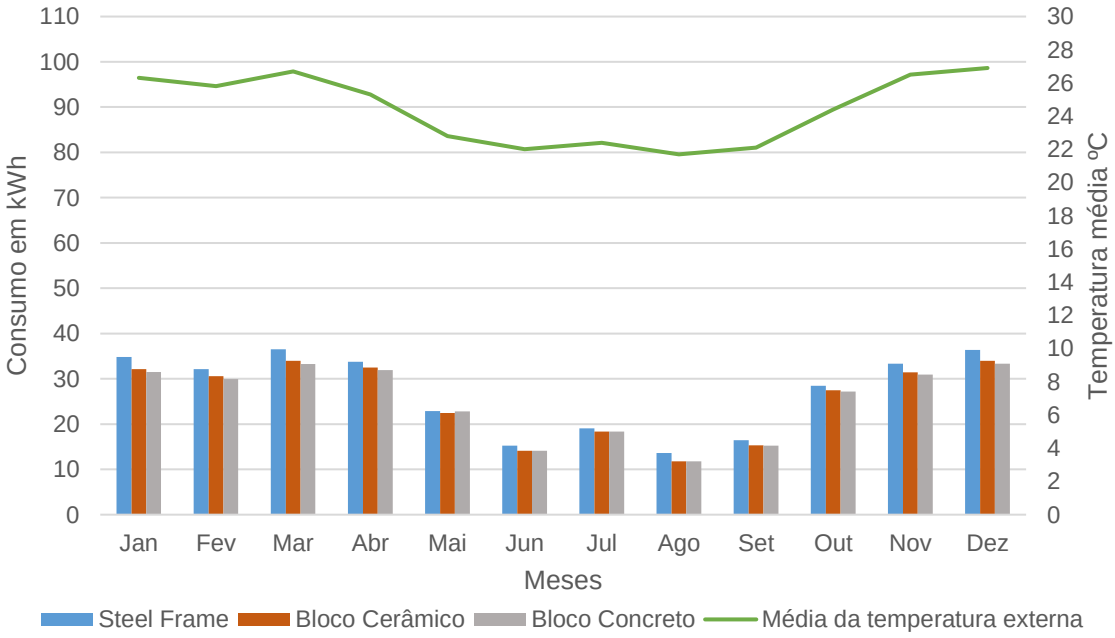
A última situação analisada, foi a combinação dos sistemas construtivos com o uso da fachada ventilada e do sombreador na abertura do ambiente simultaneamente. Os resultados obtidos apresentaram os menores consumos energéticos para todas as orientações, independentemente do tipo de sistema utilizado. Ainda assim, a

orientação norte propiciou o maior consumo, seguida pela orientação oeste, leste e sul.

Em concordância com os resultados encontrados para o ambiente apenas com o uso do sombreador ou da fachada ventilada, a combinação destes elementos propiciou a mesma regularidade nos valores encontrados. Contudo, vale ressaltar, o desempenho dos ambientes com o uso do sistema em *steel frame*, que apresentaram os maiores consumos para todas as orientações analisadas.

A começar pela fachada norte, é possível observar no Gráfico 30, o maior consumo do sistema em *steel frame* para todos os meses do ano, seguido pelo sistema construtivo com blocos cerâmicos e por último, o sistema construtivo com blocos de concreto. Vale destacar, também, que em todos os meses, o consumo energético ficou abaixo dos 40 kWh/mês.

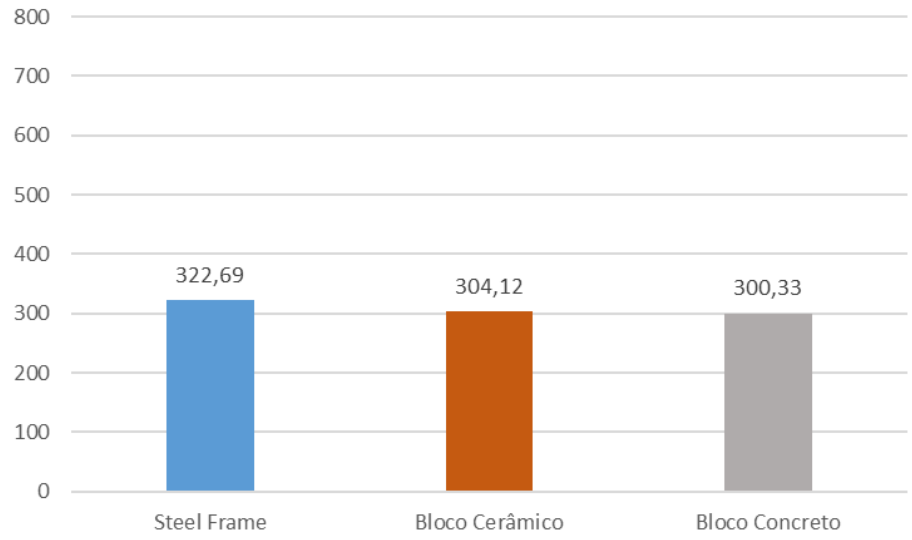
Gráfico 30 - Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para norte, com fachada ventilada e sombreador



Fonte: o autor (2020).

Já no somatório do consumo anual para a orientação norte, o ambiente com o sistema construtivo em blocos de concreto, como previsto diante dos resultados anteriores, apresentou o menor consumo energético, com um total de 300,33 kWh/ano, seguido de perto pelo sistema com blocos cerâmicos com 304,12 kWh/ano, e com o maior consumo, o sistema em *steel frame*, com 322,69 kWh/ano (Gráfico 31).

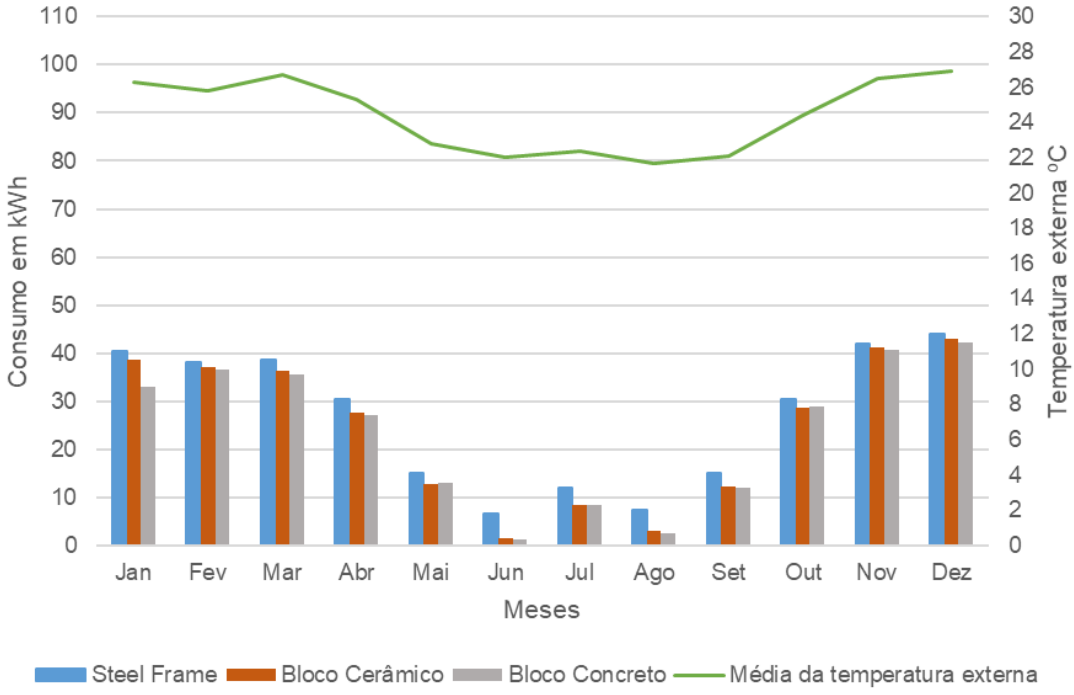
Gráfico 31 - Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para norte com fachada ventilada e sombreador



Fonte: o autor (2020).

Novamente, o ambiente com fachada voltada para oeste apresentou o segundo maior consumo energético (Gráfico 32). Ainda assim, houve alguns picos de consumo que ultrapassaram os 40 kWh/mês, acima do ocorrido com a orientação norte, mas que foram diluídos nos meses mais frios, principalmente em junho, quando o consumo utilizando os sistemas em bloco cerâmicos e blocos de concreto foi quase nulo.

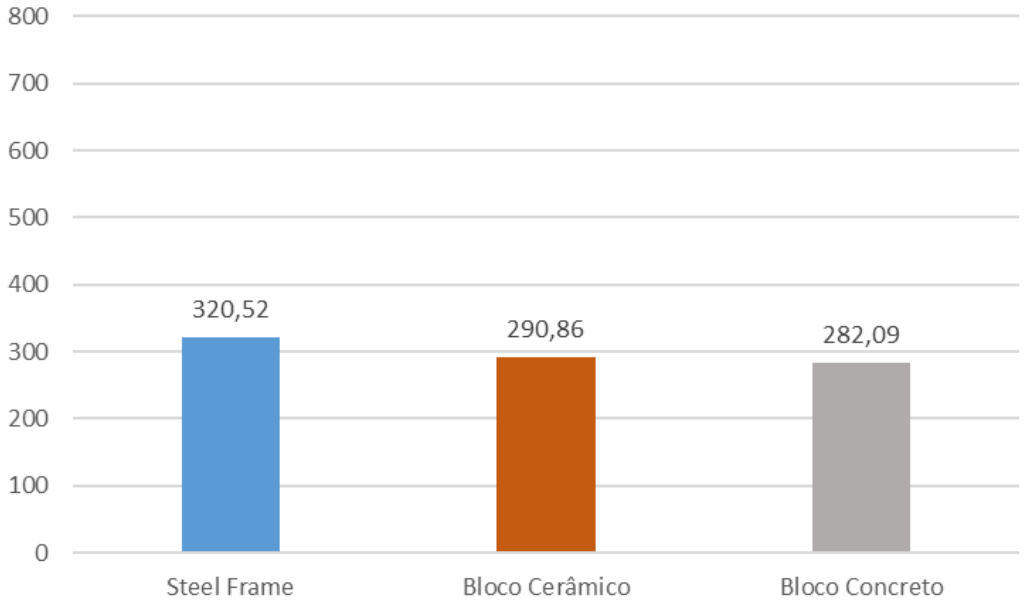
Gráfico 32 - Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para oeste com fachada ventilada e sombreador



Fonte: o autor (2020).

O consumo anual do ambiente voltado para oeste, foi muito próximo ao apresentado para o ambiente voltado para norte, com destaque para o consumo com o uso do sistema construtivo em *steel frame*, que chegou a 320,52 kWh/ano. Já o consumo do sistema construtivo em bloco cerâmico, pela primeira vez no âmbito das simulações, apresentou um consumo abaixo dos 300 kWh/ano, tendo consumido 290,86 kWh/ano. Com o melhor desempenho, o ambiente com sistema construtivo em blocos de concreto, consumiu 282,09 kWh/ano (Gráfico 33).

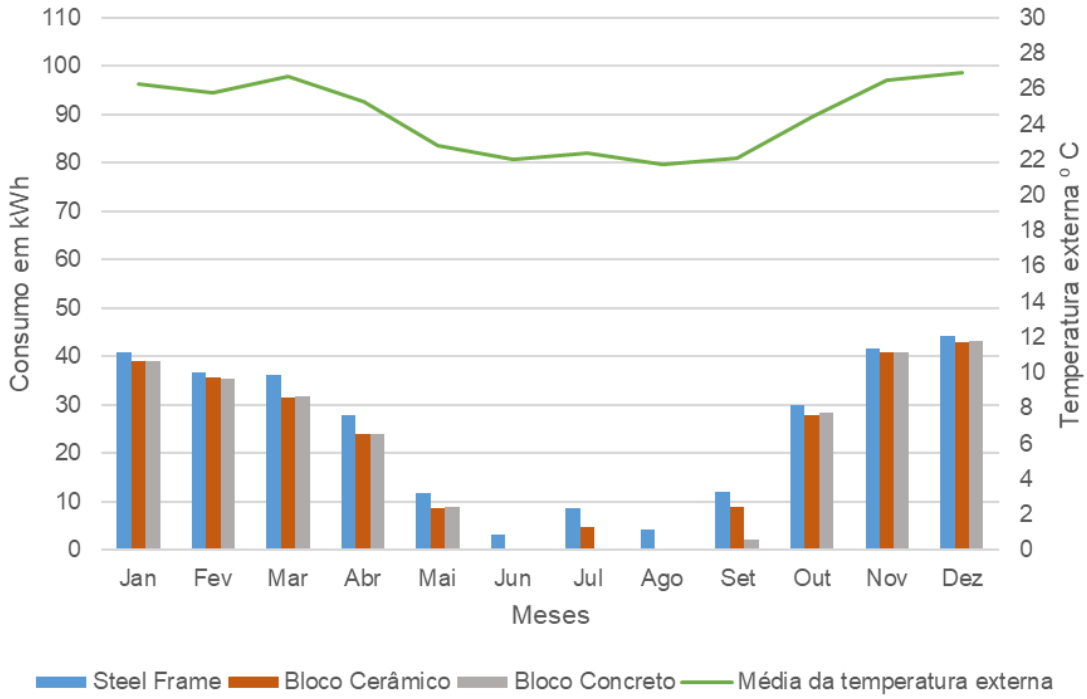
Gráfico 33 - Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para oeste com fachada ventilada e sombreador



Fonte: o autor (2020).

O ambiente voltado para leste, novamente apresentou o segundo menor consumo, e o sistema em *steel frame* continuou apresentando os piores resultados ao longo de todos os meses. Destaca-se, também, o desempenho dos sistemas construtivos em bloco cerâmico e em blocos de concreto nos meses de junho e agosto, que foram nulos, além do mês de julho, onde apenas o sistema construtivo em bloco de concreto não apresentou nenhum consumo (Gráfico 34).

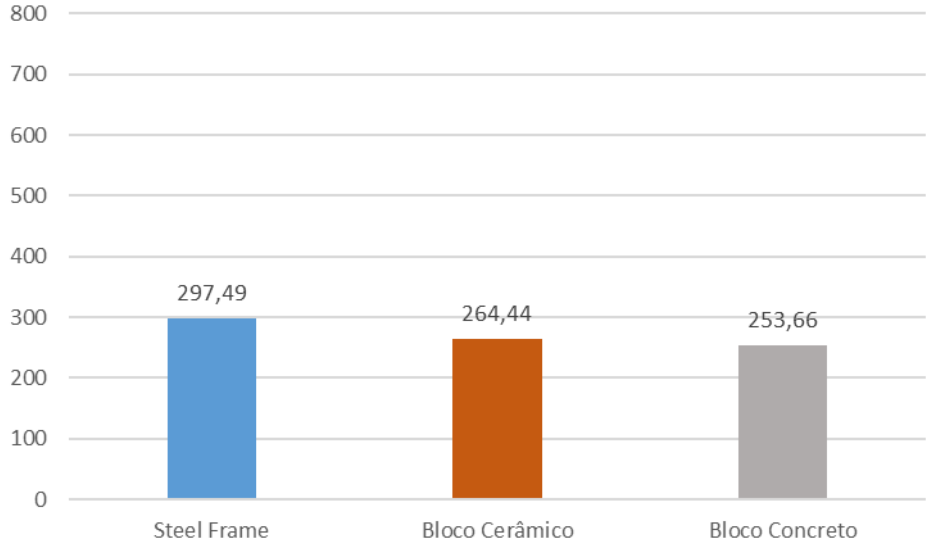
Gráfico 34 - Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para leste com fachada ventilada e sombreador



Fonte: o autor (2020).

Para o somatório do consumo anual, o ambiente com sistema construtivo em bloco de concreto contabilizou um consumo de 253,66 kWh/ano, enquanto que o ambiente com o sistema em bloco cerâmico consumiu 264,44 kWh/ano e, com o pior desempenho, o ambiente com o sistema em *steel frame* consumiu 297,49 kWh/ano, ainda assim, muito abaixo do consumo do mesmo sistema sem o uso da fachada ventilada e do sombreador (Gráfico 35).

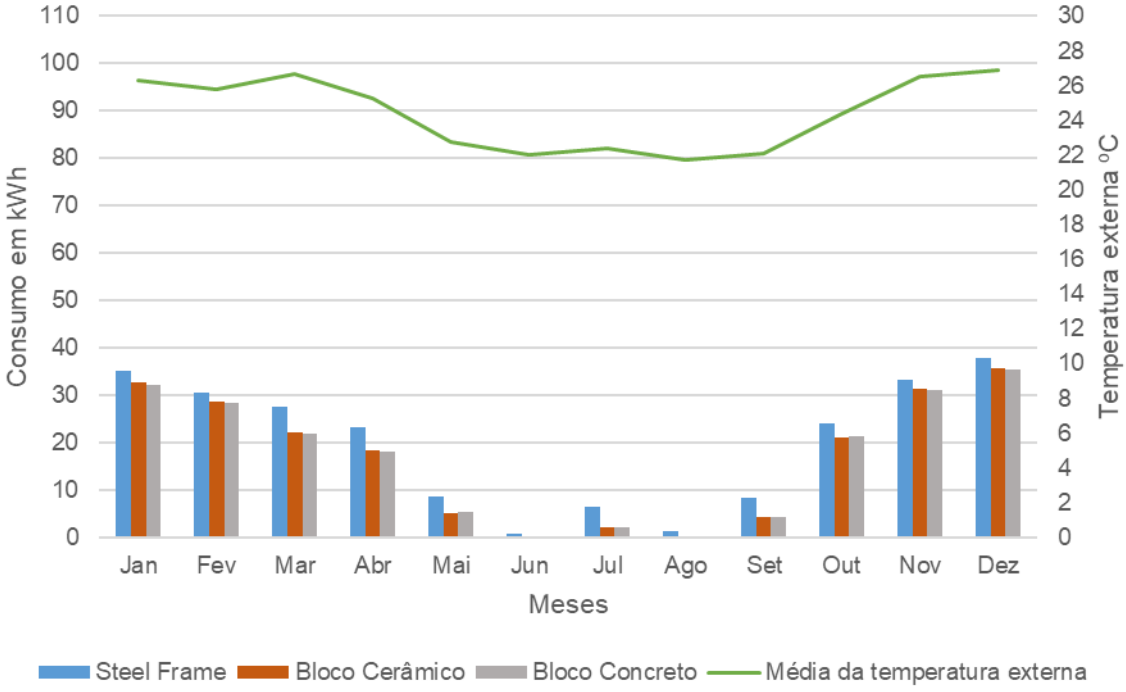
Gráfico 35 - Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para leste com fachada ventilada e sombreador



Fonte: o autor (2020).

Por fim, e assim como em todas as simulações apresentadas, o ambiente com abertura voltada para sul propiciou os melhores resultados entre as orientações analisadas. O ambiente com o sistema construtivo em *steel frame* foi novamente o maior consumidor energético, contudo, nos meses de junho e agosto, seu consumo foi quase nulo. Já os sistemas em bloco cerâmico e blocos de concreto, mantiveram a mesma homogeneidade dos resultados anteriores, inclusive, apresentaram um consumo nulo nos meses de junho e agosto, como ocorrido para a orientação leste (Gráfico 36).

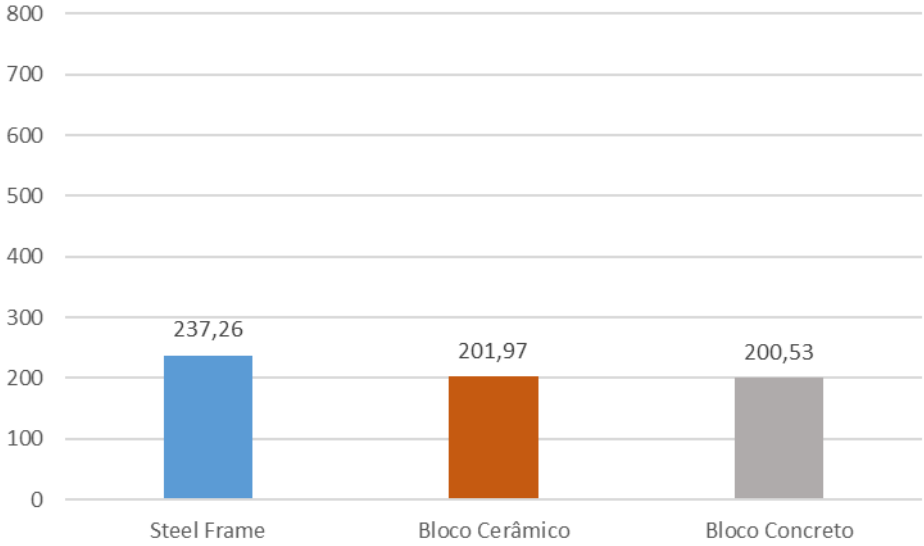
Gráfico 36 - Consumo energético mensal do ambiente com abertura voltada para sul, com fachada ventilada e sombreador



Fonte: o autor (2020).

Já o somatório do consumo energético para o ambiente com abertura voltada para sul com o uso do sombreador e da fachada ventilada, como previsto nos resultados anteriores, apresentou os menores consumos, considerando todas as situações analisadas. O ambiente com o sistema construtivo em bloco de concreto consumiu 200,53 kWh/ano, enquanto que o sistema em bloco cerâmico apresentou um consumo de 201,97 kWh/ano e, mais uma vez, o sistema em *steel frame* apresentou o maior consumo, totalizando 237,26 kWh/ano (Gráfico 37).

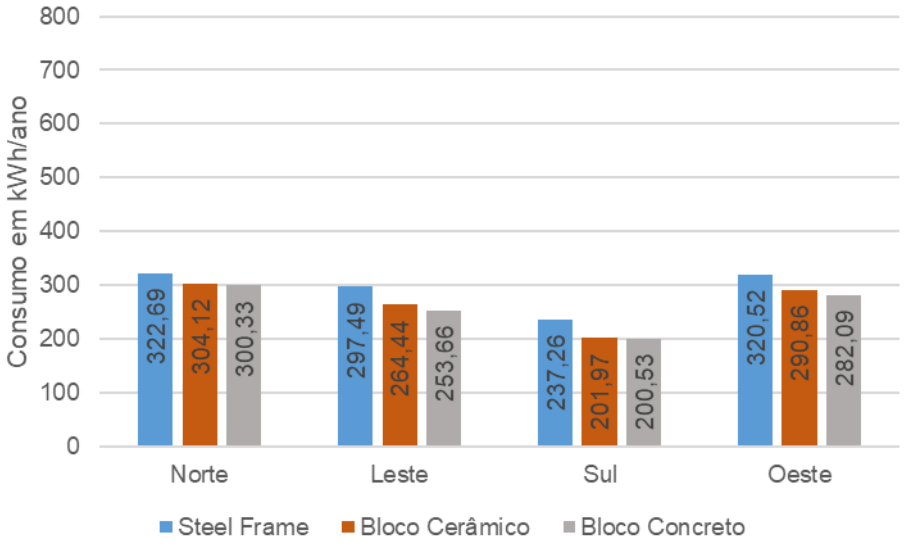
Gráfico 37 - Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para sul, com fachada ventilada e sombreador



Fonte: o autor (2020).

Na comparação do consumo anual para cada orientação, apresentada no Gráfico 38, foi possível observar uma maior discrepância no consumo energético do ambiente com o uso do sistema construtivo em *steel frame*, que se destaca em relação aos outros dois sistemas. Já o comportamento dos sistemas em bloco cerâmico e bloco de concreto são similares, apresentando um consumo aproximado entre eles ao longo de todo ano. Esse aspecto reforça a benéfica influência da maior transmitância térmica de ambos os sistemas, quando utilizados em conjunto com a fachada ventilada.

Gráfico 38 - Consumo energético ao longo do ano para cada orientação com o uso da fachada ventilada e do sombreador



Fonte: o autor (2020).

Como o ambiente foi totalmente sombreado por meio da fachada ventilada e do sombreador na abertura, o calor gerado dentro do ambiente foi um fator de grande

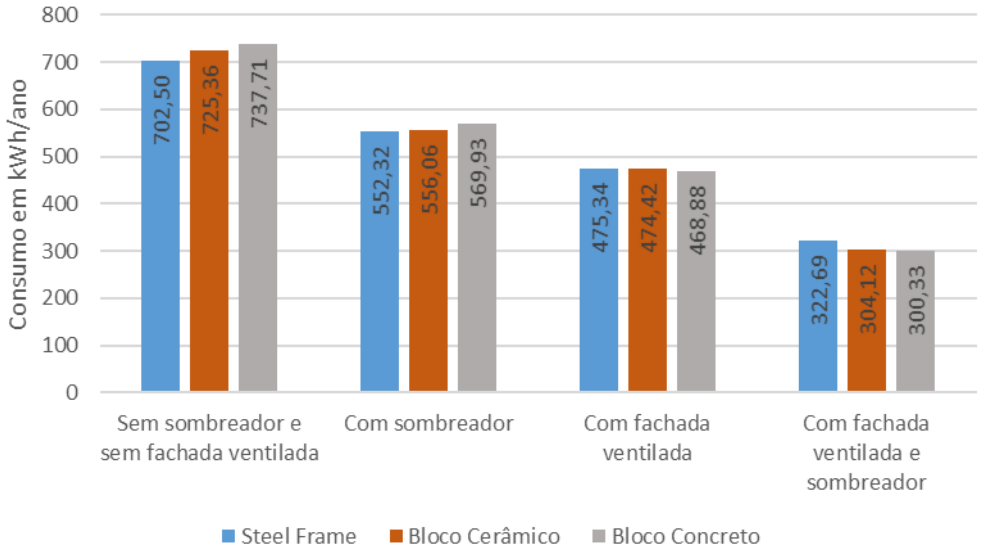
relevância para a obtenção do pior desempenho do sistema em *steel frame*, considerando que devido ao melhor isolamento térmico, ocorre redução das trocas de ar entre o ambiente interno e externo. Diferentemente do ocorrido nos ambientes que não utilizaram a fachada ventilada, nestes casos, a menor transmitância térmica do sistema construtivo em *steel frame* manteve as temperaturas internas mais amenas, o resultou em um menor consumo energético. Ainda assim, ressalta-se a importante e significante diminuição no consumo energético, considerando todas orientações e todos os sistemas construtivos avaliados em conjunto com a fachada ventilada e o sombreador na janela.

4.5 Análise individual do desempenho energético do ambiente considerando todas as variáveis simuladas de acordo com cada orientação

Com o somatório do consumo anual do ambiente para todas situações analisadas e para todas orientações, foi observado individualmente a influência de cada orientação no desempenho energético, considerando o ambiente sem sombreador e sem fachada ventilada, apenas com sombreador, apenas com a fachada ventilada, e por fim, com o uso do sombreador e da fachada ventilada simultaneamente.

A primeira orientação analisada foi a norte, que apresentou o pior desempenho. As simulações sem o uso do sombreador e sem a fachada ventilada apresentaram o maior consumo energético, seguida pela simulação com sombreador. Já a simulação com a fachada ventilada apresentou o segundo menor consumo, ficando atrás apenas do desempenho da combinação que utilizou a fachada ventilada e o sombreador, como demonstrado no Gráfico 39.

Gráfico 39 - Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para Norte considerando todas variáveis simuladas.



Fonte: o autor (2020).

Observou-se uma considerável diminuição no consumo energético quando se utilizou o sombreador, a fachada ventilada, e, principalmente, a combinação de ambos simultaneamente. A Tabela 9, demonstra o percentual de diminuição para cada estratégia simulada, tendo sempre como base para os cálculos a situação onde não foi utilizado nem sombreador nem a fachada ventilada, ou seja, a pior situação. Destaca-se, também, que apesar de pequena, ocorreu a maior redução percentual no consumo energético para o sistema construtivo com o bloco de concreto, especificamente após a inserção da fachada ventilada.

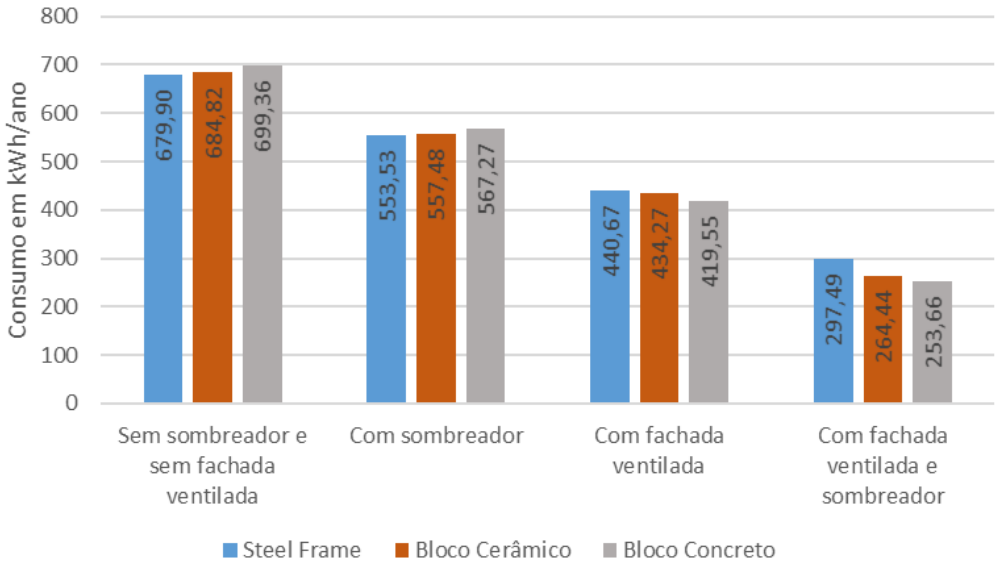
Tabela 9 - Percentual de redução do consumo energético para a orientação norte, considerando cada estratégia simulada

Orientação Norte	Consumo sem sombreador e sem fachada ventilada (kWh/ano)	Percentual de redução		
		Com sombreador	Com fachada ventilada	Com fachada ventilada e sombreador
Steel Frame	702,50	-22%	-32%	-54%
Bloco Cerâmico	725,36	-23%	-34%	-58%
Bloco Concreto	737,71	-22%	-36%	-59%

Fonte: o autor (2020).

O segundo pior desempenho do ambiente analisado foi em relação a orientação leste. Observou-se, mais uma vez, que o ambiente sem o uso da fachada ventilada e do sombreador ocasionou o pior desempenho para todos os sistemas de paredes analisados, como apresentado no Gráfico 40.

Gráfico 40 - Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para leste, considerando todas variáveis simuladas.



Fonte: o autor (2020).

Para melhor mensurar o desempenho do ambiente voltado para leste, é possível observar, por meio da Tabela 10, a redução do consumo energético deste ambiente quando comparado com a pior situação. Destaca-se uma menor redução em relação ao uso do sombreador quando comparado com a orientação norte (- 22%). Em contrapartida, o uso da fachada ventilada propiciou uma maior redução em relação à orientação norte, com destaque para o sistema construtivo em blocos de concreto, que alcançou uma redução no consumo de 64%, contra 59% da obtida para a orientação norte.

Tabela 10 - Percentual de redução do consumo energético para a orientação leste, considerando cada estratégia simulada

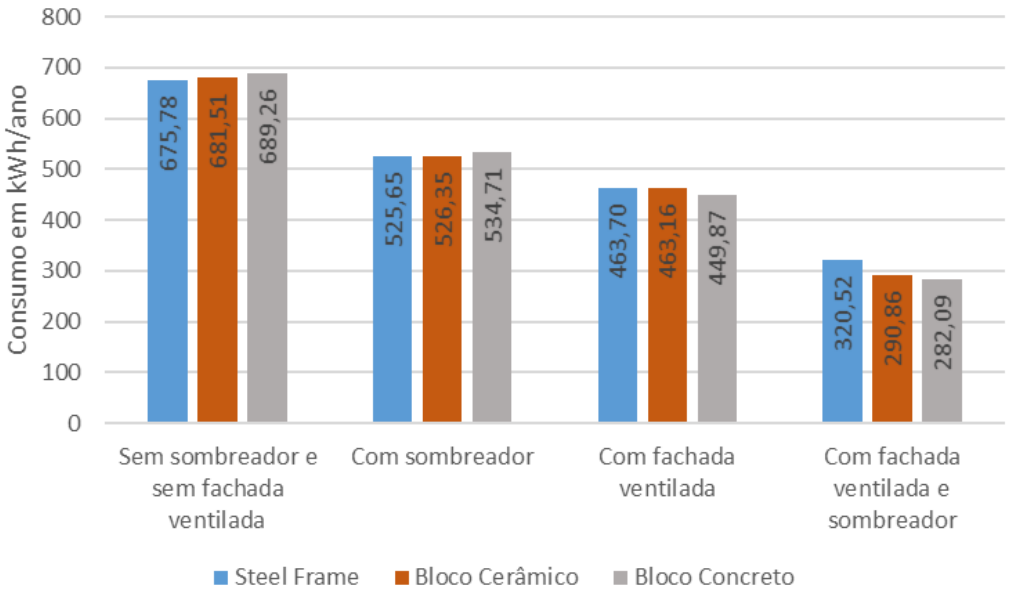
Orientação Leste	Consumo sem sombreador e sem fachada ventilada (kWh/ano)	Percentual de redução		
		Com sombreador	Com fachada ventilada	Com fachada ventilada e sombreador
Steel Frame	679,90	-19%	-35%	-56%
Bloco Cerâmico	684,82	-19%	-37%	-61%
Bloco Concreto	699,36	-19%	-40%	-64%

Fonte: o autor (2020).

Já em relação a orientação oeste, o desempenho do ambiente foi similar ao da orientação leste. Ainda assim, apresentou um menor consumo para a situação onde não foi adotado nem o sombreador nem a fachada ventilada, e também para a situação onde foi considerado apenas o uso do sombreador. Para as simulações com

o uso da fachada ventilada e com a combinação da fachada ventilada e do sombreador, a orientação oeste apresentou um maior consumo quando comparada com a orientação leste. Isso ocorreu devido a menor incidência solar que incide sobre a fachada sul. Quando se adicionou a fachada ventilada, o sistema em *steel frame* reteve ainda mais o calor do ambiente, o que resultou em um maior consumo por parte deste sistema, como demonstrado no Gráfico 41.

Gráfico 41 - Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para oeste considerando todas variáveis simuladas.



Fonte: o autor (2020).

Para analisar de maneira mais precisa o potencial de redução do consumo do ambiente voltado para oeste, foi detalhado na Tabela 11, o percentual de redução do consumo energético para cada estratégia simulada. Assim como visto anteriormente, o maior efeito causado foi pela combinação do uso da fachada ventilada com o sombreador. O percentual de redução para esta situação chegou próximo dos 60% de economia, demonstrando sua relevância no desempenho energético do ambiente.

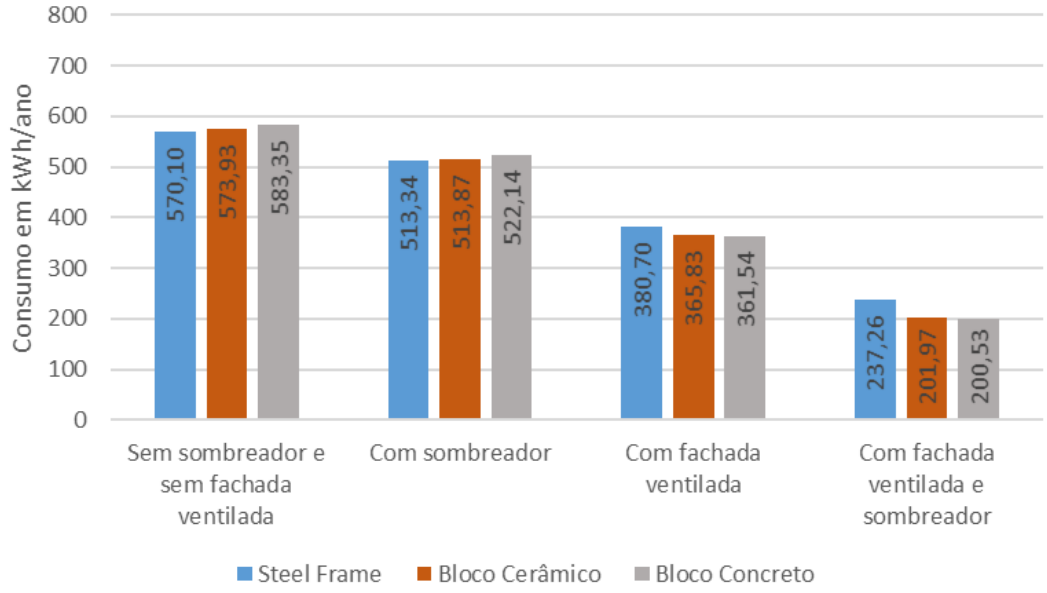
Tabela 11 - Percentual de redução do consumo energético para a orientação oeste para cada estratégia simulada

Orientação Oeste	Consumo sem sombreador e sem fachada ventilada (kWh/ano)	Percentual de redução		
		Com sombreador	Com fachada ventilada	Com fachada ventilada e sombreador
Steel Frame	675,78	-22%	-31%	-53%
Bloco Cerâmico	681,51	-22%	-32%	-57%
Bloco Concreto	689,26	-22%	-35%	-59%

Fonte: o autor (2020).

Por último, e como apresentado nas outras simulações, o ambiente voltado para sul mais uma vez obteve o menor consumo energético ao longo de todo ano. Seu comportamento seguiu o padrão apresentado para o ambiente com orientação voltada para oeste, porém, seu consumo foi ainda menor. Destaca-se também, o desempenho do ambiente com o uso da fachada ventilada e do sombreador, que apresentou um consumo abaixo de 240 kWh/ano para todos os sistemas construtivos analisados (Gráfico 42).

Gráfico 42 - Consumo energético anual do ambiente com abertura voltada para sul considerando todas variáveis simuladas.



Fonte: o autor (2020).

Apesar de ter apresentado a maior redução no consumo energético, quando implementado o sombreador no ambiente com abertura voltada para sul, observou-se o menor percentual de redução entre os valores até então encontrados, ou seja, de apenas 10%. Isso ocorreu pelo fato de a orientação sul já ser uma condição privilegiada em relação a incidência solar, o que minimizou o impacto do sombreador. Entretanto, com a implantação da fachada ventilada e do sombreador, este ambiente apresentou uma economia de 66% em relação ao ambiente sem sombreador e sem fachada ventilada (Tabela 12). Isso ocorreu, principalmente, pela significativa diminuição do consumo nos meses de março e dezembro, meses que apresentaram o maior consumo ao longo dos doze meses analisados para todas as situações analisadas.

Tabela 12 - Percentual de redução do consumo energético para a orientação sul para cada estratégia simulada

Orientação Sul	Consumo sem sombreador e sem fachada ventilada (kWh/ano)	Percentual de redução		
		Com sombreador	Com fachada ventilada	Com fachada ventilada e sombreador
Steel Frame	570,10	-10%	-33%	-58%
Bloco Cerâmico	573,93	-10%	-36%	-65%
Bloco Concreto	583,35	-10%	-38%	-66%

Fonte: o autor (2020).

4.6 Gastos finais em moeda corrente (R$) para resfriar o ambiente analisado com o uso do aparelho condicionador de ar com base no consumo anual do ambiente para cada orientação

Para o cálculo do consumo energético em reais, utilizou-se o consumo energético mensal do aparelho condicionador de ar para refrigerar o ambiente, considerando que o somatório destes valores (R$) resulta no custo anual para cada orientação. Como já demonstrado anteriormente, o ambiente sem sombreador e sem o uso da fachada ventilada foi responsável pelo maior consumo; já o ambiente com o uso da fachada ventilada e o sombreador apresentou o menor consumo energético e, consequentemente, o menor custo.

Para a orientação norte, o maior valor gasto foi com o sistema construtivo em blocos de concreto – quando não usado o sombreador nem a fachada ventilada –, com um custo de R$ 552,60 reais por ano, contudo, este mesmo sistema com a utilização da fachada ventilada e do sombreador foi responsável, também, pelo menor custo, com um valor de R$ 226,56 (Tabela 13).

Tabela 13 - Custo em (R$) reais para refrigeração do ambiente voltado para a orientação norte, considerando cada variável simulada

Orientação Norte	Gasto em R$ por ano para refrigeração do ambiente			
	Sem sombreador e sem fachada ventilada	Com sombreador	Com fachada ventilada	Com fachada ventilada e sombreador
Steel Frame	526,35	410,55	357,91	242,12
Bloco Cerâmico	543,36	418,38	358,61	228,21
Bloco Concreto	552,60	431,02	353,66	226,56

Fonte: o autor (2020).

Em relação aos custos financeiros com a refrigeração do ambiente com abertura voltada para leste, mais uma vez o sistema construtivo com blocos de concreto foi responsável pelo maior e também pelo menor consumo, com um custo de R$523,62 e R$188,50 anuais, respectivamente (Tabela 14).

Tabela 14 -Custo em (R$) reais para refrigeração do ambiente voltado para a orientação leste, considerando cada variável simulada

Orientação Leste	Gasto em R$ por ano para refrigeração do ambiente			
	Sem sombreador e sem fachada ventilada	Com sombreador	Com fachada ventilada	Com fachada ventilada e sombreador
Steel Frame	509,23	412,47	330,99	224,06
Bloco Cerâmico	512,74	415,31	323,02	199,96
Bloco Concreto	523,62	424,13	314,17	188,50

Fonte: o autor (2020).

No ambiente com abertura voltada para fachada oeste, houve um maior gasto em relação ao ambiente com abertura voltada para leste, especificamente para os ambientes com fachada ventilada e também para os que utilizaram a fachada ventilada e o sombreador.

Destaca-se o ambiente com sistema construtivo em *steel frame* e fachada ventilada, com um custo anual de R$349,22, e para o ambiente com sistema construtivo em blocos de concreto, fachada ventilada e sombreador, que apresentou um custo de R$211,57 (Tabela 15), sendo esse o menor valor gasto para esta orientação. Ainda assim, o resultado obtido foi maior do que o observado no ambiente voltado para leste com o uso da fachada ventilada e do sombreador (R$188,50).

Tabela 15 - Custo em (R$) reais para refrigeração do ambiente voltado para a orientação oeste considerando cada variável simulada

Orientação Oeste	Gasto em R$ por ano para refrigeração do ambiente			
	Sem sombreador e sem fachada ventilada	Com sombreador	Com fachada ventilada	Com fachada ventilada e sombreador
Steel Frame	506,13	394,78	349,22	237,88
Bloco Cerâmico	510,24	392,88	346,96	219,40
Bloco Concreto	516,03	402,50	335,41	211,57

Fonte: o autor (2020).

Por fim, na fachada sul, observou-se o menor custo para refrigerar o ambiente simulado em todas as situações analisadas. Mais uma vez, o sistema construtivo com blocos de concreto sem sombreador e sem o uso da fachada ventilada foi responsável pelo maior custo com a refrigeração do ambiente, resultando em R$ 436,61 de gastos ao longo do ano. Por sua vez, o mesmo sistema construtivo com o uso da fachada ventilada e do sombreador apresentou o menor custo entre todas simulações realizadas, R$ 148,44, gastos ao longo dos doze meses simulados (Tabela 16).

Tabela 16 - Custo em (R$) reais para refrigeração do ambiente voltado para a orientação sul considerando cada variável simulada

Orientação Sul	Gasto em R$ por ano para refrigeração do ambiente			
	Sem sombreador e sem fachada ventilada	Com sombreador	Com fachada ventilada	Com fachada ventilada e sombreador
Steel Frame	426,91	384,21	286,02	179,30
Bloco Cerâmico	429,57	386,61	274,92	150,34
Bloco Concreto	436,61	392,94	270,69	148,44

Fonte: o autor (2020).

Para sintetizar os resultados, a Tabela 17 apresenta uma compilação das simulações realizadas com os resultados dos consumos energéticos (kWh/ano) e seus respectivos gastos (R$). Destacou-se, também, o maior consumo (em vermelho) e o menor (em verde) para as estratégias que apresentaram os maiores e menores valores para cada orientação analisada.

Tabela 17 - Síntese com o somatório anual das simulações analisadas.

(continua)

Orientações	Estratégias	Sistemas Construtivos					
		Steel Frame		B. Cerâmico		B. Concreto	
		kWh/ano	R$/ano	kWh/ano	R$/ano	kWh/ano	R$/ano
Norte	Sem Sombreador e F. Ventilada	702,50	526,35	725,36	543,36	737,71	552,60
	Com Sombreador	552,32	410,55	556,06	418,38	569,93	431,02
	Com F. Ventilada	475,34	357,91	474,42	358,61	468,88	353,66
	Com F. Ventilada e Sombreador	322,69	242,12	304,12	228,21	300,33	226,56
Leste	Sem Sombreador e F. Ventilada	679,90	509,23	684,82	512,74	699,36	523,62
	Com Sombreador	553,53	412,47	557,48	415,31	567,27	424,13
	Com F. Ventilada	440,67	330,99	434,27	323,02	419,55	314,17
	Com F. Ventilada e Sombreador	297,49	224,06	264,44	199,96	253,66	188,50

(conclusão)

Sul	Sem Sombreador e F. Ventilada	570,10	426,91	573,93	429,57	583,35	436,61
	Com Sombreador	513,34	384,21	513,87	386,61	522,14	392,94
	Com F. Ventilada	380,70	286,02	365,83	274,92	361,54	270,69
	Com F. Ventilada e Sombreador	237,26	179,30	201,97	150,34	200,53	148,44
Oeste	Sem Sombreador e F. Ventilada	675,78	506,13	681,51	510,24	689,26	516,03
	Com Sombreador	525,65	394,78	526,35	392,88	534,71	402,50
	Com F. Ventilada	463,70	349,22	463,16	346,96	449,87	335,41
	Com F. Ventilada e Sombreador	320,52	237,88	290,86	219,40	282,09	211,57

Fonte: o autor (2020).

Destaca-se que para todas as orientações, os valores extremos foram observados para a estratégia sem sombreador e sem fachada ventilada (pior performance), e para a estratégia com fachada ventilada e sombreador (melhor performance). Para a orientação Norte, por exemplo, a estratégia sem sombreador e sem fachada ventilada, apresentou os piores resultados, entre estes, o menor consumo foi do sistema em *steel frame* (702,50 kWh/ano); já o sistema em blocos de concreto apresentou o maior consumo (737,71 kWh/ano). Em relação ao melhor desempenho (com fachada ventilada e sombreador) entre todas as estratégias analisadas para a orientação Norte, o sistema construtivo em *steel frame* apresentou o maior consumo (322,69 kWh/ano), e, o sistema construtivo em blocos de concreto, o menor (300,33 kWh/ano).

CONCLUSÕES

5 CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados obtidos por meio das simulações computacionais, concluiu-se que o ambiente que utilizou tanto o sistema construtivo em *steel frame*, como o sistema com blocos cerâmicos e com blocos de concreto, sem o uso do sombreador na abertura do ambiente e sem o uso da fachada ventilada, apresentou o maior consumo energético em todas as orientações analisadas, com destaque para a orientação norte onde o consumo anual superou os 700 kWh para todos sistemas construtivos considerados.

Este comportamento repetiu-se para o ambiente simulado apenas com o sombreador na abertura. Esta situação apresentou um melhor desempenho, mas ainda assim, foi o segundo maior consumo observado em todas as orientações, com um valor médio acima dos 500 kWh/ano. Contudo, vale ressaltar, a importância do sombreador na abertura do ambiente, o que influenciou diretamente na minimização do consumo energético de todos ambientes simulados, apresentando uma economia que chegou a 22% para os ambientes com abertura voltada para oeste.

Isso demonstra a forte influência da incidência solar proveniente da orientação oeste, no desempenho energético do ambiente, como também destacado na pesquisa de Chro e Istvan (2017). Comprova, mais uma vez, os benefícios do uso de sombreadores nas aberturas dos ambientes, como já demonstrado por Pacheco, Ordonez e Martinez (2012); Bellia, De Falco e Minichiello (2013); Balogun, Morakinyo e Adegun (2014); Taleb, (2014); Nico-Rodrigues (2015); Kistelegdi, Radha e Balint (2019).

Destaca-se que em ambos os cenários – com sombreador, e sem sombreador e sem fachada ventilada –, o ambiente com o sistema construtivo em *steel frame* apresentou o menor consumo, em contrapartida, o ambiente com blocos de concreto foi responsável pelo pior desempenho.

Ambas as situações descritas, ocorreram nos ambientes onde não foi considerado o uso da fachada ventilada. Isso justifica o melhor desempenho do sistema em *steel frame*, assim como o maior consumo do ambiente com blocos de concreto. Devido à baixa transmitância térmica do sistema em *steel frame* e seu melhor isolamento térmico, o ambiente apresentou temperaturas mais amenas, o que resultou em um menor consumo energético. Ao mesmo tempo, o sistema com blocos de concreto, que

tem a maior transmitância térmica entre os sistemas avaliados, obteve os piores resultados. Isso reforça a relevância de uma baixa transmitância térmica nas paredes que envolvem as edificações, como observado nas pesquisas de Stefanovic e Gordic (2016); Pekdogan e Basaran (2017); Labihi *et al.* (2017); Meng *et al*. (2018); e Souayfane *et al.* (2019).

Já em relação ao ambiente simulado com o uso da fachada ventilada e sem o uso do sombreador, observou-se uma mudança na influência dos materiais construtivos no consumo energético do ambiente. Para esta situação, e em todas as orientações analisadas, o ambiente com *steel frame* apresentou o maior consumo energético. Por sua vez, o ambiente com blocos de concreto foi o mais eficiente. Esta mudança na ordem do sistema mais eficiente em relação aos ambientes sem o uso da fachada ventilada, reforça a importância e a influência do sombreamento na envoltória do ambiente, que apresentou uma grande redução no consumo energético, variando entre 31 e 35% para a orientação oeste, 32 e 36% para a norte, 33 e 38% para a sul, e 35 e 40%, para a leste.

Este melhor desempenho foi ainda mais impactante no ambiente que utilizou a fachada ventilada e o sombreador na abertura simultaneamente. Para esta situação, foi observado o menor consumo energético em todas as orientações simuladas, com destaque para o sistema construtivo em bloco de concreto que alcançou uma economia de 66% para a orientação sul.

Os resultados encontrados para o ambiente com o uso da fachada ventilada e do sombreador reforçam, mais uma vez, a importância do sombreamento da envoltória no consumo energético das edificações situadas nas regiões de clima quente, como constatado também nas pesquisas de Haase e Amato (2009); Way, Zhao e Chen (2010); Lucchino e outros (2019); e Blanco e outros (2019).

Salienta-se, ainda, o fato da maior transmitância térmica do sistema construtivo em blocos de concreto, que quando utilizado em conjunto com a fachada ventilada, teve seu desempenho favorecido frente aos sistemas construtivos com menor transmitância térmica. Esse resultado vai contra o discurso generalista de que sistemas construtivos com maior transmitância térmica não são ideias para ambientes situados em regiões de clima quente. A pesquisa demonstrou que mesmo sistemas construtivos tradicionais, considerados menos eficazes, quando utilizados em

conjunto com estratégias passivas de resfriamento, podem ser altamente eficientes na obtenção de redução do consumo energético dos ambientes.

Em relação ao valor gasto com o uso do aparelho condicionador de ar para a refrigeração do ambiente simulado – considerando todas as variáveis –, entre a situação que apresentou o maior custo (norte, bloco de concreto, sem sombreador e sem fachada ventilada, R$ 552,60/ano) e a que foi mais econômica (sul, bloco de concreto, fachada ventilada e sombreador, R$ 148,44/ano), observou-se uma economia de R$ 404,16/ano, o que reforça mais a importância da busca da eficientização energética dos edifícios residenciais. Desta forma, e ainda que aos poucos, os expressivos impactos causados pelo setor da construção civil demonstrados no início desta pesquisa, poderão ser minimizados, não apenas no âmbito ambiental, mas também no econômico.

Os resultados obtidos, numa avaliação preliminar, podem gerar a equivocada ideia de pouca relevância. No entanto, vale lembrar que os valores encontrados referem-se, especificamente, para um ambiente de 12,82 m^2, que quando escalados para o âmbito da residência; do edifício com 10 pavimentos e 10 unidades por pavimento; do eventual conjunto habitacional; e dos muitos edifícios semelhantes no país, esses valores tornam-se efetivamente significativos.

5.1 Limitações da pesquisa

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, foram observados alguns entraves, vencidos ao longo da pesquisa, mas que dificultaram o alcance dos objetivos traçados, tais como:

- A disponibilidade de um maior número de referências que tratavam de simulações computacionais para fachadas ventiladas com o *software* EnergyPlus;
- A correta configuração do *software* para que o ambiente analisado sofresse influência apenas das fachadas que o circundavam;
- A definição de um modelo de edifício que fosse representativo para a região onde as simulações foram realizadas; e
- Uma maior variedade de pesquisas que analisaram a influência da fachada ventilada em conjunto com diferentes sistemas construtivos, visto que a maior

parte das pesquisas analisadas ao longo da revisão bibliográfica tratavam especificamente da influência da fachada ventilada, desconsiderando o sistema construtivo das paredes.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com base nas limitações do trabalho e por observações relacionadas ao tema da pesquisa ao longo do desenvolvimento da mesma, foi possível elencar algumas sugestões para trabalhos futuros, a seguir descritas:

- Simular as mesmas paredes utilizadas nesta pesquisa variando sua espessura para identificar sua maior eficiência;
- Avaliar o custo benefício da implementação das estratégias consideradas mais eficientes nesta pesquisa;
- Analisar a influência de outros sistemas construtivos no desempenho térmico dos ambientes, como paredes de blocos de tijolos maciços combinadas com sistemas de isolamento térmico;
- Avaliar o desempenho energético de um ambiente situado na cobertura e no térreo, para comparar a influência da envoltória no desempenho energético em ambos os casos.

No decorrer do trabalho, outros questionamentos surgiram em relação ao tema, especialmente em relação à necessidade de formação de profissionais habilitados para lidarem com a questão energética ainda no nível da graduação, considerando que edifícios eficientes dependem de uma política que envolva, entre outros aspectos, a formação de recursos humanos preparados para o enfrentamento dos desafios inerentes ao tema.

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

AGUGLIARO, M. F.; MONTOYA, A.; ORTEGA, S. Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 736-755, 2015.

AKINOLA, A.; ADEBOYE, A.; OLUWATAYO, A.; ALAGBE, O.; BABALOLA, O.; AFOLABI, A. Survey dataset on architect's awareness and adoption of building envelope Technologies for energy eficiente housing in Lagos State. **Data in Brief**, v. 19, p. 1894 – 1901, 2018.

ALAM, M.; SINGH, H.; SURESH, S.; REDPATH, D. A. G. Energy and economic analysis of Vacuum Insulation Panels (VIPs) used in non-domestic buildings. **Applied Energy**, v. 188, p. 1 - 8, 2018.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE. ASHRAE Handbook of Fundamentals. Atlanta, 2009.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1. Atlanta: Energy Standard for Buildings except low rise residential Building, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15220**: 1-5 Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15575**: 1-6 Edificações habitacionais — Desempenho. Rio de Janeiro. 2013

BALOGUN, A. A.; MORAKINYO, T. E.; ADEGUN, O. B. Effect of tree-shading on energy de- mand of two similar buildings. **Energy and Building**, v. 81, p. 305-315, 2014.

BANIASSADI, A.; SAILOR, D.; BRYAN, H. Effectiveness of phase change materials for improving the resiliency of residential buildings to extreme thermal conditions. **Solar Energy**, v. 188, p. 190-199, 2019.

BANO, F.; SEHGAL, V. Finding the gaps and methodology of passive features of building envelope optimization and its requirement for office buildings in India. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 9, p. 66 – 93, 2019.

BELLIA, L.; DE FALCO, F.; MINICHIELLO, F. Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates. **Applied Thermal Engineer**, v.54, p. 190-201, 2013.

BERARDI, U. Aerogel-enhanced systems for building energy retrofits: insights from a case study. **Energy and Building**, v. 159, p. 370 – 381, 2018.

BERARDI, U.; NOSRATI, R. H. Long-term thermal conductivity of aerogel-enhanced insulating materials under different laboratory aging conditions. **Energy**, v. 147, p.

1188 – 1202, 2018.

BERARDI,U.; NOSRARI, R. H. Long-term thermal conductivity of aerogel-enhanced insulating materials under different laboratory aging conditions. **Energy**, v.147, p. 1188-1202, 2018.

BLANCO, J. M.; BURUAGA, A.; CUADRADO, J.; ZAPICO, A. Assessment of the influence of façade location and orientation in indoor environment of double-skin building envelopes with perforated metal sheets. **Building and Environment**, v.163, p. 106325, 2019.

BRAIN PESQUISA E CONSULTORIA apud SINICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, 2019. Disponível em: <http://www.sinduscon-es.com.br/v2/cgi-bin/noticia.asp?idnoticia=3409>. Acesso em: 15 jun. 2019.

BURATTI, C.; MERLI, F.; MORETTI, E. Aerogel-based materials for building applications: influence of granule size on thermal and acoustic performance. **Energy and Building**, v. 152, p. 472-482, 2017.

BURATTI, C.; MORETTI, E.; BELLONI, E. In: Pacheco Torgal F, Buratti C, Kalaiselvam S, Granqvist CG, Ivanov V, editors. Aerogel plasters for building energy efficiency, chapter 2, nano and biotech based materials for energy building efficiency, p. 17 – 40, 2016.

CHAN, H. Y.; RIFFAT, S. B.; ZHU, J. Review of passive solar heating and cooling technologies. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, v.14, p. 781–789, 2014.

CHEN, X.; YANG, H.; LU, L. A comprehensive review on passive design approaches in green building rating tools. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 1425-1436, 2015.

CHEN, X.; YANG, H.; ZHANG, W. Simulation-based approach to optimize passively de- signed buildings: a case study on a typical architectural form in hot and humid climates. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1712 – 1725, 2018.

CHRO, H. R.; ISTVAN, K. Thermal performance analysis of Sabunkaran residential building typology, Pollack Periodica, **An International Journal for Engineering and Information Sciences**, v. 12, p. 151–162, 2017.

CUCE, E.; CUCE, P. M. The impact of internal aerogel retrofitting on the thermal bridges of residential buildings: an experimental and statistical research. **Energy and Building**, v. 116, p. 449 - 454, 2016.

CUCE, E.; CUCE, P. M.; WOOD, C. J.; RIFFAT, S. B. Optimizing insulation thickness and analysing environmental impacts of aerogel-based thermal superinsulation in buildings. **Energy and Building**, v. 77, p. 28-39, 2014.

CUCE, E.; CUCE, P. M.; WOOD, C. J.; RIFFAT, S. B. Toward aerogel based thermal super- insulation in buildings: a comprehensive review. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, v. 34, p. 273 – 279, 2014.

DAEMEI, A. B.; EGHBALI, S. R.; KHOTBEHSARA, E. M.; Bioclimatic design strategies: A guideline to enhance human thermal comfort in Cfa climate zones. **Journal of Building Engineering**, v. 25, p. 107-118, 2019.

DU, P.; ZHENG, L. Q.; XIE, B. C.; MAHALINGAM, A. Barriers to the adoption of energy-saving technologies in the building sector: a survey study of Jing-jin-tang, China. **Energy Policy**, v. 75, p. 206-216, 2014.

EDP ESCELSA - ESPÍRITO SANTO CENTRAIS ELÉTRICAS , 2019. Disponível em: < https://www.edp.com.br/CentralDocumentos/tabela%20tarifas_ES.pdf >. Acesso em: 05 jan. 2020.

EDP ESCELSA - ESPÍRITO SANTO CENTRAIS ELÉTRICAS , 2019a. Disponível em: < https://www.edp.com.br/distribuicao-sp/saiba-mais/informativos/tabela-de-calculo-pispasep-cofins >. Acesso em: 05 jan. 2020.

EDP ESCELSA - ESPÍRITO SANTO CENTRAIS ELÉTRICAS , 2019b. Disponível em: < https://www.edp.com.br/distribuicao-es/saiba-mais/informativos/icms >. Acesso em: 05 jan. 2020.

EKICI, B. B.; AKSOY, U.T. Prediction of building energy needs in early stage of design. **Expert System Applied**, v. 38, p. 5352–5358, 2011.

ELIANE TEC. Fachadas ventiladas. Disponível em :< https://elianetec.com/fachadas-ventiladas>. Acesso em 10 jan. 2020.

ENERGYPLUS – WEATHER DATA BY REGIONS, 2019. Disponível em: <https://energyplus.net/weather-region/south_america_wmo_region_3/BRA%20%20 >. Acesso em: 15 jul. 2019.

ENERGYPLUS, 2019a. Disponível em: < https://energyplus.net/ >. Acesso em 05 fev. 2019.

FICKLER, S.; MILOW, B.; RATKE, L.; SCHNELLENBACH-HELD, M.; WELSCH, T. Development of high performance aerogel concrete. **Energy Procedia**, v. 78, p. 406 – 411, 2015.

GALLIANO, R.; GHAZI, W. K.; STAHL, T.; BINDER, B.; DANIOTTI, B. Performance evaluation of aerogel-based and perlite-based prototyped insulations for internal thermal retrofitting: HMT model validation by monitoring at demo scale. **Energy and Building**, v. 126, p. 275 – 286, 2016.

GHAZI, W. K.; BINDER, B.; ZIMMERMANN, M.; TANNER, C. Efficiency verification of a combination of high performance and conventional insulation layers in retrofitting a 130-year old building. **Energy and Building**, v. 82, p. 237 – 242, 2014.

HAASE, M.; AMATO, A. An investigation of the potential for natural ventilation and building orientation to achieve thermal comfort in warm and humid climates. **Energy,** v. 83, p.389–399, 2009.

HALAWA, E.; GHAFFARIANHOSEINI, A.;TROMBLEY, J.; HASSAN, N.; BAIG, M.; YUSOFF, S.; AZZAM I. A review on energy conscious designs of building façades in

hot and humid climates: Lessons for (and from) Kuala Lumpur and Darwin. **Renewable and sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2147-2161, 2018.

HARISH, K. A. A review on modeling and simulation of building energy systems. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, v. 56, p. 1272 – 1292, 2016.

HARKOUSS, F.; FARDOUN, F.; BIWOLE, P. H. Passive design optimization of low energy buildings in different climates. **Energy**, v. 165, p. 591-613, 2018.

HARNEY, K.R. Study finds that energy-efficient homes often command higher prices. **The Washington Post**; 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA – INMETRO. Portaria nº 50, de 01 de fevereiro de 2013. Anexo geral V: Cátalogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros. 2013. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtosPBE/regulamentos/AnexoV.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2019.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY – IEA. Energy Efficiency: analysis and outlooks to 2040. Paris. 2018. Disponível em: <http://www.sipotra.it/wp-content/uploads/2018/11/Energyefficiency-2O18.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2019

INVIDIATA, A.; GHISI, E. Impact of climate change on heating and cooling energy demand inhouses in Brazil, **Energy and Building**, v. 130, p. 20-32, 2016.

JELLE, B. P. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions - properties, requirements and possibilities. **Energy and Building**, v. 43, p. 2549 – 2563, 2011.

JIE, P. F.; ZHANG, F. H.; FANG, Z.; WANG, H. B.; ZHAN, Y. F. Optimizing the insulation thickness of walls and roofs of existing buildings based on primary energy consumption, global cost and pollutant emissions. **Energy**, v. 159, p. 1132-1147, 2018.

KANT, K.; SHUKLA, A.; SHARMA, A. Heat transfer studies of building brick containing phase change materials. **Solar Energy**, v. 155, p. 1233–1242, 2017.

KISTELEGDI, I.; RADHA, C.; BALINT, B.; Decision-making Tool for Energy and Thermal Comfort Optimization in Residential Building Refurbishment Using Passive Strategies. **Zanco Journal of Pure and Applied Sciences**, v. 31, p. 297 -304, 2019.

KUCUKPINARA, E.; MIESBAUERA, O.; CARMIB, Y.; FRICKEC, M.; GULLBERGD, L.; ERKEYE, C. Development of transparent and opaque vacuum insulation panels for energy efficient buildings. **Energy Procedia**, v. 78, p. 412-417, 2015.

LABIHI, A.; AITLAHBIB, F.; CHEHOUANI, H.; BENHAMOU, B.; OUIKHALFAN, M.; CROITORU, C.; NASTASE, I. Effect of phase change material wall on natural convection heat transfer inside an air-filled enclosure. **Applied Thermal Engineering**, v. 126, p. 305 – 314, 2017.

LATHA, P.; DARSHANA, Y.; VENUGOPAL, V. Role of building material in termal comfort in tropical climates – A review. **Journal of Building Engineering,** v. 3, p. 104-113, 2015.

LECHNER, N. Heating, Cooling, Lighting: Design Methods for Architects. John Wiley & Sons, INC.; 1991.

LEI, J.W.; YANG, J. L.; YANG, E. H. Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for cooling load reduction in tropical Singapore. **Applied Energy**, v. 162, p. 207 – 217, 2016.

LEWANDOWSKI, W. M.; LEWANDOWSKA, I. W. The external walls of a passive building: a classification and description of their thermal and optical properties. **Energy and Building**, v. 69, p. 93-102, 2014.

LI, Y.; LIANG, W.; ZHOU, J.; LONG, E. Experimental study on thermal performance improvement of buildings envelopes integrated with phase change materials in an air condition room. **Procedia Engineering**, v. 205, p. 190 – 197, 2017.

LUCCHI, E.; BECHERINI, F.; DI, T.; TROI, A.; FRICK, J.; ROBERTI, F. Thermal performance evaluation and comfort assessment of advanced aerogel as blown-in insulation for historic buildings. **Building and Environment**, v. 122, p. 258 – 268, 2017.

LUCCHINO, E. G.; GOIA, F.; LOBACCARO, G.; CHAUDHARY, G. Modelling of double skin facades in whole-building energy simulation tools: A review of current practices and possibilities for future developments.**Building Simulation,** v. 12, p. 3-27, 2019.

LUO, C. L.; XU, L. J.; JI, J.; LIAO, M. Y.; SUN, D. Experimental study of a modified solar phase change material storage wall system. **Energy**, v. 128, p. 224 – 231, 2017.

MACHADO, J. M. Avaliação de desempenho térmico em edificações multifamiliares considerando as mudanças climáticas futuras. 2019. 175 f. **Dissertação**. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, 2019.

MARIA, A. V. Evaluation of a sustainable Greek vernacular settlement and its landscape: architectural typology and building physics. **Building Environment**, v. 44, p. 1095 – 1106, 2009.

MENG, X.; LUO, T.; GAO, Y. N.; ZHANG, L. L.; HUANG, X.; HOU, C. P.; SHEN, Q.; LONG, E. S. Comparative analysis on the thermal performance of different wall insulation forms under the air-conditioning intermittent operation in summer. **Applied Thermal Engineering**, v. 130, p. 429-438, 2018.

NABONI, E.; MALCANGI, A.; ZHANG, Y.; BARZON, F. Defining the energy saving potential of architectural design. **Elsevier Ltd**, p. 140–146, 2015.

NICO-RODRIGUES, E. A. Quando a janela define a condição de desempenho térmico em ambiente ventilados naturalmente: caso específico das edificações multifamiliares em Vitória, ES. 2015. 201 f. **Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo**). Programa de Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura, Construção e Desenho, da Universidade de Bío Bío, Concepción, 2015.

OMER, A. M. Renewable building energy systems and passive human comfort solutions. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, v.12, p. 1562–1587, 2008.

OMRANY, H.; GHAFFARIANHOSEINI, A.; GHAFFARIANHOSEINI, A.; RAAHEMIFAR, K.; TOOKEY, J. Application of passive wall systems for improving the energy efficiency in build- ings: a comprehensive review. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 1252-1269, 2016.

OPENSTUDIO – Downloads, 2019. Disponível em: < https://www.openstudio.net/downloads> . Acesso em: 03 fev. 2019.

OPOKO, A. P.; OLUWATAYO, A. A.; EZEMA, I.C.; OPOKO, C. A. Residents' perception of housing quality in an informal settlement. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 11, p. 2525–2534, 2016.

PACHECO, R.; ORDÓÑEZ, J.; MARTÍNEZ, G. Energy efficient design of building: a review. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 3559-3573, 2012.

PEKDOGAN, T.; BASARAN, T. Thermal performance of different exterior wall structures based on wall orientation. **Applied Thermal Engineering**, v. 112, p. 15-24, 2017.

REGULAMENTO TÉCNICO DA QUALIDADE PARA O NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS - RTQR. Portaria nº 18/2012. Serviço Público Federal – Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Coméercio Exterior, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia-INMETRO, 2012.

RIFFAT, S. B.; QIU, G. A review of state-of-the-art aerogel applications in buildings. **International Journal of Low-Carbon Technology**, v. 8, p. 1-6, 2013.

SADINENI, S.B.; MADALA, S.; BOEHM, R.F. Passive building energy savings: a review of building envelope components. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 3617-3631, 2011.

SASAZAKI. Janelas de corer sem grade. Disponível em: < https://www.sasazaki.com.br/produto/janela-de-correr-sem-grade-aluminio-2-folhas-moveis-branco-linha-alumifort >. Acesso em: 14 jan. 2020.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO SINDUSCON. Censo Imobiliário - julho de 2017. Disponível em: <http://www.sinduscon-es.com.br/v2/cgi-bin/conteudo.asp?menu2=55 >. Acesso em: 2 jun. 2018.

SINGH, M. K.; MAHAPATRA, S.; ATREYA, S. Thermal performance study and evaluation of comfort temperatures in vernacular buildings of North-east India. **Building Environment**, v. 45, p. 320-329, 2010. 1st International Symposium on Sustainable Healthy Buildings.

SORGATO, M. J.; MARINOSKI, D. L.; R.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Nota técnica referente à avaliação para a norma de desempenho NBR 15575 em consulta pública**. 2012. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. Disponível em: <

http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/notas_tecnicas/NT_15575_FINAL.pd f>. Acesso em: 18 jul. 2019.

SOUAYFANE, F.; BIWOLE, P. H.; FARDOUN, F.; ACHARD, P. Energy performance and eco- nomic analysis of a TIM-PCM wall under different climates. **Energy**, v. 169, p. 127 -191, 2019.

SOUZA, H.; AMPARO, L.; GOMES, A. Influência da inércia térmica do solo e da ventilação natural no desempenho térmico: um estudo de caso de um projeto residencial em light steel framing. **Ambiente construído**, v. 11, p. 113-128, 2011.

STEFANOVIC, A.; GORDIC, D. Modeling methodology of the heating energy consumption and the potential reductions due to thermal improvements of staggered block buildings. **Energy and Building**, v. 125, p. 244 – 253, 2016.

SUN, X.; JOVANOVIC, J.; ZHANG, Y.; FAN, S.; CHU, Y.; MO, Y.; LIAO, S. Use of encapsulated phase change materials in lightweight building walls for annual thermal regulation. **Energy**, v.180, p. 858 – 887, 2019.

SUN, Y.; HUANG, P.; HUANG, G. A multi-criteria system design optimization for net zero energy buildings under uncertainties. **Energy and Building**, v. 97, p. 196-204, 2015.

SUN, Y.; WU, Y.; WILSON, R.; SUN, S. Thermal evaluation of a double glazing façade system with integrated Parallel Slat Transparent Insulation Material (PS-TIM). **Building and Environment**, v. 105, p. 69-81, 2016.

TALEB, H. M. Using passive cooling strategies to improve thermal performance and reduce energy consumption of residential buildings in the U.A.E. buildings. **Frontiers of Architectural Research – Research Article**, v. 3, p. 154-165, 2014.

TZIKOPOULOS, A.; KARATZA, M.; PARAVANTIS, J. Modeling energy efficiency of bioclimatic buildings. **Energy and Building**, v. 37, p. 529-544, 2005.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME . Dispnível em: < www.unep.org >. Acesso em: 10 dez. 2018.

VENKATARAMAN, M.; MISHRA, R.; WIENER, J.; MILITKY, J.; KOTRESH, T. M.; VACLAVIK, M. Novel techniques to analyse thermal performance of aerogel-treated blankets under extreme temperatures. **Journal of Textile Institute**, v. 106, p. 1 – 12, 2014.

WANG, Y.; KUCKELKORN, J.; ZHAO, F. Y.; SPLIETHOFF, H.; LANG, W. A state of art of review on interactions between energy performance and indoor environment quality in passive house buildings. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 1303-1309, 2017.

WEI, J.; ZHAO, J.; CHEN, Q. Energy performance of a dual airflow window under different climates. **Energy and Building**, v. 42, p. 111-122, 2010.

WONG, P.; PRASAD, D.; BEHNIA, M. A new type of double-skin façade configuration for the hot and humid climate. **Energy and Building**, v. 40, p. 1941-1950, 2008.

XIA, D.; LOU, S.; HUANG, Y.; ZHAO, Y.; LI, D. H. W.; ZHOU, X. A study on occupant behavior related to air-conditioning usage in residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 203, p. 109446, 2019.

YAN, Q.Y.; HUO, R.; LI, L. S. Experimental study on the thermal properties of the phase change material wall formed by different methods. **Solar Energy**, v. 86, p. 3090 – 3102, 2012.

ZHANG, M. J.; QIN, M. H.; RODE, C.; CHEN, Z. Moisture buffering phenomenon and its impact on building energy consumption. **Applied Thermal Engineering**, v. 124, p. 398 – 413, 2017.