

***VENTILAÇÃO POR MEIOS NATURAIS EM EDIFÍCIOS
ESCRITÓRIOS DE ALTO-PADRÃO PODE SER
ENERGETICAMENTE EFICIENTE E PROMOVER SAÚDE?***

Universidade Presbiteriana Mackenzie

Coordenadoria de Fomento à Pesquisa - Pró-reitoria de Pesquisa e
Pós-Graduação

Thiago Corrêa Guimarães¹
Apoio: *PIBIC Mackenzie*

Loyde Vieira de Abreu-Harbich
₂

Arquitetura e Urbanismo (FAU)

Arquitetura e Urbanismo (FAU) Conforto Térmico

<10388540@mackenzista.com.br >

<loyde.harbich@mackenzie.br>

RESUMO

A crescente dependência de sistemas de climatização artificial em edifícios envidraçados de alto-padrão tem elevado os desafios energéticos e climáticos. Este estudo avalia se a ventilação natural, em modo misto ou total, pode contribuir para a eficiência energética desses edifícios, ao mesmo tempo que gera impactos positivos na saúde dos ocupantes. A metodologia baseia-se na análise do desempenho térmico de um edifício corporativo em São Paulo a partir do levantamento in loco e simulações termo energéticas. Os resultados esperados incluem a investigação por um equilíbrio entre ventilação natural e HVAC para conforto térmico, diretrizes para otimização da ventilação natural e uma reflexão sobre os impactos do atual modelo arquitetônico na crise energética. A pesquisa contribui para compreender o papel da ventilação natural neste novo paradigma e para o desenvolvimento de políticas de eficiência energética e bem-estar ocupacional.

Palavras-chave: Ventilação natural. Eficiência energética. Conforto térmico. Arquitetura sustentável.

ABSTRACT

The increasing reliance on artificial climate control systems in high-standard glass-clad buildings has intensified energy and climate challenges. This study investigates whether natural ventilation, either in a mixed or full mode, can enhance the energy efficiency of such buildings while generating positive health impacts for occupants. The methodology includes the analysis of a corporate building in São Paulo using on-site data collection, and thermo-energetic simulations. The expected outcomes involve identifying an optimal balance between natural ventilation and HVAC for thermal comfort, defining strategies for its optimization, and reflecting on the impact of the current architectural model on the energy crisis. Furthermore, this study aims to understand the role of cross ventilation in this new paradigm and contribute to developing energy efficiency policies and occupational well-being, promoting healthier and more sustainable buildings.

Key Words: Natural ventilation. Energy efficiency. Thermal comfort. Sustainable architecture.

1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais o horizonte das grandes cidades é tomado por edifícios corporativos. Essas construções de grande porte têm como uso principal escritórios voltados à produção de capital informacional. Após o período da pandemia em 2020, os espaços de trabalho foram adaptados para que houvessem ambientes com estrutura que permitissem colaboração intensa, como área para reuniões presenciais, áreas para concentração, assim como o modelo de trabalho híbrido, acarretando numa economia de energia de até 50%, dependendo do estabelecimento (MANTESI, CHMUTINA; GOODIER, 2022). As principais alterações no modelo de trabalho e no espaço físico de trabalho permitiram a criação de ambientes que minimizassem as distrações e promovessem o bem-estar e alinhado às atividades do dia (APPEL-MEULENBROEK et al, 2022). É fundamental que a estrutura de climatização que atenda às necessidades e dimensões do edifício fornecendo conforto térmico e saúde.

Visando atender tamanha demanda, os sistemas de AVAC (aquecimento, ventilação e ar-condicionado) são amplamente utilizados, uma vez que houve uma preferência generalizada pela instalação de sistemas superdimensionados de maior potência (CHENARI, BEHRANG et al., 2022). Contudo, sua alta utilização promove um decaimento da saúde de seus funcionários a longo prazo, baixa eficiência energética e custo exacerbado. Pesquisas apontam que manter a temperatura ambiente entre 22 °C e 24 °C é ideal para o desempenho cognitivo em regiões de clima temperado ou frio, enquanto temperaturas abaixo de 18 °C elevam o risco de doenças respiratórias e cardiovasculares, temperaturas acima de 26 °C provocam fadiga, dificuldade de concentração e sintomas respiratórios, e extremos térmicos favorecem a sobrevivência de vírus como o da gripe e o SARS-CoV-2 (WOLKOFF; AZUMA; CARRER, 2021). No Brasil, pesquisas apontam que a temperatura ambiente interna entre 22 e 25° C pode contribuir para conforto, saúde e produtividade, especialmente diante das mudanças climáticas e do aumento das temperaturas extremas (VELOSO; SOUZA, 2024; WEN et al. 2023; GOHAR et al, 2025). Em ambiente de sala de aula, em cidades de clima quente como Goiânia, a temperatura considerada confortável pelos entrevistados foi de 26° C (ABREU-HARBICH et al. 2018), indicando a necessidade de adaptar a temperatura externa para a temperatura interna.

Viver e trabalhar em ambientes internos com temperatura interna elevada por longos períodos afeta a aclimação fisiológica das pessoas. Além disso, parece que a exposição prolongada a ambientes com temperatura interna elevada estável pode enfraquecer a adaptabilidade térmica das pessoas (YU et al. 2012). Assim também, o controle da ventilação,

com taxa mínima recomendada de 4 L/s por pessoa e ajustes conforme a carga de poluentes, é essencial para diluir contaminantes e melhorar a qualidade do ar. Salienta-se que as pessoas passam grande parte do tempo em escritórios, onde a qualidade dessas edificações é vital tanto para a manutenção da saúde dos usuários quanto para o controle do consumo energético (DE DEAR et al., 2015; MISHRA; RAMGOPAL, 2015). Em um cenário de aquecimento global, a climatização passou a ser também uma questão de saúde pública, mas seu alto consumo energético — responsável por cerca de 16% da energia mundial — agrava o problema, tornando fundamental que a arquitetura adote soluções eficientes que conciliem bem-estar e redução da dependência de climatização artificial

Promover a saúde, conforto e bem-estar no ambiente de trabalho é essencial para estimular o rendimento de um funcionário. Portanto, sistemas de ventilação híbrida, que combinem estratégias passivas e ativas, têm o potencial de melhorar a saúde dos ocupantes, reduzir o número de licenças médicas e aumentar a produtividade, ao mesmo tempo em que promovem ambientes termicamente confortáveis. Assim, a importância da saúde, conforto e bem-estar em escritórios não é apenas interessante do ponto de vista social, mas também estratégico e econômico. Diante disso, surge a seguinte questão: *seria possível que edifícios de escritórios de alto padrão utilizassem ventilação natural ou híbrida de maneira eficiente, conciliando a redução do consumo energético com o conforto térmico e a promoção de saúde?*

Acredita-se que edifícios de escritórios de alto padrão adotem ventilação natural ou híbrida com eficiência, desde que o projeto leve em conta o clima local, incorpore controles automatizados e avalie a qualidade do ar externo, garantindo o equilíbrio ideal entre eficiência energética, conforto térmico e promoção da saúde. O objetivo dessa pesquisa é avaliar se a ventilação natural, em modo misto ou total, pode contribuir para a eficiência energética desses edifícios, ao mesmo tempo que gera impactos positivos na saúde dos ocupantes.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Edifícios de escritórios de alto padrão podem adotar ventilação natural ou híbrida de forma eficiente, conciliando redução de consumo energético, conforto térmico e promoção da saúde, desde que haja projeto e controle adequados. A ventilação natural é capaz de garantir conforto térmico por até 90% do tempo de ocupação no verão, reduzindo significativamente o uso de ar-condicionado (Raji et al., 2019; Naili et al., 2023; Yu & Ho, 2024). Já os sistemas híbridos, que combinam ventilação natural e mecânica, mantêm o conforto e reduzem o consumo de energia,

especialmente quando aplicados em conjunto com controles inteligentes e envoltórias arquitetônicas eficientes (Gomis et al., 2020; Peng et al., 2022; Rabani & Petersen, 2023; Emmerich, 2006). Além da eficiência energética, há benefícios diretos à saúde e à qualidade do ar interno, com redução de CO₂ e partículas, promovendo o bem-estar dos ocupantes (Manga & Allen, 2021; Tognon et al., 2023). No entanto, em áreas urbanas poluídas, é necessária filtragem do ar ou operação restrita conforme a qualidade do ar externo (Da Graça & Martins, 2021).

A eficácia dessas soluções depende de fatores como clima, layout do edifício, orientação solar e controle das aberturas (Nasrollahi & Ghobadi, 2022; Raji et al., 2019; Schulze & Eicker, 2013). Sistemas híbridos demandam mecanismos avançados para alternar entre os modos natural e mecânico, e em casos de plantas muito profundas ou climas extremos, a ventilação natural isolada se torna insuficiente, sendo o modelo híbrido a opção mais recomendada.

Em síntese, a ventilação natural ou híbrida é viável e eficiente para edifícios de alto padrão, desde que o projeto leve em consideração o clima local, conte com automação no controle e avalie a qualidade do ar externo. Nesse contexto, os sistemas híbridos oferecem o melhor equilíbrio entre eficiência energética, conforto térmico e promoção da saúde.

A demanda mundial por energia elétrica vem crescendo gradativamente, impulsionada pelo aumento populacional e pelo aquecimento global. Entre 2013 e 2014, o consumo global cresceu 0,9% (BP, 2015); no Brasil, no mesmo período, o aumento foi de 2,9%, com projeção média de 4,1% ao ano até 2024 (EPE, 2015a; EPE, 2015b). Esse avanço é resultado da urbanização e das novas demandas energéticas, especialmente a climatização de ambientes internos frente às mudanças climáticas. Alterações nos padrões de ocupação do solo intensificam o aquecimento urbano e modificam hábitos de consumo energético.

O ar-condicionado é um dos principais responsáveis por esse cenário. Na União Europeia, até 40% da energia consumida por edifícios de escritórios provém de sistemas de climatização AVAC (Gruber et al., 2008), muitas vezes sem garantir conforto térmico. A eficiência energética e a qualidade ambiental dependem não apenas de fatores construtivos, mas também de aspectos fisiológicos e psicológicos relacionados à sensação térmica dos usuários. A adaptabilidade ao clima pode melhorar a percepção de conforto, gerar economia de energia e trazer benefícios à saúde (De Dear et al., 2015; Mishra & Ramgopal, 2015b).

No Brasil, o ar-condicionado representa cerca de 14% do consumo residencial, com crescimento anual de 5,4% (Letschert, 2019). Entre 2017 e 2022, o valor da TUSD passou de 180,74 MWh para 402,36 MWh, um aumento de 222,61% (ANEEL). Estima-se que 60% dos lares terão ao menos um aparelho até 2030, e que o consumo poderá crescer de 70% a 190% até 2100, dependendo do cenário de aquecimento global (Bezerra et al., 2021; Invidiata & Ghisi, 2016). No setor não residencial, como edifícios comerciais, o uso de ar-condicionado pode representar 19% a 36% do consumo total (Costa et al., 2022; Geraldi et al., 2022). Medidas como uso de equipamentos mais eficientes e revisão dos padrões mínimos de desempenho (MEPS) poderiam gerar economia de até 417 TWh até 2040. Nas cidades, o efeito de ilha de calor pode elevar em mais de 25% a demanda por resfriamento, como projetado para São Paulo (De Souza, 2024).

Globalmente, o setor de HVAC (aquecimento, ventilação e ar-condicionado) responde por 10% a 20% do consumo de energia, sendo o ar-condicionado o principal responsável em climas quentes (D'Agostino et al., 2020). Países como Índia, China, Indonésia, Nigéria, Paquistão, Brasil, Bangladesh e Filipinas já superam os EUA em demanda potencial de resfriamento, embora os EUA ainda liderem o consumo absoluto, com 400 TWh/ano (Bureau et al., 2019). Sem avanços significativos em eficiência, a demanda global por ar-condicionado poderá triplicar até 2050 (Letschert, 2019). Esse panorama reforça o crescimento da necessidade de climatização no Brasil e no mundo, agravado pelos efeitos das ilhas de calor urbanas.

3. METODOLOGIA

A metodologia consiste em:

- Descrição do clima de São Paulo, esclarecer o clima local e, portanto, entender as implicações deste no estudo dos projetos e cálculos;
- Seleção dos estudos de caso, caracterização das edificações através de projetos e informações técnicas utilizadas como estudo de caso;
- Coleta de dados de campo in loco, descrever os sensores utilizados, neste caso o nanodispositivo, para entender os limites e objetivos da aferição em um edifício.
- Cálculo do desempenho termo-energético por meio de simulação computacional simulando o cenário atual (com ar-condicionado), sistema híbrido (ventilação e ar-condicionado) e ventilação natural pela NBR 15575 – 2021.

- Desenvolver plano para sustentabilidade energética para o edifício selecionado a partir das análises de dados;

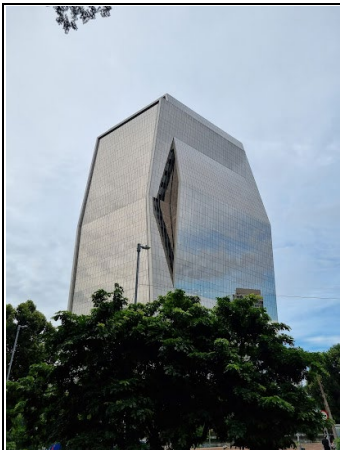
3.1. Clima de São Paulo

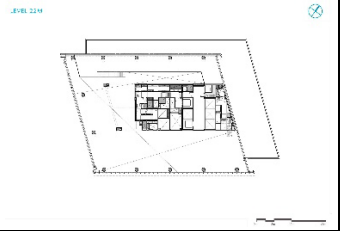
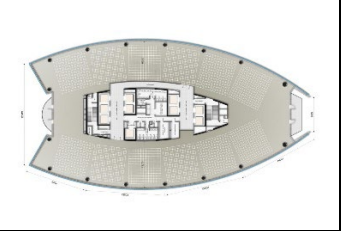
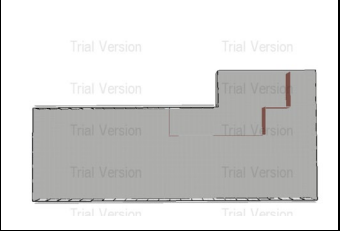
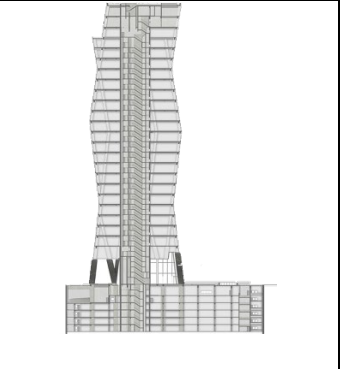
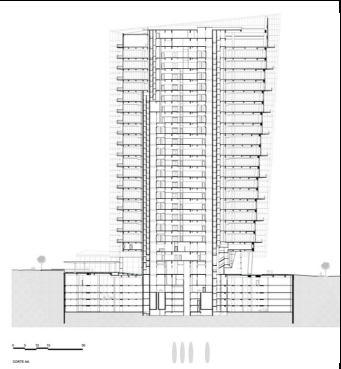
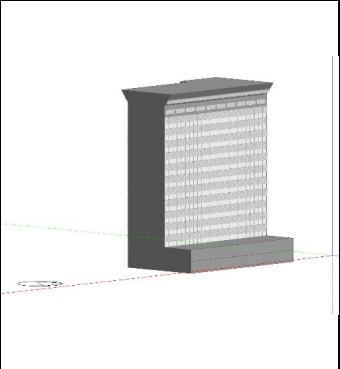
Considerando que São Paulo é uma cidade de clima subtropical úmido (Cfa; Koppen, 2006), o uso de ventilação natural como redução do gasto de energia para climatização de ambientes internos pode ser uma possibilidade. Segundo o Inmet (2021), a temperatura média anual é de 20,1° C, com temperatura máxima igual a 35,6° C e a mínima igual a 4,39° C. A umidade relativa do ar é de 68,3% ao longo do ano e a precipitação é bem distribuída, sendo outubro a março os meses que mais chove. A direção predominante do vento na cidade de São Paulo é sul/sul-sudeste, com o valor médio anual de 11 km/h. A radiação solar média é de 1402 kj/m².

3.2. Estudo de Caso

Nesta pesquisa foram selecionados três (3) edifícios em São Paulo, da Faria Lima Plaza, Infinity Tower Faria Lima e Edifício Porto Seguro em Campos Elísios (Tabela 1). Estes foram selecionados por se tratarem de edifícios corporativos com fachadas envidraçadas não móveis, que além de tornarem o estudo mais interessante, é uma característica muito comum em novos edifícios corporativos de alto padrão em São Paulo, tornando a pesquisa mais compatível com a realidade e possível de ser replicada.

Tabela 1 – Características dos edifícios selecionados em São Paulo

Característica	Faria Lima Plaza	Infinity Tower – Faria Lima	Porto Seguro
Foto			

Característica	Faria Lima Plaza	Infinity Tower – Faria Lima	Porto Seguro
Arquitetos	Kohn Pedersen Fox Associates – Hanna Kassem; KOM Arquitetura – Beatriz Krug Ometto, Nilene Falcão	Aflalo/Gasperini Arquitetos – Roberto Aflalo, Gian Carlo Gasperini, Luiz Felipe Aflalo Herman; Kohn Pedersen Fox Associates	Bonilha & Sancovski Arquitetos
Planta-Baixa			
Corte			
Materiais da Envolvória	Pele de vidro unitizada em alumínio estruturalmente colado; painéis deslocados com “fly-by”; lobby com vidro inclinado e aço inox	Cortina de vidro curva; brises externos em alumínio; granito brasileiro e madeira cumaru	Concreto aparente moldado in loco; vidro temperado/laminado pontual
Tipo de Vidro	SunGuard® Neutral Plus 50 com PVB bronze (alto desempenho)	Vidro curvo low-e de controle solar (padrão LEED Gold)	Vidro monolítico temperado/laminado transparente; brises metálicos
Planta Baixa	Dois volumes interligados; lajes amplas com núcleo central; 20 pavimentos tipo; 6 subsolos	Planta radial em gomos; núcleo central; lajes de 1.850 m² a 2.000 m²; terraços privativos; térreo com praça	Entrada sem recuo à rua com bloco de circulação ao fundo coberta por uma praça no 1º pavimento
Transmitância Térmica – U (W/m²·K)	~5,6	2,6 – 3,0*	~5,7
Fator Solar – G	0,45	0,28 – 0,35*	~0,75
Fonte Consultada	Surface Design – <i>Faria Lima Plaza</i> ; Papo Imobiliário – <i>Faria Lima Plaza</i>	Aflalo/Gasperini – <i>Infinity Tower</i> ; Galeria da Arquitetura – <i>Infinity Tower</i>	Revista Projeto – <i>Bonilha & Sancovski Arquitetos: Edifício Porto Seguro/Guaianases, São Paulo e Consulta ao acervo e visita in loco</i>

*Valores estimados com base em especificações típicas para vidros com desempenho equivalente, por ausência de ficha técnica pública oficial.

Fonte: autor com auxílio de IA (Copilot)

O edifício Faria Lima Plaza, projetado pelo escritório norte-americano Kohn Pedersen Fox Associates (arquiteta Hanna Kassem) em parceria com a KOM Arquitetura (Beatriz Krug Ometto e Nilene Falcão), é uma torre corporativa de padrão classe A que se destaca pelo sistema unitizado de pele de vidro em alumínio estruturalmente colado. Os painéis de vidro são

instalados em dois planos, criando deslocamentos e cantos com “fly-by” de 3 metros. O lobby apresenta vidro inclinado apoiado em estrutura metálica e painéis de aço inox, reforçando a sofisticação do térreo. O vidro especificado, SunGuard® Neutral Plus 50 com PVB bronze, oferece alto desempenho, com U-Value de aproximadamente $5,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e fator solar de 0,45, garantindo um equilíbrio entre controle de calor e iluminação natural. A planta baixa distribui dois volumes interligados, lajes amplas com núcleo central e 20 pavimentos tipo, além de 6 subsolos.

O edifício Infinity Tower – Faria Lima, projetado por Aflalo/Gasperini Arquitetos (Roberto Aflalo, Gian Carlo Gasperini e Luiz Felipe Aflalo Herman) em colaboração com a Kohn Pedersen Fox Associates, apresenta uma fachada curva imponente, toda em cortina de vidro de alto desempenho. Externamente, grandes brises em alumínio auxiliam no sombreamento, enquanto o embasamento e interiores combinam granito brasileiro e madeira cumaru. Embora as especificações exatas não sejam públicas, o padrão construtivo (certificação LEED Gold) indica vidro curvo low-e de controle solar, com U-Value estimado entre $2,6$ e $3,0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e fator solar entre 0,28 e 0,35. A planta baixa segue geometria radial em gomos, com lajes de 1.850 m^2 a 2.000 m^2 , núcleo central e terraços privativos, oferecendo grande flexibilidade de layout interno.

Já o Edifício Porto Seguro – Campos Elíseos, projetado por Bonilha & Sancovski Arquitetos, o conjunto arquitetônico da sede administrativa da Porto Seguro inclui dois edifícios: um envidraçado na Rua Guaianases e outro com brises na Avenida Rio Branco, construído na década 70. A fachada principal é composta por folhas de vidro ao longo de 50 metros de comprimento e 60 metros de altura, distribuídos em 15 andares de 1.550 m^2 cada.

Este foi um dos primeiros edifícios selecionados para estudo, permitindo visita técnica, coleta de dados e acesso ao custo anual de energia elétrica relacionado ao sistema HVAC. Com duas empenas cegas de concreto e fachada envidraçada com brises verticais voltada para nordeste, Seu desempenho térmico é compatível com vidro monolítico: U-Value de aproximadamente $5,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e fator solar de 0,75, o que exige que o conforto térmico seja obtido sobretudo por meio do sombreamento arquitetônico. A planta articula dois blocos — técnico e expositivo — conectados por uma praça pública, com circulação resolvida por rampas e escadas internas, reforçando o caráter cultural e comunitário do conjunto.

Para uma análise mais detalhada em simulação em computacional para analisar o percentual de conforto térmico e o consumo de energia do edifício, foi selecionado o Edifício

Porto Seguro em Campos Elísios na Avenida Rio Branco (figura 1), além de ser um dos primeiros edifícios escolhidos, foi o que após contato, permitiu visita, coleta de dados e acesso ao custo anual de energia elétrica decorrente do uso do HVAC.

Figura 3 – Carta de Insolação edifício Porto Seguro

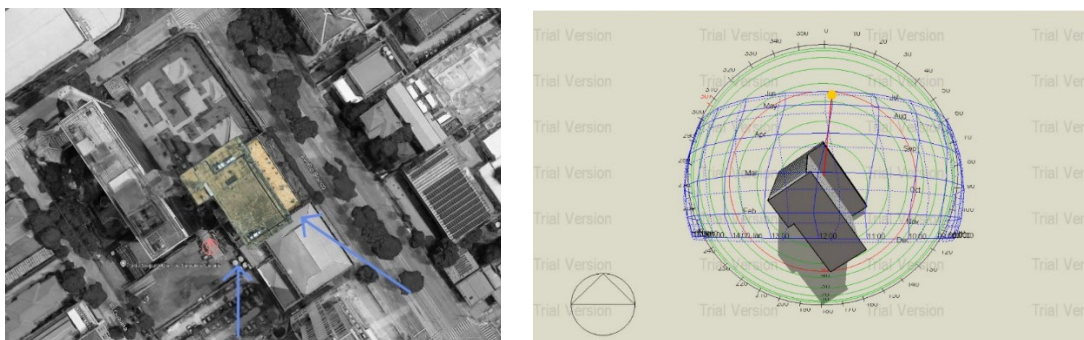


Figura 2 – Implantação do edifício Porto Seguro Matriz com norte, direção dos ventos e vista externa, horas de insolação (Fonte: Adaptado de Google Earth, 2023)

O edifício possui duas empenas cegas de concreto e uma fachada totalmente envidraçada com brises verticais, está orientada para nordeste e durante o solstício de inverno, possui exposição solar de 6:30 até 13:00, enquanto no solstício de verão, de 6:30 até 11:00. A área adotada por piso foi de 926,31 m² e área por piso da fachada envidraçada foi de 201,88 m² (2.200,68 m² total).

3.3. Coletas de dados de campo

A coleta de dados foi realizada exclusivamente no edifício “Porto Seguro Matriz”, devido às restrições de segurança dos demais prédios selecionados, que impossibilitaram o acesso livre. Mesmo com limitações, foi possível instalar um sensor para monitoramento térmico em uma sala de coworking voltada para a fachada leste — ambiente com boa circulação de pessoas e alta incidência solar. Foi empregado um Termo-higrômetro Digital HOBO Data Logger UX100-003 (Figura 1), que possui precisão de 0,21 °C em temperatura e 3,5% em umidade, configurado para registrar temperatura (°C) e umidade relativa do ar em intervalos de 10 minutos, durante 32 dias (20 de novembro a 22 de dezembro).

Inicialmente, foi considerada a utilização de um sensor Arduino desenvolvido pela Engenharia da Computação Mackenzie, em parceria com o setor de pesquisa em conforto térmico da

Arquitetura e Urbanismo. O dispositivo já havia sido testado em pesquisas anteriores e serviria como ferramenta comparativa para validação dos dados. No entanto, problemas técnicos inviabilizaram seu uso: o Arduino original foi danificado e o código-fonte perdido, exigindo reconstrução completa do equipamento. Como essa etapa não era central para os objetivos da pesquisa, optou-se por descontinuar o uso do sensor alternativo. Concluímos que esses equipamentos não são seguros para fazer a calibração de uma simulação termo-energética.

Figura 1- Dispositivo HOBO Temp RH Logger UX100-003



Fonte: Sigma Sensors

3.4 Cálculo do desempenho termo-energético

Com o intuito de combinar as características da envoltória do edifício para promoção de conforto térmico e eficiência energética, as normas brasileiras, descrevem metodologias para avaliar o desempenho térmico da envoltória de edificações habitacionais, tais como as NBR 15220 (ABNT, 2003) e NBR 15575 partes 4 e 5 (ABNT, 2013) e o Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações, PBE –NBR 15220, publicada pela ABNT em 2003, estabelece critérios de desempenho térmico passivo para edificações no Brasil, considerando parâmetros como transmitância térmica e capacidade térmica, além de orientar projetos conforme as zonas bioclimáticas. Para paredes externas, por exemplo, define limites máximos de transmitância térmica que variam de $3,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ em zonas mais quentes a $1,0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ em zonas frias, e valores mínimos de capacidade térmica de $130 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$ a $300 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$, de acordo com a região.

A NBR 15575-1:2021 é a norma brasileira mais atual para avaliação do conforto térmico em edificações residenciais. Ela considera a diversidade climática e construtiva do país e propõe critérios adaptáveis para diferentes regiões. Entre os indicadores introduzidos, destaca-se o Percentual de Horas em Conforto Térmico (PHFT), que quantifica o período em que o ambiente permanece dentro das faixas aceitáveis de temperatura e umidade para os ocupantes. A norma também adota modelos de referência distintos para cada zona bioclimática brasileira, ajustando as exigências conforme características climáticas e práticas construtivas regionais (Krelling et

al., 2023; Oliveira et al., 2015). As faixas de aceitabilidade térmica são estabelecidas com base em limites de temperatura interna que proporcionem sensação de conforto à maioria dos ocupantes, levando em consideração a adaptação térmica regional e padrões de uso. Essas definições dialogam diretamente com estudos sobre adaptação e percepção térmica no contexto nacional (Krelling et al., 2023; Oliveira et al., 2015).

Salienta-se que na ausência de uma norma específica para se calcular o desempenho térmico da envoltório para edifícios comerciais, utilizou-se a NBR 15575-1 -2021. A ISO 7730 e a ASHRAE 55 definem que para que este indivíduo esteja confortável, a Temperatura Operativa deverá estar entre 22 e 27 °C, desde que atendida a Umidade Relativa entre 40 e 60% e a velocidade do vento superior a 0,12 m/s e inferior a 0,24 m/s. (ASHRAE, 2010; ISO, 2005). Neste trabalho, os limites da temperatura de conforto basearam na seguinte equação (Fanger, 1976):

$$T_e = T_{bs} - (0.55 \times (1 - UR) \times (T_{bs} - T_{bu})) \quad (1)$$

Onde, T_e é temperatura efetiva; T_{bs} é Temperatura de Bulbo Seco; T_{bu} é Temperatura de Bulbo úmido; UR é Umidade Relativa. O limite considerados confortáveis nesse estudo foi de 20 a 25° C.

2.5 Simulações termo-energética

Para fazer uma simulação computacional termo energética será utilizado o software DesignBuilder, que emprega cálculos do EnergyPlus 6.0, versão 6.1.0.006 revisada em 2019. Nesse tipo de simulação é possível obter como dados de saída a Temperatura Operativa e assim calcular as horas de conforto obtidas ao longo do ano em diferentes cenários. Logo, é possível verificar, as alternativas que proporcionem maior eficiência energética e conforto térmico para a edificação.

O modelo de construção será projetado no próprio programa, com base em características construtivas do edifício descritas anteriormente. Os cenários analisados foram:

- (1) Edifício real com ar-condicionado, portas e janelas fechadas;
- (2) Edifícios real com brise, Ventilação Natural, portas e janelas abertas;
- (3) Edifício Real sem os brises, com janelas e portas abertas.

A etapa de simulação termoeenergética foi realizada no software DesignBuilder, modelando o edifício em três cenários distintos: (I) climatização artificial total, (II) climatização híbrida e (III) ventilação natural total. A tabela 1 apresenta os dados da envoltória do edifícios e tabela 3 apresenta dados sobre a utilização do edifício.

Tabela 2 - Parâmetros de Entrada do edifício – Simulações no DesignBuilder

Material	Espessura (m)	Condutividade Térmica (W/m ² .k)	Densidade (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.m)	Resistência Térmica (m ² .K/W)
Empena Concreto (parede)	0,30	3,871	2.400	880	0,258
Concreto laje maciça	0,15	2,929	2.250	850	0,341
Vidros Dupla camada	0,019	1,960	2.250	840	0,624

Tabela 3 - Parâmetros de Entrada da utilização do edifício – Simulações no DesignBuilder

Parâmetro	Cenário I	Cenário II	Cenário III
HVAC	VAV, Chiller resfriado a água, controle total de umidade	VAV, Chiller resfriado a ar, reinicialização por ar externo + modo misto	Ventilação natural, sem resfriamento, sem aquecimento
Atividade	Área de escritório	Área de escritório	Área de escritório
Densidade (pessoas/m ²)	0,25	0,25	0,25
Ventilação natural	Não	Sim / Ar externo 10 ac/h	Sim / Ar externo 10 ac/h
Aberturas	Vidro duplo, transparente – U = 1,960 W/m ² .K	Vidro duplo, transparente – U = 1,960 W/m ² .K / modo misto ativado	Vidro duplo, transparente – U = 1,960 W/m ² .K / modo misto
Controle de fluxo de ar	—	Fluxo: 0,8 m ³ /s.m / abertura 50%	Fluxo: 0,8 m ³ /s.m / abertura 50%

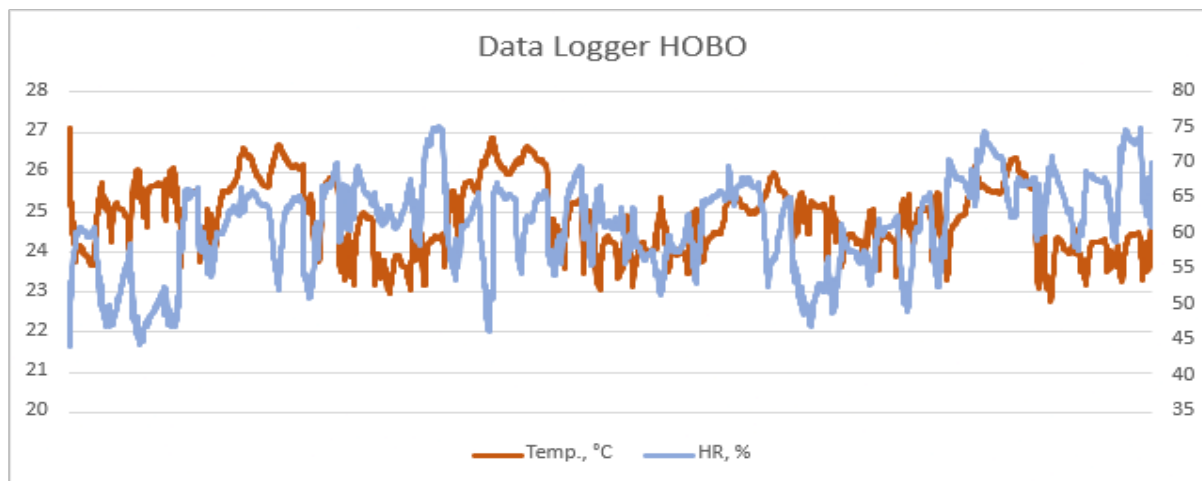
Fonte: autor com auxílio de IA (Copilot)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após 32 dias de monitoramento no edifício “Porto Seguro Matriz”, a temperatura interna variou entre 23°C e 27°C, com picos diários possivelmente causados pela incidência solar e circulação de pessoas. Apesar dessas oscilações, a maior parte do tempo permaneceu dentro da faixa de conforto térmico estabelecida pela ISO 7730 e a ASHRAE 55 (22°C a 27°C), em grande parte devido à regulação do sistema HVAC central. A umidade relativa do ar oscilou entre 45% e

75%, com picos inversamente proporcionais à temperatura, ultrapassando frequentemente o intervalo ideal de 40% a 60%, mas sem atingir níveis críticos acima de 80%.

Figura 2: Gráfico do conforto medido in loco



Fonte: autor

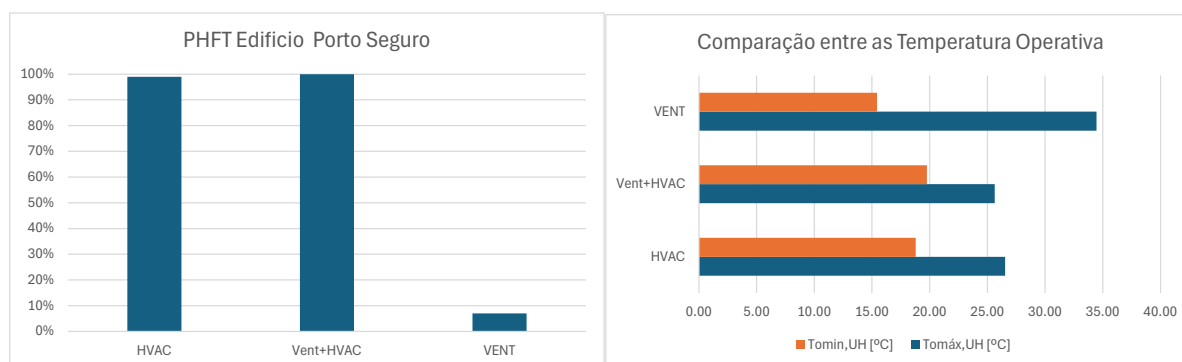
A figura 2 apresenta o monitoramento térmico e de umidade demonstrou condições estáveis, mesmo com variações cíclicas diárias. Os eventuais picos de temperatura e umidade podem comprometer o conforto quando acontecem, embora seja por um instante. A estabilidade geral era esperada visto que o edifício possui um complexo sistema de AVAC, com ar-condicionados gerais e potentes. A discussão que precisa ser feita é sobre o custo energético e o quanto a implementação de diferentes técnicas de ventilação poderia melhorar esse custo.

A figura 3 o percentual de horas confortáveis e o máximo e mínimo de temperatura operativa interna para cada situação analisada. A análise comparativa entre os sistemas de climatização HVAC, Vent+HVAC e NATVENT revelou diferenças significativas no desempenho térmico do edifício. O sistema Vent+HVAC apresentou o melhor resultado, com 100% de Percentual de Horas de Funcionamento Térmico (PHFT), seguido de perto pelo HVAC com 98,98%. Já a ventilação natural obteve apenas 53,58%, indicando menor eficiência em manter o conforto térmico.

Em termos de consumo energético para resfriamento (C_{gTR}), tanto o HVAC quanto o Vent+HVAC não apresentaram consumo (0,00 kWh), enquanto a ventilação natural registrou um valor negativo de -0,07 kWh, sugerindo ausência de demanda ou possível superdimensionamento. Para aquecimento (C_{gTA}), todos os sistemas apresentaram consumo nulo (0,00 kWh). A temperatura máxima observada foi mais baixa no sistema Vent+HVAC

(25,64 °C), seguida pelo HVAC (26,54 °C), enquanto a ventilação natural atingiu 34,45 °C, evidenciando maior exposição ao calor. A temperatura mínima foi mais estável no Vent+HVAC (19,76 °C), seguida pelo HVAC (18,79 °C), enquanto a ventilação natural apresentou o valor mais baixo (15,44 °C). O consumo total de energia térmica (CgTT) foi nulo nos sistemas HVAC e Vent+HVAC, enquanto a ventilação natural manteve o valor negativo de -0,07 kWh.

Figura 3– Percentual de Horas Confortáveis e o máximo e mínimo das temperaturas operativas por situação analisada



Fonte: autor

Quanto à classificação por níveis de desempenho, o sistema Vent+HVAC atendeu plenamente aos critérios mínimos, intermediários e superiores em todos os indicadores analisados, incluindo PHFT, temperaturas máxima e mínima, e consumo térmico total. Por outro lado, a ventilação natural não atendeu aos critérios mínimos nem intermediários para PHFT e temperaturas, embora tenha cumprido os requisitos energéticos para os níveis intermediário e superior no indicador CgTT.

A figura 4 apresenta os resultados obtidos pelas simulações computacionais por estações do ano. Foi considerado verão os resultados entre dezembro de fevereiro, outono, entre março e maio, inverno, entre junho e agosto, e primavera, entre setembro e novembro. A figura 5 apresenta o percentual de horas confortáveis (PHFT) para as estações do ano e períodos do dia. A análise comparativa entre os sistemas de climatização HVAC, HVAC com ventilação (HVAC+VENT) e ventilação natural (NATVENT) revelou variações significativas na eficiência térmica ao longo das estações e períodos do dia.

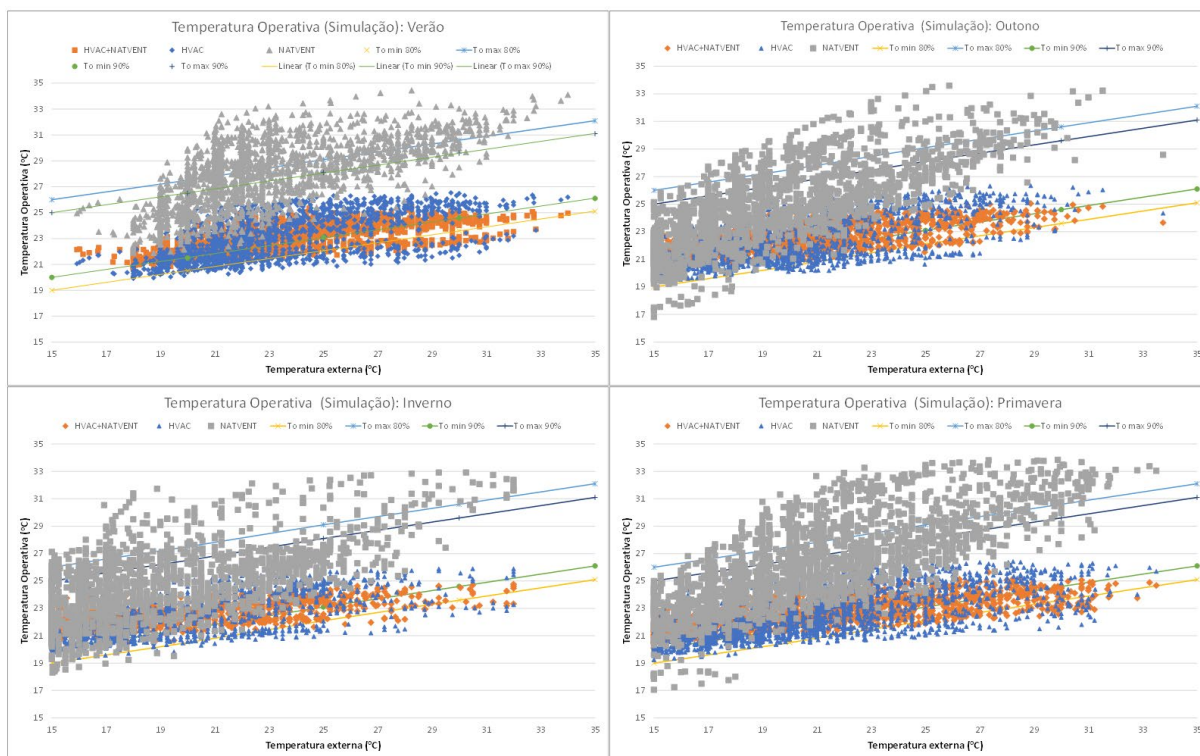
Pela manhã, os três sistemas apresentaram desempenho máximo no verão, com HVAC+VENT e NATVENT atingindo 100% de PHFT, enquanto HVAC ficou ligeiramente abaixo, com 97,67% de PHFT. No outono, HVAC teve desempenho mais baixo (67,50%) de

PHFT, enquanto HVAC+VENT alcançou 96,23% e NATVENT 77,55%. No inverno e primavera, os valores foram semelhantes, com HVAC em torno de 73%, HVAC+VENT acima de 95% de, e NATVENT mantendo-se próximo de 72%.

Durante a tarde, HVAC obteve os melhores resultados no verão (99,84%) de, seguido por HVAC+VENT (97,46%), enquanto NATVENT caiu para 47,38%. No outono, HVAC e HVAC+VENT mantiveram alta eficiência (93,88% e 97,96%, respectivamente), com NATVENT em 77,55%. No inverno, HVAC registrou 88,66%, HVAC+VENT chegou a 98,91%, e NATVENT permaneceu em 72,36% de. Na primavera, HVAC e HVAC+VENT mantiveram altos índices (98,91% e 94,25%), enquanto NATVENT ficou em 50,15% de.

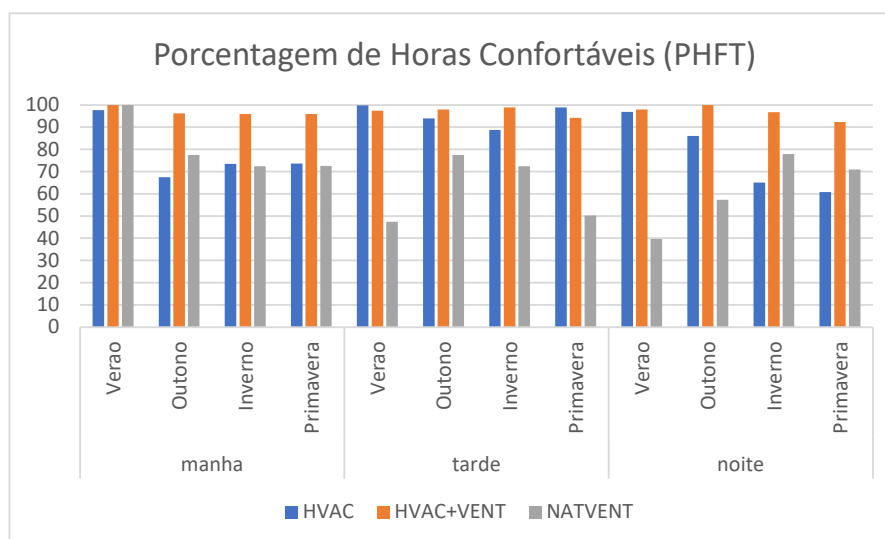
À noite, os resultados mostraram maior variação. No verão, HVAC atingiu 96,83%, HVAC+VENT 97,93%, e NATVENT caiu para 39,72%. No outono, HVAC+VENT foi o único a alcançar 100%, com HVAC em 86,03% e NATVENT em 57,30%. No inverno, HVAC teve 65,06%, HVAC+VENT 96,74%, e NATVENT subiu para 77,95%. Na primavera, HVAC caiu para 60,71%, HVAC+VENT ficou em 92,39%, e NATVENT atingiu 70,96%.

Figura 4 – Resultados pelo modelo adaptativo RTC.



Fonte: Autor

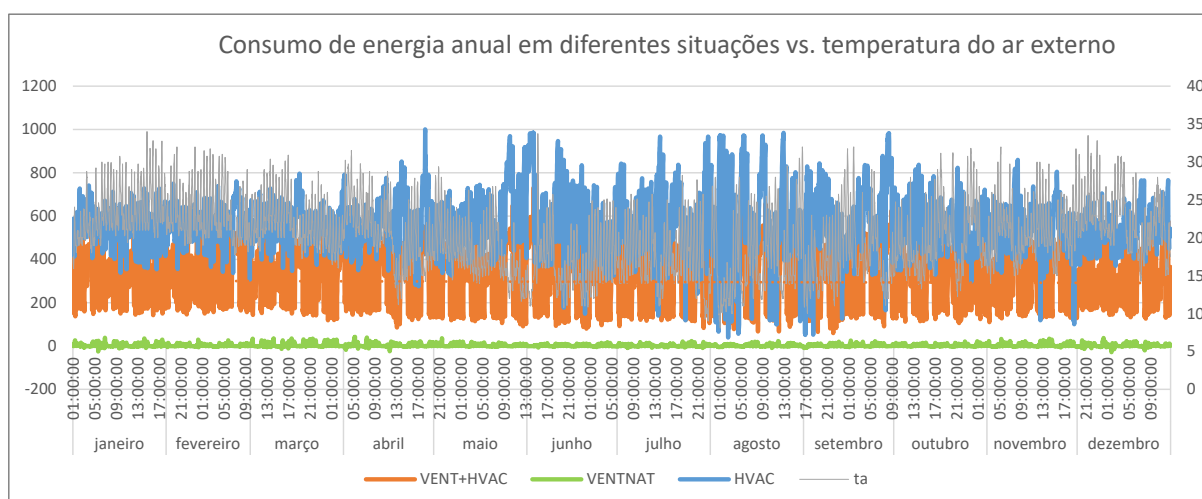
Figura 5 – Percentagem de Horas confortáveis ao longo do ano e por período.



Fonte: Autor

O primeiro cenário a ser discutido será a (I) climatização artificial total, que está mais próximo da realidade atual do edifício Porto Seguro Matriz. Durante um ano com climatização artificial total, a temperatura varia com mínimas e picos de 20°C a 25°C, limite confortável e equilibrado, o que é esperado dada a utilização total de sistemas artificiais. Já o gasto energético de climatização anual simulado foi 4.937.276,10 KWh, o que difere do valor cedido à pesquisa pela própria porto seguro, que foi de 717.612,28 kWh, decorrente provavelmente de um uso de um sistema mais eficiente que o escolhido, que não altera a importância do dado simulado, visto que a pesquisa tem seus próprios parâmetros dentro de si e a importância. reside na proporcionalidade dos resultados para serem replicados. (figura 6)

Figura 6 – Consumo de energia anual comparado com a temperatura do ar externo



Fonte: Autores

O segundo cenário a ser discutido será a (II) climatização híbrida, de grande relevância para a comparação com o cenário (I). A temperatura varia com mínimas e picos de 16°C a 25°C, um range que possui momentos de desconforto, principalmente no inverno, quando essas mínimas são atingidas. O gasto energético de climatização anual simulado foi 2.598.444,20 KWh.

O terceiro cenário a ser discutido será (III) ventilação natural total, para efeito de comparação e observar, neste estudo, a diferença de temperatura, e, portanto, no conforto térmico gerada pelo sistema de climatização, mesmo com hipóteses prévias de seus picos de desconforto. A temperatura varia com mínimas e picos de 16°C a 34°C, um range que possui extremos muito desconfortáveis, mas períodos aceitáveis durante outono e inverno.

5. CONCLUSÃO

Esse artigo analisou o desempenho térmico de um edifício e o consumo de energia baseado nas horas de conforto proporcionado em diferentes situações, com ar-condicionado, com ventilação natural e ar-condicionado e ventilação natural. Observa-se que há crescente dependência de sistemas de climatização artificial em edifícios envidraçados de alto-padrão tem elevado os desafios energéticos e climáticos. No entanto, estudos apontam que a utilização de sistemas híbridos além de economizar energia, pode trazer tanto conforto térmico como melhores condições de saúde aos usuários.

Conclui-se que o sistema Vent+HVAC apresentou o melhor desempenho térmico, garantindo 100% de horas confortáveis e temperaturas operativas estáveis, seguido pelo HVAC com 98,98%. A ventilação natural, embora energeticamente eficiente, mostrou-se limitada em conforto, com apenas 53,58% de horas dentro da faixa ideal e temperaturas extremas. O monitoramento real confirmou a eficácia do sistema HVAC em manter a temperatura entre 23°C e 27°C, dentro dos padrões normativos.

Além de ter apresentado melhor desempenho térmico, o sistema híbrido também foi mais eficiente. O custo operacional anual de climatização no cenário I foi de 4.937.276,10 KWh, enquanto o custo anual do sistema híbrido foi de 2.598.444,20 KWh, o que reflete uma economia de energia de 52%, e assumindo um custo de 0,70 R\$ por KWh, esses custos seriam respectivamente 3.456.093,27 R\$ (I), 1.818.910,94 R\$ (II), e sua economia 1.637.182,33 R\$.

Dessa forma, a ventilação por meios naturais em edifícios escritórios de alto-padrão pode sim ser energeticamente eficiente e promover saúde se combinadas a sistemas híbridos de climatização.

Para trabalhos futuros, recomenda-se investigar soluções híbridas e estratégias passivas que possam reduzir o consumo energético sem comprometer o conforto térmico, bem como servir de parâmetros para desenvolvimento de normas, bem como entrevistas com usuários para melhor adequação dos parâmetros.

6. REFERÊNCIAS

- ABNT -ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais*. NBR 15575-1. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- APPEL-MEULENBROEK, R.; KEMPERMAN, A.; VAN DE WATER, A.; WEIJS-PERRÉE, M.; VERHAEGH, J. How to attract employees back to the office? A stated choice study on hybrid working preferences. *Journal of Environmental Psychology*, [S. l.], 2022.
- BEZERRA, P.; DA SILVA, F.; CRUZ, T.; MISTRY, M.; VASQUEZ-ARROYO, E.; MAGALAR, L.; CIAN, E.; LUCENA, A.; SCHAEFFER, R. Impacts of a warmer world on space cooling demand in Brazilian households. *Energy and Buildings*, [S. l.], v. 234, p. 110696, 2021.
- BIARDEAU, L.; DAVIS, L.; GERTLER, P.; WOLFRAM, C. Heat exposure and global air conditioning. *Nature Sustainability*, [S. l.], v. 3, p. 25–28, 2019.
- COSTA, M.; FREIRE, M.; DA SILVA, K.; FREIRES, F. Analysis of Energy Consumption Related to the Use of Air Conditioning in University Buildings in a Tropical Climate. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, [S. l.], 2022.
- D'AGOSTINO, D.; GRECO, A.; MASSELLI, C.; MINICHIELLO, F. The employment of an earth-to-air heat exchanger as pre-treating unit of an air conditioning system for energy saving: A comparison among different worldwide climatic zones. *Energy and Buildings*, [S. l.], v. 229, p. 110517, 2020.
- DE MELO, C.; DA CUNHA, K.; SUÁREZ, G. MEPS for air conditioners in Brazil: Regulatory developments and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S. l.], 2022.
- DE SOUZA, C. Quantitative Analysis of the Impact of Urban Heat Island Intensity on Air Conditioning Energy Consumption in São Paulo. *Journal of Progress in Engineering and Physical Science*, [S. l.], 2024.

- GERALDI, M.; MELO, A.; LAMBERTS, R.; BORGSTEIN, E.; YUKIZAKI, A.; MAIA, A.; SOARES, J.; SANTOS, A. Assessment of the energy consumption in non-residential building sector in Brazil. *Energy and Buildings*, [S. l.], 2022.
- GIBSON, C.; GILSON, L.; GRIFFITH, T.; O'NEILL, T. Should employees be required to return to the office? *Organizational Dynamics*, [S. l.], v. 52, p. 100981, 2023.
- GOMIS, L.; FIORENTINI, M.; DALY, D. Potential and practical management of hybrid ventilation in buildings. *Energy and Buildings*, [S. l.], 2020.
- INVIDIATA, A.; GHISI, E. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. *Energy and Buildings*, [S. l.], v. 130, p. 20–32, 2016.
- KRELLING, A.; ELI, L.; OLINGER, M.; MACHADO, R.; MELO, A.; LAMBERTS, R. A thermal performance standard for residential buildings in warm climates: Lessons learned in Brazil. *Energy and Buildings*, [S. l.], v. 278, 2023.
- LETSCHERT, V. *The Manufacturer Economics and National Benefits of Cooling Efficiency for Air Conditioners in Brazil*. [S. l.: s.n.], 2019.
- MANTESI, E.; CHMUTINA, K.; GOODIER, C. The office of the future: Operational energy consumption in the post-pandemic era. *Energy Research & Social Science*, [S. l.], v. 87, p. 102472, 2022.
- NAILI, B.; HÁBER, I.; KISTELE GDI, I. Natural ventilation in high-rise office building – Comfort and energy performance. *Pollack Periodica*, [S. l.], 2023.
- NASROLLAHI, N.; GHOBADI, P. Field measurement and numerical investigation of natural cross-ventilation in high-rise buildings; Thermal comfort analysis. *Applied Thermal Engineering*, [S. l.], 2022.
- NOROUZIASAS, A.; ATTIA, S.; HAMD Y, M. Impact of Space Utilization and Work Time Flexibility on Energy Performance of Office Buildings. *Journal of Building Engineering*, [S. l.], 2024.
- OLIVEIRA, R.; SOUZA, R.; MAIRINK, A.; RIZZI, M.; SILVA, R. Thermal Comfort for Users According to the Brazilian Housing Buildings Performance Standards. *Energy Procedia*, [S. l.], v. 78, p. 2923–2928, 2015.
- RAJI, B.; TENPIERIK, M.; BOKEL, R.; VAN DEN DOBBELSTEEN, A. Natural summer ventilation strategies for energy-saving in high-rise buildings: a case study in the Netherlands. *International Journal of Ventilation*, [S. l.], v. 19, p. 25–48, 2019.
- SCHULZE, T., and EICKER, U. Controlled natural ventilation for energy-efficient buildings. *Energy and Buildings*, [S. l.], v. 56, p. 221–232, 2013.
- YU, F.; HO, W. Optimizing hybrid ventilation and daylight-linked dimming control for carbon reduction and thermal comfort in a subtropical high-rise office building. *Cleaner Energy Systems*, [S. l.], 2024.