

Influência dos fatores projetuais no consumo elétrico para ar condicionado: um estudo de caso em uma habitação popular em clima tropical úmido.

Design factors influence on electrical consumption for artificial cooling: a case study in a social housing under humid tropical climate

¹Fernanda Mourão Dutra de Oliveira, ²Raquel Diniz Oliveira, ³Rogério Cabral de Azevedo

¹Mestre em Engenharia Civil – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET MG)
(fmouraodutra@gmail.com)

^{2, 3}Professor Permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) – CEFET MG
(raqueldiniz@cefetmg.br, rogeriocabral@cefetmg.br)

RESUMO: No Brasil, à semelhança do que ocorre no mundo, o consumo energético das residências corresponde a aproximadamente 25% da energia demandada. O crescimento contínuo do déficit habitacional juntamente com o aumento do desconforto causado pelas mudanças climáticas e fenômenos das ilhas de calor tendem a gerar aumento do consumo referente ao uso de ar condicionado para suprir esta crescente demanda energética. Em vista disso, o objetivo dessa pesquisa foi quantificar o consumo energético de habitações populares no clima tropical úmido, nas quais o uso de ar condicionado se faz presente. Os dados do consumo elétrico de conjunto habitacional carioca de referência foram coletados por meio de visita in loco e, posteriormente, analisados estaticamente de modo a possibilitar a calibração do modelo. Os resultados permitiram analisar a influência do mês, andar, direção e localização no bloco em contraste com o consumo elétrico dos apartamentos. Concluiu-se que o andar e o bloco não foram significantes, a direção oeste foi a mais crítica, e nos meses de verão o consumo de eletricidade para resfriamento aumentou. Desta forma, a avaliação pós-ocupação pode gerar dados de referência que permitem diagnosticar o consumo energético residencial. Como contribuição, o resultado gerado possibilita o desenvolvimento de pesquisas para aprimoramento da eficiência energética de habitações populares. Pode-se, portanto, avaliar o aumento do consumo energético em cenários futuros, considerando as mudanças climáticas, definir estratégias construtivas aplicáveis permitindo adequar a edificação construída ao clima em questão ou mesmo gerar soluções que permitam otimizar a performance energética de edificações semelhantes.

Palavras Chave: Demanda energética. Edifício Residencial. Ar condicionado.

ABSTRACT: In Brazil, as well as in other countries, energy consumption of dwellings is almost 25% of all the energy demanded. The steady increase houses deficit herewith the rising thermal discomfort caused by climate change and urban heat island phenomena can push up the air conditioning consumption to satisfy this growing energy requirement. Thereby, the authors aimed at quantifying a social housing cooling energy consumption under a humid tropical climate. Data on electrical consumption of a reference housing complex located in Rio de Janeiro city (Brazil) were collected and also analyzed statically. As a result, the month, floor, direction, and, block location impact was analyzed in comparison with the residential unit electrical consumption. As a key finding of this investigation could be concluded that floor and block locations were not significant. On the other hand, the most critical orientation was to the west, and the cooling consumption of electricity increased during the summer. Thus, post-occupancy assessment can result in reference data that allow energy consumption audit of social houses as well as improve its energy efficiency as well as the literature studies. It is therefore possible to evaluate the energy consumption increase in future scenarios, considering climate change, and also set building strategies to suit the existing building to its climate or even to figure out some solutions that allow likewise enhance the energy performance of buildings under alike conditions.

Keywords: Energy demand. Residential building. Air conditioning system.

1. INTRODUÇÃO

O consumo energético das edificações tem relação com as suas características construtivas, clima local e equipamentos instalados (potência). Assim, a depender das características técnicas e da rotina de uso e ocupação do edifício, o seu sistema de iluminação artificial além dos equipamentos elétricos e de condicionamento de ar podem ser

determinantes neste consumo em virtude do dispêndio elétrico para o seu funcionamento. Adicionalmente, tais sistemas podem gerar cargas térmicas internas na edificação que, conseqüentemente, contribuem para o aumento da demanda por refrigeração juntamente com a parcela térmica proveniente do número de ocupantes presentes nos ambientes (GERALDI et al. 2022). Em climas quentes e/ou em locais nos quais as temperaturas elevadas se fazem presentes no verão e/ou em outros meses do ano, os sistemas de ar condicionado se mostram de grande relevância para propiciar condições satisfatórias de conforto térmico aos usuários dos ambientes. Contudo, o acesso a dados construtivos e de consumo relativo ao uso de ar condicionado ainda figura como um relevante desafio para a promoção da eficiência energética e sustentabilidade de edifícios, especialmente em países subdesenvolvidos e/ou em desenvolvimento (VELOSO et al. 2020).

A correlação das características construtivas e desempenho energético do estoque de edifícios não residenciais brasileiros foi analisado de forma pioneira de modo a fundamentar pesquisas sobre eficiência energética, *benchmarking* de energia, impactos de mudanças climáticas, entre outros (GERALDI et al. 2022). A simulação de edifícios de referência pode ser utilizada para reproduzir o desempenho energético do estoque de edifícios condicionados artificialmente. Neste contexto, os aspectos relativos à construção, operação e condições climáticas são de suma importância para o desenvolvimento de *benchmarking* edilício (GERALDI, et al. 2021).

A maioria das pesquisas desenvolvidas no Brasil acerca do uso de ar condicionado em edifícios tem como foco àqueles comerciais ou de serviços. Assim, os estudos energéticos relativos as residências se mostram incipientes apesar de se tratar de um dos principais consumidores de eletricidade com 26,4% de participação no cenário nacional (Brasil e EPE, 2021).

Adicionalmente, estima-se para este setor incremento quantitativo e qualitativo. Conforme resultados de estudo apresentados pela Fundação João Pinheiro (2022), o crescimento inerente da população brasileira, juntamente com a limitação do atendimento da demanda por novas habitações, especialmente pelos programas habitacionais, - apesar da sua produção massiva - resulta em uma intensificação do déficit habitacional e urbanístico. A opção por áreas periféricas, favorece a economia da construção e o acesso à moradia. Contudo, a padronização de soluções projetuais em regiões mais distantes, na maioria dos casos, se mostra desprovida de equipamentos e mobilidade urbana além de incoerência do espaço para o atendimento das necessidades reais dos usuários. Tal fato pode demandar custos para adequação elevados, destituído de apoio técnico e financeiro. Além da inadequação edilícia, verifica-se, também, necessidade de reposição e/ou reabilitação das unidades com coabitação, obsoletas, precárias, adensadas ou com ônus excessivo locatício, situação que pode se agravar ainda mais em virtude dos índices de desemprego elevados (FJP 2022).

O cálculo reformulado com os dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (Pnad) Contínua de 2019, apurou mais de 14 milhões de domicílios com inadequação quanto à infraestrutura urbana (energia elétrica, abastecimento de água, esgotamento sanitário e coleta de lixo), impactando cerca de 41 milhões de pessoas, especialmente nas áreas metropolitanas que concentram 38% do total destes casos. No que tange o domicílio *per se*, mais de 11 milhões de unidades apresentam algum tipo de desconformidade, quais sejam: irregularidade fundiária, adensamento excessivo, inexistência de banheiro ou algum tipo de carência edilícia relativa ao piso e/ou cobertura, entre outros (FJP 2021).

Como consequência do incremento e/ou inadequação das moradias, pressupõe-se, ademais, aumento do consumo energético e do uso de ar condicionado. Entre 2015 e 2050 estima-se crescimento anual do consumo final de energia nas residências na ordem de 1,2% e 1,7% nos cenários inferior e superior, respectivamente (BRASIL e EPE, 2018). Além disto, a

ampliação do uso de ar condicionado e/ou ventiladores nos domicílios brasileiros se mostrou presente em todas as classes de renda (ELETROBRAS, 2019).

Neste contexto, a escassez de estudos específicos direcionados para este cenário das moradias brasileiras permite identificar, portanto, que as edificações existentes, em especial àquelas de interesse social apresentam inadequações construtivas que podem contribuir para o aumento da demanda por eletricidade para uso de ar condicionado, podendo se acentuar ainda mais em localidades de clima quente. Assim, apontamentos neste sentido poderão contribuir para o preenchimento desta lacuna além de ressaltar as características construtivas e/ou estratégias bioclimáticas que se fazem relevantes para a redução do consumo de ar condicionado para estes casos. Tal definição poderá, ainda, servir de referência para a tomada de decisão em futuras intervenções em edifícios existentes e/ou auxiliar a especificação de projeto arquitetônico durante a sua fase de concepção ou até mesmo servir como embasamento para estudos referentes a *benchmarking* energético para estas tipologias.

Diante disso, o setor residencial dispõe de potencial de redução do consumo de energia e os impactos envolvidos para manter as mesmas condições pré-existent de conforto térmico do usuário, com menor dispêndio de eletricidade. Medidas de promoção da eficiência energética tem sido investigada para edificações existentes. Diversas pesquisas foram desenvolvidas considerando a aplicação de estratégia construtivas e avaliação dos benefícios de sua utilização na redução do consumo energético de edifícios com ar condicionado. Neste contexto, uma revisão sistemática foi realizada de modo a permitir um recorte da literatura sobre este tema.

Em síntese, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar, por meio de modelo numérico, os efeitos da adoção de estratégias bioclimáticas no consumo energético de habitação popular climatizada artificialmente, localizada em clima tropical úmido.

1.1 Revisão da literatura

Com o intuito de selecionar um portfólio de artigos científicos relacionados com o tema da presente pesquisa e que representem o seu estado da arte, utilizou-se o ProKnow-C como metodologia de revisão sistemática de literatura. Essa metodologia apresenta uma ferramenta que proporciona uma pesquisa estruturada e rigorosa, minimizando a subjetividade e a aleatoriedade comuns nesse tipo de processo (CARVALHO et al., 2020). Desta forma, definiu-se os termos de busca correlacionados ao tema a serem aplicados nas bases de dados de publicações científicas disponibilizadas pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). O conjunto de termos seguiu as definições da referência De Oliveira (2020). Uma vez obtido o portfólio de artigos selecionados pelas etapas de eliminação, foi realizada a investigação das informações presentes nos artigos do portfólio com foco em tópicos (lentes de pesquisa) que representam os pontos de vista que o pesquisador deseja investigar e que irão contribuir para a pesquisa. As lentes de pesquisa aplicadas por De Oliveira (2020) foram: Clima, Tipologia de uso da edificação, Estratégias de aprimoramento da eficiência energéticas das edificações, *Software* utilizado para simulação termoenergética e Método de análise de resultados.

Como resultados verificou-se que diversos estudos tais como Bataineh e Alrabee (2018), Casquero-Modrego e Goñi-Modrego (2019), Fotopoulou et al. (2018), Gui et al. (2018), Li et al. (2017), Ozarisoy e Altan (2019) indicam que o clima tem um efeito importante no desempenho dos edifícios e no seu consumo de energia. As particularidades climáticas de uma região influenciam, portanto, no desempenho da envoltória das edificações e definem o tipo de estratégia a ser utilizada para aprimorar a sua eficiência energética.

As edificações avaliadas com este propósito consistiram, em sua maioria, na tipologia residencial à exceção do estudo de Li et al. (2017) que tratou de edifício comercial. Todas as localidades apresentavam condições climáticas com períodos de altas temperaturas. Tal

característica assemelha-se ao comportamento do clima tropical encontrado no Brasil, no qual altas temperaturas são experimentadas em alguns períodos. Desse modo, é possível que ações para esses climas possam ser utilizadas também no cenário nacional. A rotina de uso do usuário o que afeta diretamente o seu consumo energético, assim as condutas realizadas nesses estudos podem ser utilizadas em tipologias similares.

Soluções adotadas em edificações em diferentes climas com o intuito de aprimorar a eficiência energética a partir da redução de sua temperatura interna podem servir de referencial para estudos posteriores. Diversos autores apresentaram diferentes estratégias para otimização do desempenho energético das construções. Neste contexto apresenta-se uma síntese de alguns estudos da literatura, a partir da aplicação das lentes de pesquisa: Clima e Estratégias de aprimoramento da eficiência energética das edificações, nas Tabelas 1 e 2, respectivamente:

Tabela 1 – Clima vigente na localização da edificação

Pesquisadores e ano de publicação	Estratégias sugeridas
Giancola et al., 2014	Clima Seco
Nguyen e Reiter, 2012	Clima Quente e Úmido
Fotopoulou et al., 2018	Não informado
Bataineh e Alrabee, 2018	Clima Quente e Seco
Ozarisoy e Altan, 2019	Clima Quente e Temperado
Casquero-Modrego e Goñi-Modrego, 2019	Clima Mediterrâneo
Taleb, 2014	Clima desértico
Gui et al. 2018	Clima Quente e Temperado
Li et al. 2017	Clima Quente e Temperado

Tabela 2 – Estratégias para otimização do desempenho energético edifício

Pesquisadores e ano de publicação	Estratégias sugeridas
Fotopoulou et al. 2018	-Vidros duplos -Elementos de sombreamento -Isolamento de vedações
Bataineh e Alrabee, 2018	-Vidros de alta performance -Elementos de sombreamento -Isolamento de vedações (parede e cobertura)
Ozarisoy e Altan, 2019	-Isolamento de vedações (parede, cobertura e piso) -Fachada ventilada -Revestimento de fachada com inércia térmica elevada -Sistema de iluminação de LED -Vidro triplo
Casquero-Modrego e Goñi-Modrego, 2019	-Isolamento de telhado -Aumento da espessura das vedações
Gui et al. 2018	-Sistema de índice de desempenho
Li et al. 2017	-Telhado e parede verde -Vidros de alta performance -Aquecimento de água por meio de radiação solar -Placas fotovoltaicas

Destaca-se que a pesquisa de Gui et al. (2018) divergiu das demais pois propôs a introdução de um sistema de índice de desempenho baseado nas decisões de projeto arquitetônico (forma, área de piso, orientação, número de pavimentos, tipo de estrutura e revestimento, fonte de calor e/ou frio), tipologia construtiva e o impacto do consumo de energia.

A aplicação de estratégias construtivas envolve fatores econômicos e técnicos. Soluções que envolvem altos custos, de execução ou manutenção, além de intervenções drásticas, como grandes reformas, não se mostram pertinentes para a adequação de

construções existentes ou de programas sociais, uma vez que não são passíveis de serem aplicadas na prática. Assim, as estratégias sugeridas pela literatura (Tabela 2) e, aplicáveis ao clima tropical brasileiro, foram classificadas (Tabela 3) considerando custos potenciais e, grau hipotético das intervenções que estariam envolvidos.

Tabela 3 – Estratégias construtivas indicadas pela literatura

Estratégia	Número de recomendações	Custo de execução	Custo de manutenção	Tipo de intervenção
Fachada ventilada	2	A	B	D
Isolamento de vedações	5	A	A	D
Aumento da espessura das vedações	2	A	B	D
Pintura branca na fachada, menor absorvância	1	B	B	L
Vidros de alta performance	3	A	B	L
Elementos de sombreamento	3	B	B	L
Isolamento de telhado	4	A	A	D
Isolamento de piso	1	A	A	D
Acabamento de fachada com inércia térmica elevada	1	A	A	D
Sistema de iluminação de LED	1	A	B	L
Vidro triplo	1	A	B	L
Telhado verde	2	A	A	D
Parede verde	1	A	A	D
Aquecimento de água por radiação solar	1	A	B	D
Placas fotovoltaicas	1	A	B	L

Legenda: Custos Baixo = B, Alto = A; Intervenção Inexistente = I, Leve = L e Drástica = D.

Em síntese, considerando estratégias que envolvam custos baixos, intervenções inexistentes ou leves e o número de recomendações por pesquisas semelhantes, as soluções sugeridas na literatura passíveis de serem aplicadas em um estudo de caso sobre o tema abrangendo uma moradia popular brasileira seriam os elementos de sombreamento e a pintura da fachada na cor branca, cujas intervenções são leves e o custo de execução baixo, além da mudança do tipo de vidro (espessura, propriedades, entre outras características, cuja intervenção é leve com custos altos de execução mas com custos de manutenção baixa, além disso, foi utilizado por diversos autores.

A modelagem numérica se mostra como uma ferramenta auxiliar para se obter menor consumo de energia para climatização de edifícios. Diversos *softwares* validados pela literatura estão disponíveis para este objetivo sendo a facilidade de acesso e a experiência prévia do pesquisador relevantes nesta escolha. O simulador computacional EnergyPlus, associado ao DesignBuilder para a modelagem termoenergética foram os programas de maior incidência na revisão sistemática da literatura (BATAINEH e ALRABEE, 2018; FOTOPOULOU et al. 2018, OZARISOY e ALTAN, 2019). O primeiro refere-se a uma ferramenta de livre acesso (gratuito) ao passo que o segundo demanda uma licença para uso. Adicionalmente, o *software* SketchUp, associado a um *plug-in* complementar como por exemplo o Euclid e/ou Open Studio, também possibilita a modelagem termoenergética que poderá servir de modelo de entrada para o EnergyPlus. A disponibilidade de uma versão gratuita desse programa, muitas vezes, pode viabilizar pesquisas em instituições de ensino público com limitação de recursos.

Quanto a análise dos resultados, a comparação gráfica foi a mais recorrente no recorte da literatura sobre o tema (BATAINEH e ALRABEE, 2018; LI et al. 2017; FOTOPOULOU et al. 2018, OZARISOY e ALTAN, 2019). Contudo, a apresentação gráfica (GUI et al. 2018) e a comparação gráfica de resultados (*boxplot*) tratados por meio de análise estatística (regressão linear) também se fizeram presentes (CASQUERO-MODREGO e GOÑI-MODREGO, 2019).

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1 Metodologia

O presente estudo fez uso da simulação computacional com o objetivo de analisar o efeito da adoção de estratégias bioclimáticas complementares indicadas pela revisão da literatura, no consumo relativo ao ar condicionado em edificação existente. Desta forma, as etapas metodológicas se dividem em quatro, a saber: 1) Definição e caracterização da habitação de referência; 2) Coleta e tratamento dos dados; 3) Definição das estratégias a serem aplicadas; 4) Elaboração, calibração e simulação do modelo termoenergético da edificação. A seguir descreve-se como foi a realização de cada passo.

2.1.1 Definição e caracterização da habitação de referência

Conforme a Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial (PPH 2019), o estado do Rio de Janeiro, seguido do Amazonas apresentaram o maior percentual de domicílios com ar condicionado, considerando a amostra brasileira analisada, com aproximadamente 48 e 43% de posse destes equipamentos, respectivamente (ELETROBRAS, 2019). Assim, para a definição da localidade considerou-se uma cidade localizada na Zona 08 do zoneamento bioclimático brasileiro (clima tropical úmido), que fosse altamente urbanizada e caracterizada por elevadas taxas de temperatura. Sendo assim, optou-se pelo Rio de Janeiro uma vez que se trata da segunda cidade em área urbanizada e população do país (IBGE 2022). Por esta razão, foi contemplada com diversas construções de programa habitacionais, caracterizadas pela não observância de princípios de eficiência energética, alto consumo energético e a desconsideração dos consequentes impactos ambientais correlacionados. Além disto a cidade é caracterizada por apresentar longos períodos de desconforto devido ao calor, o que demonstra uma grande tendência na adoção de sistemas de ar condicionado, em especial os equipamentos de janela presentes em mais de 72% dos domicílios analisados, inclusive para as classes mais baixas conforme indicou o PPH 2019 para o estado.

Como objeto de estudo selecionou-se um empreendimento de interesse social existente no seu pior cenário, no qual todas as habitações possuem aparelhos de ar condicionado em funcionamento. A facilidade de acesso à informação e aos materiais necessários para a realização deste estudo também foram considerados. Neste sentido elegeu-se o Parque Carioca, localizado no bairro Jacarepaguá, constituinte do programa Minha Casa Minha Vida - MCMV, construído em 2013. O empreendimento abrange 900 unidades habitacionais, dispostas em quatro condomínios. Nesse estudo, em virtude do maior número de dados fornecidos, considerou-se o Condomínio 2 (Figura 1), que possui 200 habitações divididas em 10 blocos compostos por cinco andares e quatro apartamentos por andar constituídos de dois quartos com área útil de 39,8 m² (Figuras 2a, b e c).

Figura 1 – Implantação do Condomínio.

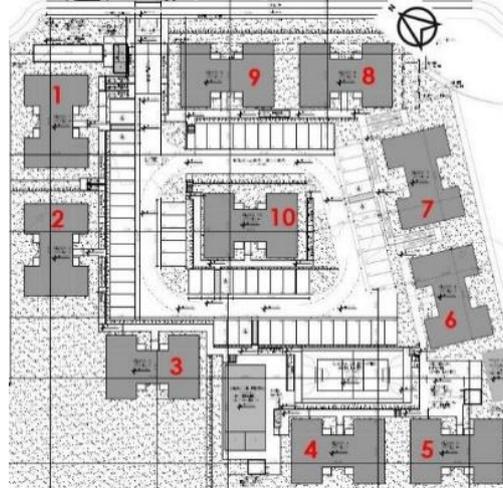
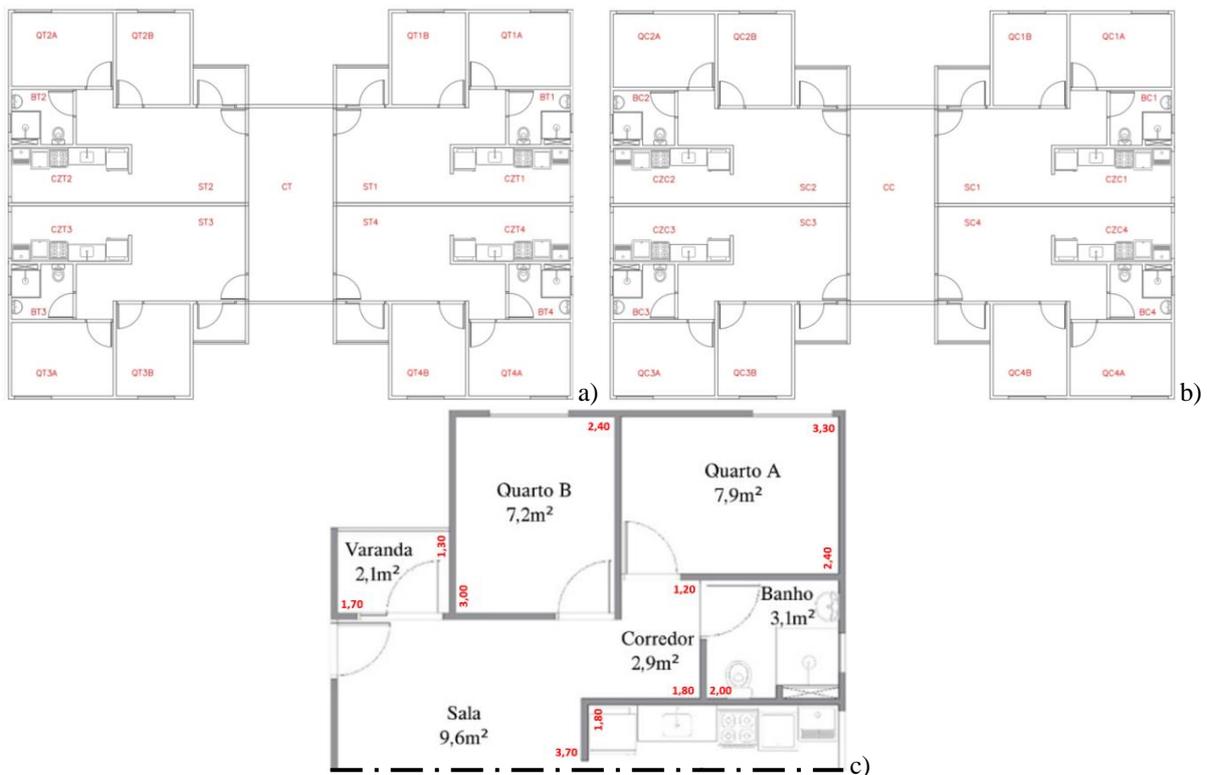


Figura 2 – Plantas dos apartamentos térreo (2a), cobertura (2b), com a denominação dos cômodos e unidade tipo com as cotas gerais (c).



2.1.2 Coleta e tratamento dos dados

Para a realização do presente estudo se fez necessária a obtenção dos dados da edificação de referência para elaboração e calibração do modelo termoenergético desenvolvido para cumprimento do objetivo proposto. Tais informações foram levantadas em visita *in loco* realizada no mês de julho de 2019, de maneira voluntária e consensual. Assim, coletou-se projetos arquitetônicos e memoriais técnicos junto à construtora. De forma complementar, realizou-se levantamento dos índices de refletância das paredes externas da edificação que se apresentavam em pintura texturizada nas cores verde e marrom. Tal informação foi obtida por meio de equipamento portátil, conforme método descrito por Pereira et al. (2021). As características construtivas foram estabelecidas conforme as

especificações de projeto, a saber: paredes internas e externas maciças em concreto (10cm), quarto com janelas de correr (1,20x1,20m) com vidro incolor de 4mm, portas dos quartos, banheiro e sala (0,8 x 2,10m) em madeira com bandeira fixa de 40cm de altura, porta da varanda de abrir em alumínio (0,80 x 2,30m) com bandeira fixa de 40cm de altura, banheiro com janela máximo-ar em vidro (0,6 x 0,8m) cozinha com vão aberto (1,50 x 1,20m), cobertura com telhas de fibrocimento de 6mm e beiral de 50cm. Maiores informações sobre as propriedades térmicas dos elementos construtivos do objeto de estudo de referência poderão ser consultados em De Oliveira (2020). Cumpre destacar que a observância das normas de desempenho não foi verificada para o presente estudo por se tratar de edificação existente e, portanto, já aprovada pelos órgãos municipais. O foco deste estudo direcionou-se, assim, para as possíveis adequações que pudessem contribuir para a redução dos gastos energéticos referentes ao consumo de ar condicionado que não necessariamente fossem semelhantes as estratégias bioclimáticas definidas nos instrumentos normativos em vigor após a construção da referida edificação.

O consumo de eletricidade foi coletado com base nas contas de energia fornecida pelos moradores, no total de 67 unidades participantes, de 10 prédios constituintes do conjunto habitacional. Deste modo, obteve-se os valores de consumo de energia mensais, durante um ano (julho de 2018 a julho de 2019), de cada habitação. O número de moradores por habitação assim como a real distribuição de equipamentos elétricos e seus hábitos de uso, não foram informados. Desta forma, os parâmetros de uso e ocupação foram, elaborados com base na rotina comum levantada na ocasião da visita às unidades. Tal informação foi utilizada como *input* da simulação computacional conforme descrito por De Oliveira (2020). O uso da iluminação artificial, chuveiro e equipamentos elétricos tais como ferro, lavadora de roupas, TV e microondas foram considerados constantes ao longo do ano ao passo que o ar condicionado foi considerado de uso variável. Considerou-se um equipamento de ar condicionado de janela por quarto, com funcionamento implementado nos meses mais críticos, conforme dados de consumo extra de eletricidade fornecidos pelos moradores por meio da conta de energia elétrica. As informações detalhadas mês a mês, foram descritas em De Oliveira (2020). A caracterização dos dados de entrada e funcionamento do equipamento de ar condicionado de janela no simulador Energy Plus ocorreu por meio das seguintes abas: *HVACTemplate:Thermostat*, *ZoneHVAC:WindowAirConditioner/EquipmentList/Connections*, *Fan:ConstantVolume*, *Coil:Cooling:DX:SingleSpeed*, *OutdoorAir:Mixer*, *NoteList*, *OutdoorAir:NodeList*, *Curve:Quadratic/Biquadratic*. Os ambientes de permanência prolongada foram considerados ocupados das 18h00 às 22h00 (sala) e das 22h00 às 07h00 (quarto), conforme rotina comum coletada.

Posteriormente, realizou-se uma análise estatística, nos dados de consumo de energia coletados a partir da conta mensal dos diversos apartamentos, com o intuito de identificar quais fatores seriam mais significativos nos valores de consumo de energia obtidos que pudessem influenciar na elaboração do modelo termoenergético representativo da edificação. Primeiramente foi verificado se os dados coletados seguiam uma distribuição normal, sendo que os dados considerados como *outliers*, descartados. A seguir, foi realizada a análise de variância ANOVA no *software* R, na qual o consumo de energia elétrica foi relacionado com os seguintes fatores: mês, direção cardeal, andar e bloco. Os resultados obtidos indicaram que os fatores significativos, para os valores de consumo energético, foram os meses do ano e a direção da edificação, uma vez que o p-valor foi inferior a 0,05.

A partir do resultado obtido na análise de variância ANOVA, foram realizados Testes de Tukey para determinar a significância de cada direção cardeal e cada mês do ano. Os meses de janeiro, fevereiro, março e dezembro, nessa ordem, os quais apresentaram os registros de temperaturas mais elevadas, foram aqueles mais significativos no consumo de energia para climatização artificial. Já a média do consumo de eletricidade das habitações

voltadas para as direções norte, sul e leste foram as mesmas, havendo diferença estatística significativa apenas na média das habitações voltadas para Oeste, direção na qual verificou-se as médias de consumo de eletricidade mais altas do que aquelas voltadas para as outras direções.

Vale destacar que em relação ao andar, representando a posição da unidade junto à edificação, não foi significativo, uma vez que o p-valor se apresentou acima de 0,05, indicando que a localização no andar térreo ou na cobertura não foi significativo no consumo de energia elétrica das residências, para esse objeto de estudo.

Quanto ao bloco, que consistiria no posicionamento do mesmo junto a áreas vegetadas ou asfaltadas, os resultados apresentaram um valor próximo de 0,05. Dessa forma, não foi possível determinar sua real significância.

Tais análises se mostraram indispensáveis para determinar os dados mais relevantes para serem analisados como os resultados-chave da presente pesquisa. Contudo, valor residual obtido na análise de variância ANOVA foi elevado, o que pode comprometer a significância das variáveis consideradas. Para reduzi-lo seria necessário obter informações detalhadas acerca dos hábitos de uso de equipamentos, ocupação dos usuários bem como o inventário dos equipamentos de cada habitação. Porém, como descrito, a falta destas informações caracteriza-se como uma das restrições e limitações desta pesquisa.

Neste contexto, os resultados-chave referem-se ao teste das estratégias sugeridas pela literatura, de forma isolada e combinada, no modelo termoenergético com o objetivo de otimizar o consumo de eletricidade relativo ao uso de ar condicionado para melhoria das condições térmicas da habitação de interesse social definida como objeto de estudo. Assim, para o tratamento dos dados obtidos utilizou-se Análise de variância ANOVA, Teste de Tukey e gráficos *bloxpot* com o objetivo de avaliar a significância dos resultados obtidos na simulação dos modelos com a aplicação das estratégias de forma isolada e combinada

2.1.3 Definição das estratégias a serem aplicadas

Para a presente pesquisa foram selecionadas estratégias construtivas aplicáveis a uma unidade residencial existente que pudessem ampliar o atendimento das condições de conforto térmico do ambiente e, conseqüentemente, minimizar a demanda por climatização artificial. Adicionalmente, considerou-se, também, o fator custo e o nível de intervenção referente a sua aplicação além da sua pertinência com cenário estudado, MCMV faixa 1. Desta forma, selecionou-se quatro sugestões apresentadas por Bataineh e Alrabee (2018) Li et al. (2017), Fotopoulou et al. (2018), Ozarisoy e Altan (2019) e Casquero-Modrego e Goñi-Modrego (2019) que atendessem as restrições deste estudo, quais sejam:

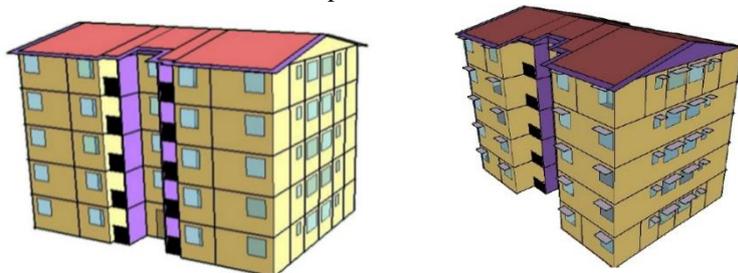
1. Pintura: Mudança da cor da pintura da fachada das edificações para um tom claro (menor valor de absorvância, redução do valor α de 0,9 para 0,3);
2. Sombreamento: Inclusão de dispositivo de sombreamento instalado sobre as aberturas, funcionando como marquises, com 113cm de profundidade perfazendo um ângulo de proteção horizontal de sombreamento de 41°;
3. Vidro: Substituição de vidro temperado transparente incolor de 4 para 6mm;
4. Veneziana: Instalação de veneziana em alumínio junto às aberturas, acionada após o alcance de 26°C de temperatura interna na zona.

2.1.4 Elaboração, calibração e simulação do modelo termoenergético da edificação

O modelo termoenergético desenvolvido para o presente estudo foi construído com o auxílio do *software* SketchUp e o *plug-in* Euclid. Uma vez que a análise dos dados coletados nesta pesquisa indicou que o entorno não influencia no consumo de energético das unidades, realizou-se, apenas, o modelo de uma edificação representativa do conjunto estudado,

conforme se observa nas Figura 3 e 4. Desta forma é possível observar o modelo antes e, depois, da adoção das estratégias combinadas, definidas pela literatura com objetivo de otimizar o consumo de eletricidade relativo ao ar condicionado.

Figura 3 e 4 – Modelo termoenergético do objeto de estudo antes e depois da adoção de estratégias, respectivamente.



Apesar da análise dos dados levantados não indicar diferença significativa entre o consumo de eletricidade entre as unidades térreas e de cobertura, a literatura indica que ambientes localizados nos pavimentos superior e térreo apresentam temperaturas mais elevadas ou mais baixas, devido o contato com a cobertura ou com o solo, respectivamente. Desse modo, considerou-se os resultados obtidos para as habitações dos pavimentos térreo e cobertura, a partir do modelo termoenergético realizado. Assim, foram criadas zonas térmicas individuais para cada ambiente das habitações desses pavimentos. Os pavimentos restantes, 2, 3 e 4 foram modelados considerando uma zona única para cada andar, uma vez que seus resultados foram desconsiderados.

Posteriormente, para a calibração do modelo seguiu-se os seguintes passos:

1. Obtenção da média de consumo mensal das habitações em Kwh;
2. Obtenção da lista de equipamentos das unidades habitacionais;
3. Obtenção do consumo médio de cada equipamento;
4. Ajustes dos valores de *input* no EnergyPlus com o intuito de alcançar os dados de consumo obtidos para cada mês;
5. Simulação considerando o ano inteiro;

Em relação aos cinco passos supradescritos, os seguintes procedimentos foram realizados para cada um deles:

- Os dados relativos à média de consumo mensal das habitações em Kwh foram obtidos por visita *in loco* na qual obteve-se as contas de eletricidade de uma amostra de habitações;
- Para obtenção da lista generalizada de equipamentos das unidades habitacionais foram utilizados os projetos técnicos arquitetônicos, luminotécnicos e elétricos, além do memorial descritivo. Na Tabela 3 é apresentada a lista de equipamentos considerados:

Tabela 3 – Lista de equipamentos

Equipamento	Potência (W)	Quantidade por habitação	Cômodo
TV de LED	20	1	Sala de Estar
Microondas	620	1	Cozinha
Refrigerador	160	1	Cozinha
Ferro Elétrico	1200	1	Área de Serviço
Máquina de Lavar Roupa	495	1	Área de Serviço
Chuveiro Elétrico	3500	1	Banheiro
Ar Condicionado de Janela	748 (7500BTUs)	2	Quartos
Lâmpada	15	7	Todos os cômodos

- O consumo de cada equipamento foi obtido pela calculadora *online* de referência da concessionária de energia do Estado do Rio de Janeiro (LIGHT 2012) a partir da estimativa do tempo de uso de cada um, uma vez que a potência já constava como um dado inicial;

- O padrão de consumo de cada equipamento, junto ao programa EnergyPlus, foi ajustado mensalmente até que o valor de consumo de eletricidade obtido na simulação estivesse de acordo com aquele obtido nos dados coletados, sendo o uso do ar condicionado variável e, os demais, constantes ao longo do ano;

- A Simulação computacional, a título de teste e, posteriormente calibração, foi realizada considerando toda a edificação para o ano inteiro. Os dados de *input* da simulação computacional foram inseridos conforme descrito por De Oliveira (2020).

Após o teste, realizou-se nova simulação do comportamento energético da edificação de referência considerando a aplicação da seleção de estratégias construtivas, de forma isolada e combinada. O arranjo de combinações considerado pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 – Combinação de estratégias

Número	Combinação de Estratégias
1	Pintura
2	Sombreamento
3	Vidro
4	Veneziana
5	Pintura + Sombreamento
6	Pintura + Vidro
7	Pintura + Veneziana
8	Sombreamento + Vidro
9	Sombreamento + Veneziana
10	Vidro + Veneziana
11	Pintura + Sombreamento + Vidro
12	Pintura + Sombreamento + Veneziana
13	Pintura + Vidro + Veneziana
14	Pintura + Sombreamento + Vidro + Veneziana

A análise dos dados obtidos como saída da simulação realizada com o auxílio do EnergyPlus, foi feita por meio de métodos estatísticos. Os resultados foram apresentados considerando as médias dos valores das temperaturas operativas horárias registradas em cada ambiente de permanência prolongada (APP) ao longo do ano de referência simulado. Desta forma, obteve-se a temperatura operativa dos APPs na simulação sem estratégias (TO ini) e com estratégias (TO est), sendo esse segundo variando de acordo com a estratégia ou combinação utilizada. A apresentação dos resultados iniciou-se pela combinação de estratégias que apresentassem os melhores resultados, considerando a redução da temperatura operativa.

2.2 Materiais

Para alcançar os objetivos propostos foram utilizados seis materiais, quais sejam: 1) estação de trabalho; 2) espectrômetro de refletância; 3) *software* SketchUp; 4) *software* EnergyPlus; 5) arquivo climático e 6) *software* R.

A estação de trabalho caracteriza-se pelo equipamento computacional empregado para inserção de dados obtidos nos *softwares* que foram utilizados para a presente pesquisa bem como para a realização da simulação computacional. No que tange a coleta de dados, utilizou-se, adicionalmente, um equipamento portátil para se obter as informações referentes a absorvância das paredes externas existentes. Para tanto, utilizou-se o espectrômetro Alta II, da marca Vernier, que mede a radiação de 11 comprimentos de onda diferentes (de 470 a 940 nm), desses, 7 estão na zona visível e 4 na zona infra-vermelha. A verificação da refletância à radiação solar das superfícies externas da edificação ocorreu no mês de julho de 2019.

O *software* SketchUp versão gratuita make 2017 (TRIMBLE 2022), foi utilizado em conjunto com o *plug-in* Euclid (NREL 2022), versão 9.3, também gratuito, para gerar o modelo tridimensional termoenergético da edificação, objeto do presente estudo. Já o *software* EnergyPlus versão 8.6, distribuído gratuitamente pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE et al. [202-]), destinou-se à realização das simulações térmicas da edificação de referência, juntamente com um arquivo climático do tipo *Test Meteorological Year* - TMY, da cidade do Rio de Janeiro (LABEEE 2023), como *input*. Por fim, o *software* R versão R - Studio, de linguagem livre, destinou-se à realização de tratamentos estatísticos de dados numéricos (R FOUNDATION [202-]).

3. RESULTADOS

3.1 Resultados

A síntese dos resultados da simulação combinada das estratégias de Pintura + Sombreamento + Veneziana indicou que, considerando cada ambiente de forma isolada, a maior média de redução de temperatura foi de 12,9%, no quarto da unidade térrea. Já a menor média de redução de temperatura foi de 8,0%, na sala da unidade térrea.

Ao analisarmos as médias das temperaturas operativas dos ambientes das habitações considerando separadamente os andares de cobertura e térreo temos que, nas unidades, a média de redução da temperatura foi de 11,1%, valor próximo da média de redução da edificação, porém, o valor do desvio padrão reduziu para 1,2%. Já para as habitações do andar térreo, a média de redução de temperatura operativa foi menor do que aquela encontrada para a unidade de cobertura e, para o edifício, alcançando 10,1%. Contudo, o valor do desvio padrão encontrado para as unidades térreas ficou bem próximo daquele obtido para a edificação, 1,5%.

A partir dos resultados, foi realizada uma análise de variância ANOVA nos dados obtidos na simulação da combinação das estratégias Pintura + Sombreamento + Veneziana com o objetivo de verificar a significância da Cobertura (C) e do Térreo (T) na temperatura operativa dos ambientes. A Cobertura (C) e o Térreo (T) foram denominados fator Tipo.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados obtidos na ANOVA executada considerando os valores de temperatura operativa dos ambientes após a aplicação das estratégias Pintura + Sombreamento + Veneziana (TOest). Os resultados apontam que o Tipo foi significativo para os valores de temperatura operativa dos ambientes, uma vez que o p-valor encontrado foi inferior a 0,05. Tais resultados estão de acordo com o padrão encontrado na literatura, que aponta que construções próximas da cobertura possuem temperaturas internas mais elevadas devido à sua influência no ganho de calor. O mesmo fenômeno ocorre com construções situadas no térreo, mas nesse caso as temperaturas são mais baixas pela influência do solo. Vale destacar, que essa apuração difere daquela obtida nas análises estatísticas realizadas previamente à calibração do modelo.

Tabela 5 – ANOVA dados combinação de estratégias Pintura + Sombreamento + Veneziana

Categoria	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
tipo	1	20.892	20.892	141.3	1.05e-14***
Residuals	40	5.914	914 0.148		

Diante desse resultado, realizou-se o Teste de Tukey para confirmar a significância do fator Tipo na temperatura operativa dos ambientes. Considerou-se, então, os valores de temperatura operativa da simulação com aplicação das estratégias Pintura + Sombreamento + Veneziana (TOest). Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos neste teste, os quais confirmaram os resultados obtidos na análise de variância. Os resultados apontaram para uma

diferença estatística significativa entre as médias de temperatura operativa dos ambientes, ou seja, a posição da habitação no edifício foi significativa para os valores de temperatura operativa, exatamente como foi relatado na literatura.

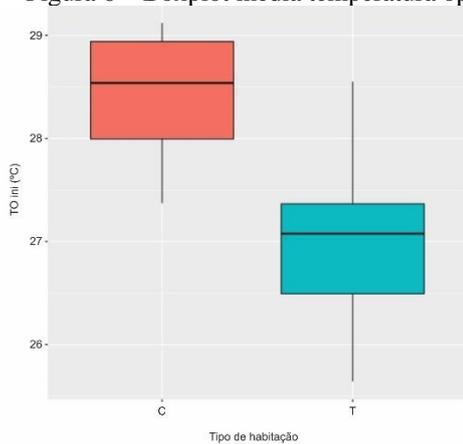
Tabela 6 – Teste de Tukey simulação com estratégias (TOest)

TOest groups		
C	26.44987	a
T	25.03930	b

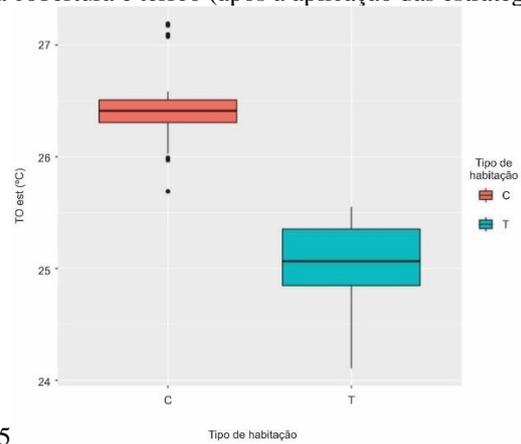
Dada a significância da posição da residência verticalmente junto ao edifício, térreo ou cobertura, realizou-se, em caráter complementar, uma comparação por meio de gráficos *boxplots* das temperaturas operativas da Cobertura (C) e do térreo (T), tanto no cenário prévio à aplicação das estratégias (TOini) quanto no cenário após a aplicação de Pintura + Sombreamento + Veneziana (TOest), conforme se observa nas Figuras 5 e 6. Sendo assim, foram representados, no eixo Y as temperaturas operativas em graus celsius (°C) e no eixo X os *boxplots* dos andares Térreo (T) - em azul, e Cobertura (C) - em laranja, assim como suas medianas.

Figura 5 – Boxplot média temperatura operativa cobertura e térreo (antes da aplicação das estratégias).

Figura 6 – Boxplot média temperatura operativa cobertura e térreo (após a aplicação das estratégias)



5



6

As temperaturas operativas do Térreo (T) caracterizam-se por serem mais baixas do que àquelas da Cobertura (C), nos dois cenários. Destaca-se que a dispersão dos valores da temperatura operativa média dos ambientes foi reduzida após a aplicação da estratégia Pintura + Sombreamento + Veneziana (TOest). Além disso, a mediana de temperatura reduziu para os dois tipos de ambientes ao passarmos do cenário (TOini) para o (TOest). Os principais resultados obtidos para as demais estratégias estão sintetizados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultado da aplicação das estratégias restantes (continua)

Estratégia simulada	Resultados extremos	Ambiente	TO ini (°C)	TO est (°C)	Redução (%)	Redução (°C)
Pintura	Maior	QT1B	28,6	25,5	10,8	3,1
	Menor	ST3	25,9	24,6	5,1	1,3
	Média		27,7	25,7	7,0	2,0
Sombreamento	Maior	CZC3	29,1	28,5	2,0	0,6
	Menor	QC2B	28,3	28,0	0,3	0,2
	Média		27,7	27,4	1,2	0,3
Vidro	Maior	CZC4	29,0	29,0	0,04 (aumento)	-0,01
	Menor	QT1A	26,5	26,5	0,01 (aumento)	-0,003
	Média		27,7	27,7	0,02 (aumento)	-0,01 (aumento)
Veneziana	Maior	CZC2	29,1	27,7	5,0	1,4
	Menor	QC1A	28,5	27,7	1,8	0,9
	Média		27,7	26,8	3,1	0,9
Pintura + Sombreamento	Maior	QT3A	27,4	25,2	11,7	2,1
	Menor	ST3	25,9	24,4	5,9	1,5
	Média		27,7	25,5	8,1	2,3
Pintura + Vidro	Maior	QT3A	27,4	25,5	10,8	1,9
	Menor	ST3	25,9	24,6	5,1	1,3
	Média		27,7	25,7	7,0	2,0
Pintura + Veneziana	Maior	QT3A	27,4	24,9	12,7	2,4
	Menor	ST1	25,9	23,9	7,7	2,0
	Média		27,7	24,8	10,3	2,9
Sombreamento + Vidro	Maior	CZC3	29,1	28,5	1,9	0,6
	Menor	QC2B	28,3	28,0	0,2	0,2
	Média		27,7	27,4	1,2	0,3
Sombreamento + Veneziana	Maior	CZC2	29,1	27,5	5,5	1,6
	Menor	QC2B	28,3	27,4	2,3	0,8
	Média		27,7	26,7	3,5	1,0
Vidro + Veneziana	Maior	CZC2	29,1	27,7	5,0	1,4
	Menor	QC1A	28,5	27,7	1,8	0,9
	Média		27,7	26,8	3,1	0,9
Pintura + Sombreamento + Vidro	Maior	QT3A	27,4	25,2	11,7	2,1
	Menor	ST3	25,9	24,4	5,9	1,5
	Média		27,7	25,5	8,1	2,2
Pintura + Vidro + Veneziana	Maior	QT3A	27,4	24,9	12,7	2,4
	Menor	ST1	25,9	23,9	7,7	2,0
	Média		27,7	24,8	10,3	2,9
Pintura + Sombreamento + Veneziana	Maior	QT1B	28,6	24,9	12,9	3,7
	Menor	ST3	26,0	23,8	8,3	2,1
	Média		27,7	24,8	10,6	3,0
Pintura + Sombreamento + Vidro + Veneziana	Maior	QT3A	27,4	24,9	12,9	2,5
	Menor	ST3	25,9	23,8	8,0	2,1
	Média		27,7	24,8	10,6	2,9

A estratégia individual responsável pela maior redução foi a Pintura com uma média de redução da temperatura operativa de 7,0%, o que corresponde a 2,0°C e desvio padrão de 1,3%. O maior valor de redução obtido foi de 10,8%, no Quarto B do andar térreo do apartamento de final 1 (voltado para oeste), QT1B. Enquanto que o menor valor de redução alcançado foi de 5,0%, na Sala do andar térreo do apartamento de final 3 (voltado para sul), ST3.

Já a estratégia individual que apresentou pior eficácia foi o Vidro, que proporcionou uma média de aumento da temperatura operativa da edificação de 0,02%. Para a Cozinha do apartamento de cobertura de final 4 (voltada para leste), CZC4, o aumento de temperatura

registrado foi de 0,04%. Já para o ambiente Quarto A, do andar térreo do apartamento de final 1 (voltado para oeste), QT1A, o aumento de temperatura registrado foi menor, 0,01%. A combinação de estratégias que apresentou melhor resultado foi Pintura + Sombreamento + Veneziana, com média de redução da temperatura operativa da edificação de 3,0°C.

3.2 Discussões

A adoção isolada das estratégias apresentou resultados diversos, três delas proporcionou a redução da média da temperatura operativa da edificação, enquanto que uma gerou o aumento da média. A estratégia Pintura apresentou o melhor resultado. Além disso, trata-se de uma estratégia que envolve custo baixo e intervenção leve: execução da pintura da fachada exterior da edificação com tinta de cor clara e absorvância abaixo de 0,3.

Já a estratégia Veneziana apresentou o segundo melhor resultado individual, com redução de média da temperatura operativa da edificação de 3,1%, correspondente foi de 0,9°C, e desvio padrão de 0,8%. Tal redução pode ser obtida a partir da instalação de venezianas nas aberturas da edificação, trata-se um processo de baixo custo e intervenção inexistente, uma vez que trata-se apenas da aplicação do dispositivo junto à abertura.

Quanto a adoção da estratégia Sombreamento obteve-se 1,2% de média de redução de temperatura operativa da edificação, com desvio padrão de 0,3%. Este valor corresponde a uma redução de temperatura de 0,3°C, que pode ser obtida por intervenções leves de baixo custo, a partir da construção de dispositivos de proteção solar como marquises e/ou elementos em balanço, criando sombra em cada abertura de janela da edificação.

No caso da aplicação da estratégia Vidro, os resultados obtidos não foram satisfatórios, já que apresentaram ganho mínimo de temperatura operativa nos ambientes de 0,02% e desvio padrão de 0,01%. O aumento de temperatura correspondente é de 0,01°C. A aplicação desta estratégia consiste na instalação de vidros de 6mm ao invés dos vidros de 4mm como especificado no projeto original, o que envolve baixo custo e intervenção inexistente, uma vez que envolve apenas a troca do vidro da esquadria das aberturas. Todavia não se mostrou uma estratégia eficaz para a melhoria do desempenho energético da edificação.

Além disso, a estratégia Vidro, na presente pesquisa, caracterizou-se como desaconselhada, devido ao custo do aumento da espessura da peça. Cabe investigar outros tipos de estratégias envolvendo o uso de vidros e identificar o benefício de sua aplicação, independente do custo da mesma. A literatura demonstra pesquisas que obtiveram vantagens no uso de vidros duplos, triplos, e até mesmo amostras de alta performance.

Com o intuito de verificar se a aplicação de cada estratégia individualmente se mostra significativa para os valores de temperatura operativa obtidos, foi realizada uma análise de variância ANOVA, sintetizada na Tabela 8. Os resultados encontrados apontam que a Estratégia foi significativa para os valores de temperatura operativa da edificação, uma vez que o p-valor encontrado foi inferior a 0,05. Desse modo, comprovou-se que a aplicação de estratégias construtivas é relevante no aprimoramento do desempenho energético da edificação objeto de estudo.

Tabela 8 – ANOVA com interação dos dados obtidos (estratégias individuais)

Categoria	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Estratégia	4	113.5	28.376	32.06	<2e-16***
Residuals	205	181.5	0.885		

A partir do resultado obtido, a significância do fator estratégia na temperatura operativa da edificação, foi analisada pelo Teste de Tukey, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Teste de Tukey para a estratégias individuais

TOest groups		
TOest3	27.70608	a
TOini	27.69987	a
TOest2	27.37577	ab
TOest4	26.84404	b
TOest1	25.74459	c

Os resultados apresentados na Tabela 9 apontam que, primeiramente, não há diferença estatística significativa entre as médias entre Temperatura operativa sem a aplicação de estratégias (TOini), Temperatura operativa com aplicação da estratégia Vidro (TOest3), Temperatura operativa com aplicação da estratégia Sombreamento (TOest2). Tal resultado indica que não há diferença estatística significativa entre as médias dos valores de temperatura da edificação sem a aplicação de estratégias (TOini) e, com a aplicação individual da estratégia Vidro (TOest3) ou, da estratégia Sombreamento (TOest2). Dessa forma, a aplicação dessas estratégias individualmente não trouxe mudança estatística nas médias dos valores das temperaturas registradas e sua aplicação não se faz viável para otimizar a demanda por ar condicionado na UH.

No caso da estratégia Sombreamento, porém, não há diferença estatística significativa entre as médias de temperatura operativa da edificação com aplicação da estratégia Sombreamento (TOest2) e, com aplicação da estratégia Veneziana (TOest4). Estas médias, ainda, diferem estatisticamente da Temperatura operativa sem a aplicação de estratégias (TOini), o que indica que a aplicação destas estratégias pode trazer mudança nos valores das médias de temperatura registrados e sua aplicação é justificável para o cumprimento do objetivo proposto.

Destaca-se que a Estratégia Sombreamento (TOest2) se encaixa nos dois cenários, a e b. Isso se deve, possivelmente, pelo fato da sua aplicação proporcionar uma redução na temperatura operativa da edificação. Contudo, essa redução é caracterizada por valores muito baixos, como destacado na Tabela 7.

No caso de TOest1 (Temperatura operativa com aplicação da estratégia Pintura), há diferença estatística significativa entre suas médias de temperatura operativa da edificação e as médias de temperatura operativa de TOini (Temperatura operativa sem a aplicação de estratégias), TOest2 (Temperatura operativa com aplicação da estratégia Sombreamento), TOest3 (Temperatura operativa com aplicação da estratégia Vidro) e TOest4 (Temperatura operativa com aplicação da estratégia Veneziana). Tal fato indica que a aplicação da estratégia Pintura proporciona a maior redução significativa de temperatura entre todas as estratégias avaliadas pelo Teste de Tukey. Esta avaliação está alinhada com os valores apresentados na Tabela 7, na qual é indicado que das estratégias aplicadas individualmente, a estratégia Pintura foi a que apresenta melhor resultado.

Vale ressaltar que além de apresentar o melhor resultado, a estratégia também apresenta custo potencialmente mais baixo e facilidade de aplicação, uma vez que, como descrito, sua intervenção é leve, tratando-se apenas da troca de acabamento exterior da edificação. Desse modo, além de proporcionar a redução da temperatura operativa da edificação, a estratégia se encaixa nos fatores limitadores de aplicação junto a edificações MCMV faixa 1.

Conforme se observa na Tabela 7, a combinação de estratégias que apresentou a maior média de redução de temperatura operativa, foi aquela que abrange Pintura + Sombreamento + Veneziana. A redução alcançada foi proporcionada em aproximadamente 66,5% pela estratégia Pintura e os 33,5% pelas estratégias Sombreamento e Veneziana combinadas, uma vez que as duas utilizam do artifício sombra para atuarem sobre a edificação.

O resultado da combinação de estratégias Pintura + Veneziana foi próximo do melhor resultado obtido, consistindo em uma média de redução de temperatura operativa da edificação de 10,3%, o que corresponde a 2,9°C. Tal redução foi proporcionada em aproximadamente 70% pela estratégia Pintura e, 30% pela estratégia Veneziana.

No caso da combinação de estratégias Pintura + Sombreamento a média de redução da temperatura operativa da edificação foi de 8,1%, correspondendo a 2,3 °C. A contribuição de cada uma delas para a redução da temperatura foi de 86% e 14% da estratégia de Pintura e de Sombreamento, respectivamente, considerando o valor total da média de redução.

Já redução de temperatura operativa com a combinação de estratégias Sombreamento + Veneziana foi de 3,5%, o que corresponde a 1,0°C. Vale destacar que neste caso trata-se da combinação de duas estratégias que fazem uso de elementos de sombra para reduzir a temperatura interna da edificação, e a sua combinação reduziu um valor pequeno considerando-se o custo benefício da aplicação de duas estratégias.

Vale ressaltar que a estratégia Pintura, em todas as combinações em que foi utilizada, Pintura + Sombreamento, Pintura + Veneziana e Pintura + Sombreamento + Veneziana, contribuiu com mais de 60% do total dos valores de média de redução de temperatura alcançados em cada uma delas. Recordando que, individualmente, a estratégia Pintura caracterizou-se como a estratégia construtiva que proporcionou maior média de redução de temperatura operativa da edificação.

No caso das combinações de estratégias que envolvem a estratégia Vidro, sua avaliação foi feita separadamente uma vez que a adoção desta estratégia gerou o aumento da temperatura em todos os cenários nos quais foi adotada. Assim, mesmo que outras estratégias construtivas (Pintura, Sombreamento ou Veneziana) façam parte da combinação de estratégias em questão e, tenham colaborado com resultados de redução de temperatura, o uso da estratégia Vidro, gera aumento da temperatura, fato que, automaticamente, descarta esta combinação do rol de estratégias passíveis de aplicação junto à edificação selecionada.

Destaca-se que, o aumento da média de temperatura operativa na aplicação individual da estratégia Vidro, foi uma característica definida neste trabalho, consistindo no uso de vidro de 6mm em substituição ao vidro 4mm, especificado em projeto. A aplicação de outros tipos de estratégias construtivas envolvendo o uso de vidros pode trazer resultados diferentes dos encontrados na presente pesquisa, como os encontrados na literatura apresentada na introdução deste manuscrito.

A partir dos resultados apresentados e, com o intuito de verificar se a aplicação das estratégias combinadas foi significativa para os valores de temperatura operativa obtidos, foi realizada uma análise de variância ANOVA, conforme verifica-se na Tabela 10.

Tabela 10 - ANOVA com interação dos dados obtidos (estratégias combinadas)

Categoria	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Estratégia	10	518.9	51.89	82.55	<2e-16***
Residuals	451	283.5	0.63		

Os resultados apresentados na Tabela 10 apontam que a combinação de estratégias construtivas foi significativa para os valores de temperatura operativa da edificação, uma vez que o p-valor encontrado foi inferior a 0,05. Para confirmar a significância do fator Estratégia nos valores de temperatura operativa, foi realizado o Teste de Tukey, conforme se observa na Tabela 11.

Tabela 11 - Teste de Tukey para a estratégias individuais

TOest groups		
TOini	27.69987	a
TOest23	27.38142	ab
TOest34	26.84632	bc
TOest24	26.73400	c
TOest13	25.74864	d
TOest123	25.45446	d
TOest12	25.45095	d
TOest134	24.82349	e
TOest14	24.82293	e
TOest1234	24.76419	e
TOest124	24.75416	e

Os resultados apresentados na Tabela 11 indicam que não há diferença estatística significativa entre as médias dos valores de temperatura da edificação sem a aplicação de estratégias (TOini) e, com a combinação de estratégias Sombreamento + Vidro (TOest23).

Assim, a combinação de estratégias Sombreamento + Vidro (TOest23) não se mostrou viável para este estudo. Grosso modo, a redução de temperatura alcançada a partir de sua aplicação não justificaria os custos potenciais e o grau das intervenções envolvidos, uma vez que a média estatística de temperatura do edifício com a sua aplicação não se diferenciou da média estatística de temperatura do edifício sem a aplicação de estratégias (TOini).

No caso da TOest23 em comparação com a TOest34 (combinação de estratégia Vidro + Veneziana), não foi verificada diferença estatística significativa entre as suas médias de valores de temperatura. Estes resultados estão de acordo com as análises realizadas, uma vez a estratégia Vidro faz parte TOest23 (combinação de estratégias Sombreamento + Vidro) e TOest34 (combinação de estratégia Vidro + Veneziana) e, portanto, foram descartadas como passíveis de aplicação pelo aumento de temperatura causado pela estratégia Vidro.

As médias dos valores de temperatura da TOest34 em comparação com a TOest24 (combinação de estratégias Sombreamento + Veneziana) também não apresentou diferença estatística significativa. O resultado encontrado está alinhado com a análise realizada. Pela análise realizada, TOest34 (Combinação de estratégias Vidro + Veneziana) não é passível de aplicação, uma vez que utiliza a estratégia Vidro.

Além disso, como destacado, a análise aponta que o resultado obtido pela aplicação da combinação de estratégias Sombreamento + Veneziana (TOest24) não seria satisfatório, pois envolveria valores de redução de temperatura (menores do que 1°C) fato que não justificam os custos potenciais e o grau das intervenções envolvidos.

O Teste de Tukey realizado indica, portanto, que não há diferença estatística significativa entre as médias de temperatura de TOest13 (combinação de estratégias Pintura + Vidro), TOest12 (combinação de estratégias Pintura + Sombreamento) e TOest123 (combinação de estratégias Pintura + Sombreamento + Vidro).

Os últimos resultados obtidos pelo Teste de Tukey apontam, também, que não há diferença estatística significativa entre as médias de temperatura de TOest134 (combinação de estratégias Pintura + Vidro + Veneziana), TOest14 (combinação de estratégias Pintura + Veneziana), TOest1234 (combinação de estratégias Pintura + Sombreamento + Vidro + Veneziana) e TOest124 (Pintura + Sombreamento + Veneziana).

Destaca-se que, todas as combinações de estratégias cujos valores das médias de temperatura estão entre as duas classificações mais significativas do Teste de Tukey [resultados (d) e (e)], possuem Pintura. Além disto, dentre as combinações classificadas como as mais significativas pelo Teste de Tukey (e), todas possuem Pintura e Veneziana.

Assim, considerando o arranjo de combinações, aquelas mais significativas para média dos valores de temperatura operativa e, que não abrangem a estratégia Vidro, foram TOest14

(combinação de estratégia Pintura + Veneziana) e TOest124 (Pintura + Sombreamento + Veneziana).

A aplicação da combinação de estratégias Pintura + Sombreamento + Veneziana (TOest124) apresentou o melhor resultado de média de redução de temperatura, 10,6%. Porém, uma vez que não há diferença estatística significativa entre suas médias de temperatura e as médias de temperatura da aplicação da estratégia TOest14 (combinação de estratégia Pintura + Veneziana) e que, esta última envolve uma estratégia a menos do que a primeira, ou seja, menor custo potencial e menor grau de dificuldade de intervenção envolvidos, acredita-se que a TOest14 apresente a aplicação mais adequada ao objeto de estudo, em virtude da sua redução de temperatura, 10,3% (correspondente a 2,9°C), além do fator econômico e técnico construtivo serem determinantes para a tipologia de habitação de interesse social do programa MCMV faixa 1.

Ao compararmos os valores ora obtidos com a literatura, verifica-se o uso de estratégias ativas e que abrangeram mais do que apenas ações na construção, como, por exemplo, a troca da iluminação e instalação de sistemas fotovoltaicos. Outros pesquisadores obtiveram os seus resultados em função do consumo de energia e não da redução de temperatura.

Li et al. (2017) aplicaram diversas estratégias construtivas para o aperfeiçoamento da performance energética de um edifício comercial em clima quente e temperado, como a instalação de cobertura retrátil para o aproveitamento da luz natural, o uso de paredes verdes e a utilização de sistemas de iluminação com LED. Desta forma, obteve-se uma redução de 49,2% no consumo de energia da construção em comparação com outras edificações do entorno. As estratégias adotadas foram, portanto, ativas, com alto custo potencial de implantação além de implicam em um grau de intervenção mais drástico na edificação. Estas estratégias podem não ser adequadas ao objeto de estudo desta pesquisa (edificações MCMV), devido ao fator custo.

O trabalho de Fotopoulou et al. (2018) utilizou vidros duplos, elementos de sombreamento e vedações com isolamento térmico e obteve um aprimoramento de 51% no gasto energético no período do verão em uma edificação residencial multifamiliar. Apesar de ter trabalhado com elementos de sombreamento, as outras estratégias utilizadas envolveram custo potencialmente elevado e intervenção drástica, caracterizando, portanto, limitações para a adoção deste tipo estratégia na presente pesquisa.

4. CONCLUSÃO

As moradias populares tendem a seguir o mesmo padrão em todo o Brasil. Assim, os resultados ora apresentados apontam maneiras de aprimorar a eficiência energética dessas construções, sem a necessidade de reformas drásticas, reduzindo, conseqüentemente, o consumo de eletricidade dessas edificações referente ao uso de ar condicionado.

A definição das estratégias para o atendimento deste objetivo foi fundamentada na literatura, desde que envolvessem baixo custo e intervenções leves ou inexistentes para sua aplicação. Desta forma, definiu-se: 1) Pintura, 2) Sombreamento, 3) Vidro e 4) Veneziana.

Considerando as cidades brasileiras mais urbanizadas e desconfortáveis termicamente, considerou-se que o pior cenário estaria localizado na zona bioclimática 8. Desta forma, a edificação de referência consistiu em um conjunto habitacional MCMV, faixa 1, localizado na cidade do Rio de Janeiro (Parque Carioca), com sistema de ar condicionado de janela nos dormitórios. Os dados de consumo de energia coletados por meio de visita *in loco* foram analisados estatisticamente e os seus resultados indicaram que as habitações voltadas para a Oeste apresentaram consumo de energia mais significativo do que aquelas nas outras direções. Além disso, os meses de dezembro a março caracterizam-se como meses mais

significativos no consumo de energia do que o restante dos meses do ano. Ademais, os dados de consumo de energia foram utilizados para realizar a calibração do modelo da edificação de referência. A partir deste arquivo testado, as estratégias construtivas selecionadas foram aplicadas em simulações computacionais, de forma individual e combinada.

Os dados obtidos foram analisados por meio da aplicação de métodos estatísticos. Desta forma foi possível concluir que a melhor combinação de estratégias para ser aplicada nas edificações das residências do Condomínio 2 do seria a Pintura + Veneziana, a qual obteve uma média redução de temperatura operativa de 2,9°C.

A estratégia Pintura mostrou contribuição eficaz em todas as combinações das quais fez parte, sendo responsável por mais de 60% do total dos valores de redução de temperatura obtidos. Desse modo, uma vez que o fator custo é considerável no cenário estudado, a aplicação apenas da estratégia Pintura seria uma opção viável, uma vez que geraria resultados significativos, com médias de redução de temperatura de 7,0%, o equivalente a 2,0°C.

O uso da estratégia Vidro, no cenário utilizado na presente pesquisa (aumento de espessura) se mostrou prejudicial para o consumo de energia, uma vez que acarretou o aumento da temperatura operativa da zona. Outras estratégias utilizando vidros devem ser testadas, levando em consideração o fator custo, para averiguar o benefício de sua aplicação em casos semelhantes e, com limitação de orçamento.

As estratégias Sombreamento e Veneziana utilizam a sombra como artifício para reduzir a temperatura interna da edificação. Apesar de partirem do mesmo princípio, a estratégia Sombreamento exige maiores custos iniciais e intervenção de instalação mais complexa do que a Veneziana. Por outro lado, seus resultados de média de redução de temperatura foram inferiores aos obtidos pela estratégia Veneziana. A primeira apresentou média de redução de temperatura de 1,2%, ao passo que para a segunda tal média foi de 3,1%. Assim, dada a diferença potencial de custo, a primeira não se mostrou vantajosa em comparação com a segunda para aplicação no presente estudo.

O ideal seria considerar na fase da concepção de projeto a relação com o clima e, possíveis estratégias de mitigação com gastos com ar condicionado para a manutenção das condições mínimas de conforto térmico no ambiente. Todavia, para as edificações existentes, parcela significativa do patrimônio edificado, se faz necessário compreender o seu desempenho energético e possíveis alternativas para otimizar este tipo de demanda energética. Assim, neste contexto, esta pesquisa contribui para explicitar as estratégias aplicáveis mais significativas para moradias existentes ou mesmo em projetos arquitetônicos futuros, que possam impactar positivamente no consumo de eletricidade referente ao uso de ar condicionado, em contextos climáticos no qual o uso deste tipo de equipamento se faça necessário. Adicionalmente, pesquisas posteriores poderão contribuir para ampliar a conhecimento sobre o impacto e o custo potencial destas ou demais estratégias projetuais em residências climatizadas, possibilitando, assim, a proposição de uma metodologia para *benchmarking* para esta tipologia. Ademais, pode-se, ainda, avaliar o potencial de crescimento da demanda energética desta tipologia em cenários futuros, considerando as mudanças climáticas. Outros fatores significativos, também, poderão ser identificados no consumo eletricidade, uma vez que o resíduo da análise de variância ANOVA ora apresentada indicou a existência de fatores que não foram tratados. Por fim, outras estratégias construtivas e alternativas visando otimizar a performance energética de moradias com uso de ar condicionado também poderão de identificadas e investigadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores desse trabalho agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET MG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio durante a realização dessa pesquisa.

5. REFERÊNCIAS

BATAINEH, K.; ALRABEE, A. Improving the Energy Efficiency of the Residential Buildings in Jordan. *Buildings*, v. 8, n. 7, p.01-16, 2018. <https://doi:10.3390/buildings8070085>

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Balanco Energético Nacional 2022: Ano base 2021**. Rio de Janeiro: EPE, 2021, 292p.

_____. **Cenários de Demanda para o PNE 2050**. Rio de Janeiro: EPE, 2018, 34p.

CASQUERO-MODREGO, N.; GOÑI-MODREGO, M. Energy retrofit of an existing affordable building envelope in Spain, case study. *Sustainable Cities and Society*, v. 44, p.395–405, 2019. <https://doi:10.1016/j.scs.2018.09.034>

DE OLIVEIRA, Fernanda Mourão Dutra **Avaliação do impacto de estratégias arquitetônicas de baixo custo sobre o desempenho termoenergético em edificações de interesse social no Rio de Janeiro**. 2020. Dissertação (Mestrado). 164f. Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2020.

CARVALHO, Gustavo Dambiski Gomes; SOKULSKI, Carla Cristiane; SILVA, Wesley Vieira; CARVALHO, Hélio Gomes; MOURA, Rafael Vignoli; FRANCISCO, Antonio Carlos; VEIGA, Claudimar Pereira. Bibliometrics and systematic reviews: A comparison between the Proknow-C and the Methodi Ordinatio. *Journal of Informetrics*, v. 14, Issue 3, p. 101043, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2020.101043>.

ELETROBRAS. **Pesquisa de posse e hábitos de uso de equipamentos elétricos na classe residencial**. Rio de Janeiro: Eletrobras / Procel, 2019, 358p.

FOTOPOULOU, A.; SEMPRINI, G.; CATTANI, E.; SCHIHIN, Y.; WEYER, J.; GULLI, R.; FERRANTE, A. Deep renovation in existing residential buildings through façade additions: A case study in a typical residential building of the 70s. *Energy and Buildings*, v. 166, p.258–270, 2018. <https://doi:10.1016/j.enbuild.2018.01.056>

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO – FJP. **Déficit habitacional e inadequação de moradias no Brasil: Principais resultados para o período de 2016 a 2019**. Belo Horizonte: FJP, 2021, 51p.

_____. **Ensaio e discussões sobre o déficit habitacional no Brasil** / organizado por Eleonora Cruz Santos. Belo Horizonte: FJP, 2022, 478p.

GERALDI, M. S; GNECCO, V. M; BARZAN NETO, A; MARTINS, B. A M; GHISI, E; FOSSATI, M; MELO, A. P; LAMBERTS, R. Evaluating the impact of the shape of school reference buildings on bottom-up energy benchmarking. *Journal of Building Engineering*, v. 43, 103142, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103142>

GERALDI, M. S; MELO, A. P; LAMBERTS, R; BORGSTEIN, E; YUKIZAKI, A. Y. G; MAIA, A. C. B; SOARES, J. B; DOS SANTOS JUNIOR, A. Assessment of the energy consumption in non-residential building sector in Brazil. *Energy and Buildings*, v. 273, 112371, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112371>

GUI, X.; MA, Y.; CHEN, S.; GE, J. The Methodology of Standard Building Selection for Residential Buildings in Hot Summer and Cold Winter Zone of China Based on Architectural Typology. **Journal of Building Engineering**, v. 18, p.352-359, 2018. <https://doi:10.1016/j.jobe.2018.04.006>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Áreas urbanizadas do Brasil - 2019**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES - LABEÉE. **Downloads** – Arquivos Climáticos. Florianópolis: LABEÉE, 2023. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>. Acesso em: 18 jan. 2022.

LI, Y.; REN, J.; JING, Z.; JIANPING, L.; ZHIJUN LV, Q. Y. The Existing Building Sustainable Retrofit in China - A Review and Case Study. **Procedia Engineering**, v. 205, p.3638-3645, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.224>

LIGHT. **Simulador de Consumo da Light**. Rio de Janeiro: LIGHT, 2012. Disponível em: <http://www.light.com.br/para-residencias/Simuladores/consumo.aspx>. Acesso em: 18 jan. 2022.

OZARISOY, Bertug; ALTAN, Hasim. Low-energy design strategies for retrofitting existing residential buildings in Cyprus. **Engineering Sustainability**, v. 172. Issue 5, p.241-255, 2019. <https://doi:10.1680/jensu.17.00061>

PEREIRA, A. R; HIRASHIMA, S. Q. S; OLIVEIRA, R. D. Utilização do espectrômetro Alta II para obtenção da absorvância solar de superfícies opacas. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 17(46), p.216-228, 2021. <https://doi.org/10.3895/rts.v17n46.9663>

THE R FOUNDATION - R. **The R Project for Statistical Computing**. Vienna: R Foundation, [202-]. Disponível em: <http://www.R-project.org>. Acesso em: 18 jan. 2022.

THE NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY - NREL. **Bigladder software** - Downloads - Latest Version – Euclid. Golden, 2022. Disponível em: <https://bigladdersoftware.com/projects/euclid/>. Acesso em: 18 jan. 2022.

THE UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY - DOE; BUILDING TECHNOLOGIES OFFICE - BTO; THE NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY - NREL. **Building Design** - Energy Simulation Software. Washington: DOE; BTO; NREL, [202-]. Disponível em: <https://energyplus.net>. Acesso em: 18 jan. 2022.

TRIMBLE. **SketchUp** - Help Center - Downloading older versions. Sunnyvale: Trimble, 2022. Disponível em: <https://help.sketchup.com/pt-BR/downloading-older-versions>. Acesso em: 18 jan. 2022.

VELOSO, A. C. O; DE SOUZA, R. V. G; DOS SANTOS, F. N. Energy benchmarking for office building towers in mild temperate climate. **Energy and Buildings**, v. 222, 110059, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110059>

