ALTERNATIVAS PROJETUAIS PARA MELHORIA DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIO COM VENTILAÇÃO HÍBRIDA

Ana Carolina de Oliveira Veloso (1); Rodrigo Karini Leitzke (2); Roberta Vieira G. de Souza (3)
(1) doutora em Engenharia Mecânica, arquiteta, acoveloso@gmail.com, Universidade Federal de Minas Gerais, R. Paraíba, 697 - Savassi, Belo Horizonte - MG, 30130-141, (31) 98456-6902
(2) mestre, cientista da computação, rkleitzke@inf.ufpel.edu.br, Universidade Federal de Pelota, R. Benjamin Constant, 1359 - Centro, Pelotas - RS, 96010-020, (53) 99172-1772
(3) doutora em Engenharia Civil, arquiteta, robertavgs@ufmg.br, Universidade Federal de Minas Gerais, R. Paraíba, 697 - Savassi, Belo Horizonte - MG, 30130-141, (31) 3409-8872

RESUMO
As mudanças climáticas e o aquecimento global evidenciam a importância de reduzir o consumo de energia nos edifícios. A utilização da ventilação híbrida, que combina ventilação natural e sistemas mecânicos, pode contribuir para o conforto térmico e a redução do consumo de energia em determinados climas. Portanto, é crucial considerar soluções arquitetônicas durante o processo de projeto, que possibilitem a diminuição do consumo energético e o aumento da eficiência energética do edifício. O objetivo deste artigo foi avaliar alternativas projetuais que permitam reduzir o consumo de energia em edifícios de escritório com ventilação híbrida na cidade de Belo Horizonte. Foram analisadas quatro variáveis que podem impactar o consumo de energia da edificação: a orientação solar, a absorção solar das paredes externas, o fator solar dos vidros e a área de ventilação efetiva das aberturas. Um arquétipo de edifício de escritório localizado em Belo Horizonte foi utilizado para as análises. As soluções que apresentaram os menores consumos totais de energia elétrica na edificação utilizando a ventilação híbrida, em sua maioria, tinham orientação solar de 225°, absorção de 0,2, fator solar reduzido e área de ventilação efetiva das aberturas de 40%. Essas soluções mostraram uma redução média de 13% no consumo total da edificação e de 36,4% no consumo de ar-condicionado em comparação com o consumo do modelo de referência.

Palavras-chave: Arquétipo de edifícios de escritórios, ventilação híbrida, redução do consumo de energia.

ABSTRACT
The climate changes and global warming highlight the importance of reducing energy consumption in buildings. Hybrid ventilation, which combines natural ventilation and mechanical systems, can help ensure thermal comfort and decrease energy consumption in certain climates. Therefore, it is important to assess architectural solutions in the design process to reduce energy consumption and enhance building energy efficiency. The objective of this article was to evaluate design alternatives for improving energy consumption in office buildings with hybrid ventilation in the city of Belo Horizonte. Four variables that could impact the building's energy consumption were analyzed: solar orientation, external wall absorptance, glass solar factor, and effective window ventilation area. An archetype of office buildings in Belo Horizonte was used for the analyses. The solutions that presented the lowest values of total building energy consumption, using hybrid ventilation, predominantly had a solar orientation of 225°, an absorptance of 0.2, a low solar factor, and an effective window ventilation area of 40%. These solutions demonstrated an average reduction of 13% in total building energy consumption and 36.4% in air conditioning consumption compared to the reference model's consumption.

Keywords: archetypes for office buildings, mixed-mode ventilation, energy consumption reduction.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas e o aquecimento global têm chamado a atenção para o consumo de energia dos edifícios, incluindo os não residenciais, como um colaborador significativo para as demandas globais de energia e emissões de gases de efeito estufa (ZHANG et al., 2023; ZHAI, HELMAN, 2019). No Brasil, o setor comercial é responsável por cerca de 19% do consumo de energia elétrica do país (MME, 2021) e para reduzir esse consumo e as emissões de CO2 associadas, é necessário compreender os fatores que influenciam o consumo de energia elétrica em edifícios, incluindo o clima, as características do edifício, o uso de equipamentos e o comportamento dos usuários. Além disso, a adoção de estratégias de eficiência energética não só reduz o consumo de energia elétrica, mas também reduz a necessidade de investimentos em novas infraestruturas de geração, transmissão e distribuição de energia, contribuindo para a sustentabilidade e a preservação do meio ambiente (STERN, 2013).

Em todo o mundo, há uma preocupação crescente em minimizar os impactos ambientais por meio da redução do consumo de energia e recursos naturais. Durante o evento da COP26, ocorrida em Glasgow em 2021, o Brasil se comprometeu com a implementação do Acordo de Paris, criando incentivo a estratégias de eficiência energética para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. O país se comprometeu a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa em 40% até 2030, em relação aos níveis de 2005, e alcançar a neutralidade de carbono até 2050 (NDC, 2021). Nesse contexto, os edifícios podem contribuir de forma significativa para a redução das emissões de gases de efeito estufa, uma vez que consomem grande quantidade de energia elétrica e são responsáveis por uma parcela significativa das emissões globais (IEA, 2018).

Com a crescente relevância dada às preocupações ambientais e à eficiência energética, juntamente com o aumento do movimento de construções verdes em todo o mundo, a ventilação natural surge como uma alternativa para reduzir o consumo de energia elétrica nos edifícios e, consequentemente, o impacto ambiental causado pelo uso indiscriminado dos sistemas de ar-condicionado (EMMERICH, 2011; VERA, LANGLOIS, 2007; BRAGER, 2006). Os edifícios passivos, que possuem estratégias de controle climático e menor consumo de energia, também oferecem uma maior oportunidade de adaptação às mudanças climáticas (KWOK, RAJKOVICH, 2010). A ventilação natural é considerada uma solução sustentável que reduz o impacto do uso do ar-condicionado e diminui a demanda de energia dos edifícios (DO, CETIN, 2022).

No entanto, em algumas regiões com diferentes tipos de clima, o uso exclusivo da ventilação natural nos edifícios pode não ser suficiente para garantir o conforto térmico ao longo do ano. Nesses casos, pesquisas demonstram que a combinação da ventilação natural com sistemas mecânicos - conhecida como ventilação híbrida - pode assegurar condições adequadas de conforto térmico (TUCK et al., 2019; RUPP, GHISI, 2013; KIM et al., 2019). O sistema híbrido permite que o edifício aproveite os benefícios da ventilação natural, mas também tenha a segurança de contar com o sistema mecânico quando não for possível alcançar conforto aos ocupantes (ZHAI et al., 2011; PENG, 2022). No entanto, a análise quantitativa da viabilidade e potencial de economia de energia de edifícios com ventilação híbrida depende de uma definição adequada de conforto térmico aceitável (DE DEAR, BRAGER, 2017). Além disso, um estudo de Brager e Baker (2009) revelou que os ocupantes de edifícios com ventilação híbrida relataram maior satisfação com a qualidade do ar interior e o conforto térmico em comparação com aqueles em edifícios apenas com ventilação mecânica.

Uma maneira de avaliar a eficácia dos sistemas de ventilação híbrida é por meio da comparação do consumo de energia. Ao comparar o consumo de energia de edifícios com ventilação híbrida com edifícios semelhantes com sistemas mecânicos tradicionais, é possível identificar áreas de melhoria e otimizar o desempenho do sistema de ventilação híbrida (VELOSO et al., 2015) e identificar as oportunidades de aprimoramento. Uma das principais vantagens deste benchmarking energético é que ele ajuda os proprietários e gestores de edifícios a terem uma melhor compreensão de como seus edifícios estão operando em comparação com padrões de referência (VELOSO et al., 2020). Com essas informações, é possível implementar estratégias para reduzir o consumo de energia, melhorar a eficiência energética e diminuir os custos operacionais.

De acordo com o relatório da Agência Internacional de Energia - IEA (IEA, 2019), a falta de conhecimento sobre os fatores que determinam o uso de energia em edifícios é uma barreira significativa para alcançar a eficiência energética e controlar a demanda de energia. Isso é particularmente relevante para edifícios de escritórios, onde o consumo de energia costuma ser alto devido às demandas de equipamentos e sistemas necessários para suportar as atividades dos ocupantes. Neves et al. (2019) analisaram as estratégias de projeto de 153 edifícios de escritórios com ventilação híbrida em São Paulo, e os resultados mostraram a importância da área efetiva de abertura das janelas e a diminuição do impacto da relação entre a área envidraçada e a área total no desempenho energético desses edifícios. Veloso et al. (2017) também obtiveram resultados semelhantes em relação à relação entre a área envidraçada e a área total, demonstrando que quanto

maior a relação, maior o consumo de energia nos edifícios com ventilação híbrida. Além disso, constatou-se que edifícios com paredes externas que tinham absortância solar alta – cores escuras - consumiam 100% a mais de energia do que os que tinham baixa absortância.

Portanto, é crucial conduzir avaliações de desempenho energético e benchmarking para identificar áreas de melhoria das decisões de projeto, o que levará a um consumo de energia mais eficiente nas edificações. No caso de edifícios de escritórios com ventilação híbrida, melhorias nas decisões de projeto podem levar a uma redução no consumo de energia e a uma operação predial mais sustentável e ecologicamente correta.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi avaliar alternativas de projeto que possam melhorar o consumo de energia de edifícios de escritório com ventilação hibrida, utilizando o arquétipo desenvolvido para a cidade de Belo Horizonte, em Minas Gerais, para a análise.

3. MÉTODO

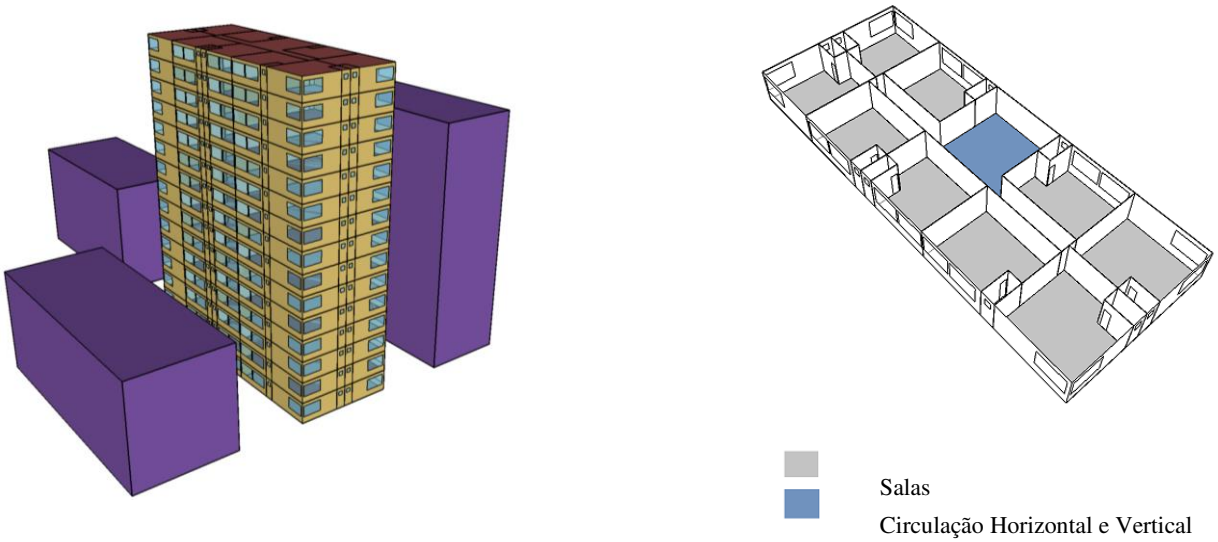
A metodologia empregada neste artigo baseou-se em um arquétipo de edifício de escritório com ventilação híbrida desenvolvido para a cidade de Belo Horizonte. Esse arquétipo foi simulado considerando a presença de ventilação natural e o uso de condicionamento artificial de ar, variando-se a orientação solar, a absorção solar das paredes externas, o fator solar dos vidros e a área de ventilação efetiva das aberturas. Foi realizada uma análise de sensibilidade dos resultados obtidos para avaliar a influência das variáveis no consumo de energia elétrica do arquétipo. Os próximos itens detalham cada uma dessas etapas.

3.1. Arquétipo do edifício

O arquétipo utilizado foi o desenvolvido no trabalho de Veloso et al. (2023), no qual foram levantados edifícios de escritório com ventilação híbrida, ou seja, com a presença de janelas com possibilidade de abertura e existência de sistemas de ar-condicionado do tipo split ou janela. A partir da seleção de edificações deste tipo, foram identificadas características arquitetônicas e de uso que se considerou influenciarem o consumo de energia elétrica desses edifícios. A figura 1 apresenta a imagem do arquétipo obtido do Energy Plus Input File.

A análise foi realizada para a cidade de Belo Horizonte, localizada na região Sudeste do Brasil e classificada como de clima temperado (Cwa) de acordo com a classificação de Köppen. A cidade possui verões quentes e invernos amenos, com temperaturas médias de 24°C e 19°C, respectivamente. As direções de vento mais frequentes ao longo do ano são leste e sudeste. Segundo o modelo adaptativo da ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2013), aproximadamente 62% do tempo entre 8h e 18h (horário médio anual de funcionamento de um prédio de escritório) apresenta temperaturas dentro das faixas de conforto térmico.

Figura 1 – Arquétipo edificio de escritorio com ventilação hibrida.



(a) Volumetria (b) Planta dos andares

As tabelas 1 e 2 apresentam as características do arquétipo utilizado neste artigo. Essas características foram obtidas de levantamentos realizados em plantas obtidas na prefeitura local, de levantamento *in loco* e

de dados da literatura por Veloso et al. (2023) que consideraram características médias das variáveis levantadas para a definição do mesmo. Considerou-se como 0,87 o fator solar dos vidros transparentes encontrados na amostra.

Tabela 1- Características arquitetônicas dos arquétipos.

Características Arquitetônicas	**unidade**	**Valor utilizado no arquétipo**
Comprimento	m	37,3
Largura	m	14,35
Altura	m	48,75
Número de fachadas sem janela	-	0
Perímetro	m	103,3
Número total de pavimentos	-	15
Número total de pavimentos com salas	-	11
Área total edificação	m²	8.028,83
Área total circulação	m²	926,86
Pé-direito	m	3,25
PAFT (Percentual de Abertura na Fachada Total)	%	24
Quantidade de Salas	-	99
Tamanho das salas	m²	50,1
Número de salas condicionadas	-	50
Forma das salas	-	retangular
Tipo de janela	-	basculante
Tipo de vidro	-	Incolor
Fator Solar do Vidro	-	0,87
Absortância paredes	-	0,5
Absortância cobertura	-	0,6
Entorno	Afastamento (m)	15
	altura média (m)	47

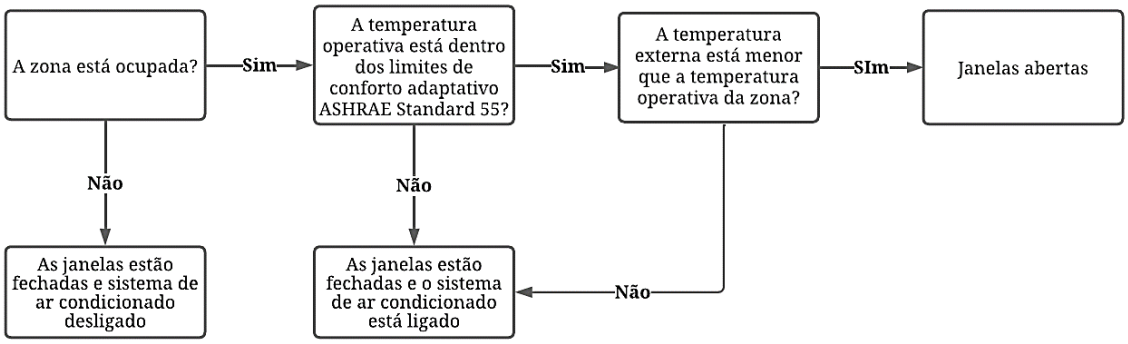
Tabela 2 - Rotina e potência de iluminação e equipamentos.

Sistemas e rotinas	**Unidade**	**Valor considerado no arquétipo**
Iluminação salas (DPI)	W/m²	11,9
Iluminação banheiro (DPI)	W/m²	5
Iluminação corredor (DPI)	W/m²	5
Equipamentos	W	720
COP Ar-Condicionado	W/W	3,2
Ocupação	pessoa/sala	6
Rotina de Ocupação	h/dia	10h 20min
Rotina de Iluminação	h/dia	4h

As simulações foram feitas no *EnergyPlus 9.2*. A ventilação natural foi simulada utilizando o modelo multizona *Airflow Network* (AFN). Para controlar a abertura e o fechamento das janelas de acordo com as temperaturas internas, foi utilizado o módulo de Gerenciamento de Energia (EMS). A rotina de abertura e fechamento das janelas foi configurada da seguinte forma: (a) se a zona estiver ocupada e a temperatura operativa estiver fora dos limites de conforto adaptativo estabelecidos pelo ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2023), as janelas estarão fechadas e o sistema de ar-condicionado será acionado; (b) se a zona estiver ocupada, a temperatura operativa estiver dentro dos limites de conforto adaptativo estabelecidos pelo ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2023) e a temperatura externa estiver abaixo da temperatura operativa da zona, as janelas

estarão abertas e o sistema de ar-condicionado será desligado; (c) se a zona estiver desocupada, as janelas estarão fechadas e o sistema de ar-condicionado será desligado. O fluxograma dessa rotina está apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma de funcionamento da abertura das janelas.



Os dados meteorológicos para a cidade de Belo Horizonte foram obtidos do site Climate One Building (2022) no formato TMYx para o período de 2007-2021. Como saída das simulações, obteve-se o consumo total de energia anual (EUI - *Energy Use Intensity*). O consumo anual de energia do arquétipo ventilado em modo hibrido, sem alterações, é de 57,50 kWh/m².ano, sendo o consumo de ar-condicionado neste modelo de 20,2 kWh/m².ano, correspondendo a 35,1% do consumo total. Estes valores foram tomados como base na comparação com os resultados das simulações de alternativas de projeto.

3.2. Análise de dados

A partir do arquétipo, foram variados os parâmetros construtivos utilizados como dados de entrada nos modelos preditivos. Consideraram quatro variáveis preditoras: orientação solar, absortância solar das paredes, fator solar do vidro e área efetiva de ventilação da abertura. Para cada variável independente, foram considerados quatro valores, representando variações possíveis para cada parâmetro. A partir da variação destes parâmetros em simulação computacional foi feita análise de sensibilidade do consumo anual de energia (kWh/m².ano) e do consumo anual do sistema de ar condicionado (kWh/m².ano) do edifício de escritórios com ventilação híbrida.

Os parâmetros utilizados nas simulações apresentados na Tabela 3 foram obtidos por meio de uma análise detalhada dos parâmetros da base de dados de edifícios existentes e em funcionamento na cidade de Belo Horizonte (VELOSO et al., 2023). As simulações paramétricas foram realizadas utilizando a ferramenta *Parametrics* do EnergyPlus. Como a ventilação hibrida é uma estratégia para diminuição do consumo de energia das edificações, também foi realizada uma análise da edificação operando plenamente com ar-condicionado.

Tabela 3- Parametros de simulação.

Parâmetro	Unidade	Tipo de edificação	Variação
Absortância das paredes externas	-	Hibrida e totalmente condicionada	0,20 – 0,40 – 0,60 – 0,80
Fator Solar do vidro	-	Hibrida e totalmente condicionada	0,25 – 0,45 – 0,65 – 0,85
Orientação solar	°	Hibrida e totalmente condicionada	NE (45), SE (135), SO (225), NO (315)
Área de ventilação efetiva da janela	%	Hibrida	20 – 40 – 60 – 80

A variação no consumo de energia elétrica em uma edificação não está exclusivamente relacionada a uma variável específica, mas é influenciada por diferentes combinações das variáveis de entrada. Sendo assim, foi realizada uma primeira análise por meio de gráficos boxplot, que permitiu visualizar a distribuição dos resultados de consumo de energia para cada parâmetro modificado. Essa análise foi fundamental para compreender o comportamento dos dados e identificar tendências nas variações simuladas.

Foram utilizados gráficos de coordenadas paralelas para analisar o efeito da variação dos quatro parâmetros construtivos no consumo de energia. Essa técnica de visualização de dados permite representar informações multivariadas de forma clara onde cada variável é representada por um eixo paralelo aos demais, e as observações são representadas por linhas que interceptam os eixos nos pontos correspondentes aos valores das variáveis. Essa representação possibilita identificar relações entre as variáveis e detectar padrões e anomalias nos dados de maneira eficiente.

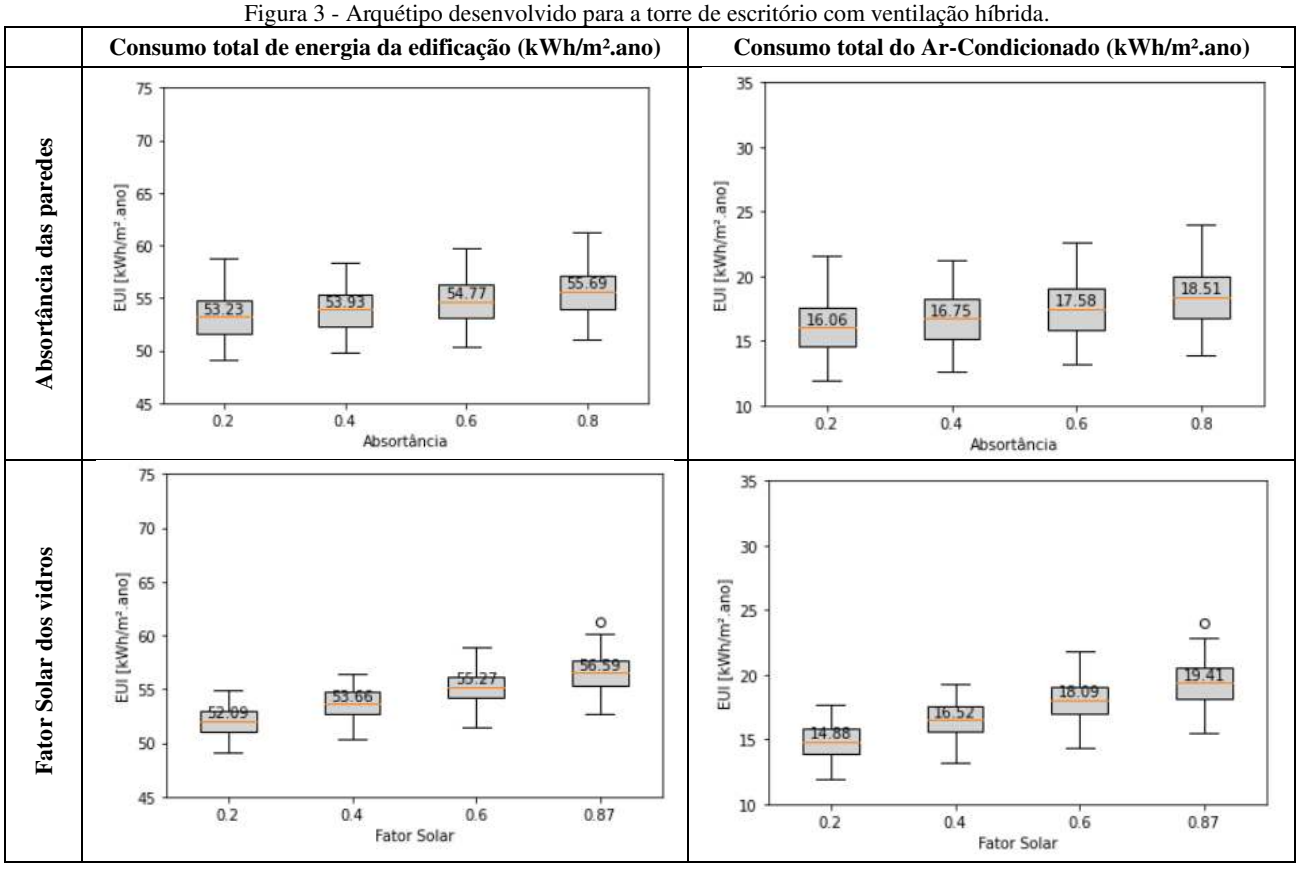
4. RESULTADOS

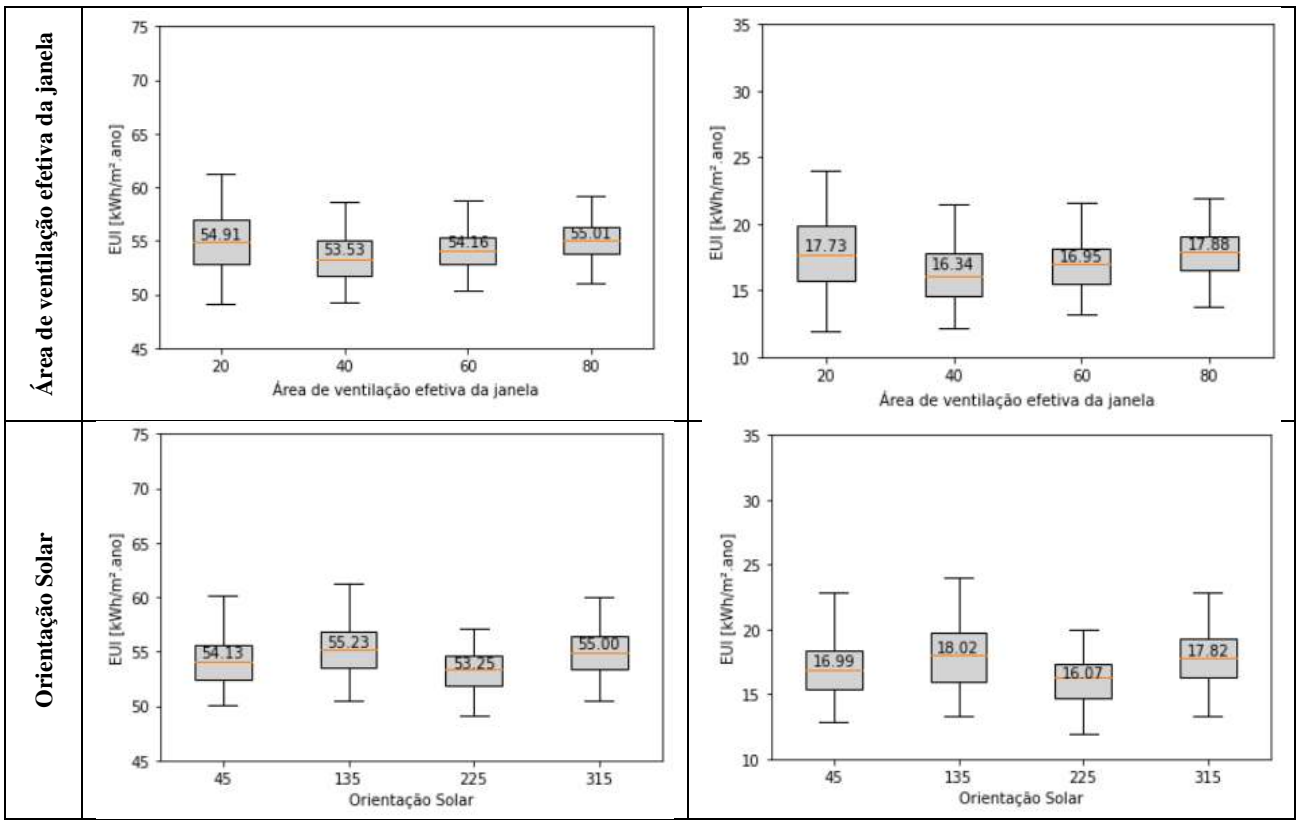
Inicialmente foi realizada uma análise por meio de gráficos boxplot do EUI simulado para cada uma das variáveis analisadas para a edificação operando em modo híbrido, tanto para o consumo de energia elétrica total quanto apenas para o consumo de ar-condicionado. A Figura 3 apresenta o comportamento de cada variável separadamente. Observa-se que, na análise da absortância, quanto maior a absortância das paredes externas, maior é o consumo de energia, com uma variação de 4,6% no consumo total de energia e de 15,2% no consumo de ar-condicionado. A maior diferença encontrada nas simulações foi em relação ao fator solar do vidro, onde a variação do consumo total de energia foi de 8,6% e no consumo de ar-condicionado foi de 30,4%. Observou-se, portanto, que quanto maior o controle solar do vidro, ou seja, menor o fator solar, menor será o consumo de energia.

Em relação a área de ventilação efetiva da janela, verificou-se que o menor valor testado, correspondente a 20% da área efetiva, não foi capaz de proporcionar conforto aos usuários, levando a um maior uso do ar-condicionado. O mesmo ocorreu quando essa área foi muito grande, ou seja, 80%. Assim, o menor consumo de energia ocorreu quando a área efetiva de ventilação foi de 40%.

Quanto à análise da orientação da edificação, constatou-se que o maior consumo de energia ocorreu quando as fachadas envidraçadas estavam voltadas para a orientação nordeste/sudoeste, com uma diferença de 3,7% no consumo total e de 12,7% no consumo de ar-condicionado em relação às demais fachadas. Uma hipótese é que esse consumo poderia ser maior caso não houvesse obstruções no entorno, já que o entorno sombreia parte dessas fachadas.

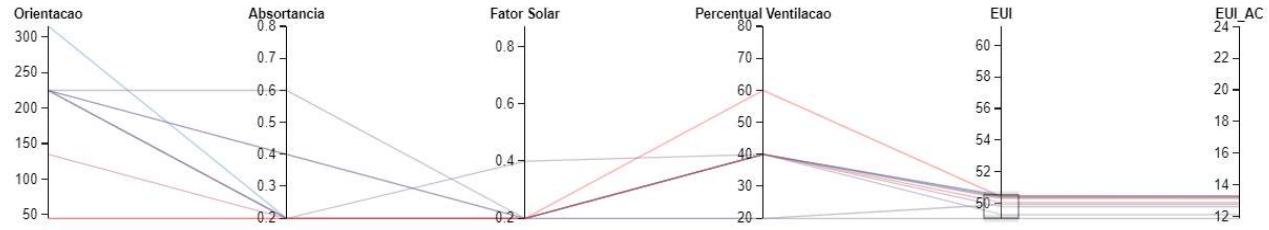
Figura 3 - Arquétipo desenvolvido para a torre de escritório com ventilação híbrida.





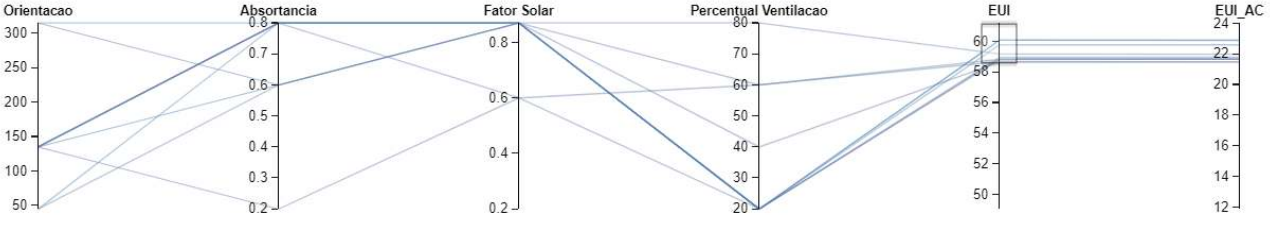
Ao analisar os dados em conjunto, constatou-se que as dez soluções com os menores valores de consumo total de energia elétrica da torre de escritórios (EUI) apresentaram, em sua maioria, orientação solar da fachada frontal de 225° (em 60% dos casos), absortância de 0,2 (em 70% dos casos), fator solar baixo com valor de 0,2 (em 90% dos casos) e área de ventilação efetiva da janela de 40% (em 70% dos casos). Essas soluções demonstraram uma redução média de 13% em relação ao consumo total da edificação base (EUI) e de 36,4% no consumo de ar-condicionado (EUI_AC) em relação ao consumo obtido para o arquétipo. Essas variações estão ilustradas na Figura 4.

Figura 4 - Gráfico de coordenadas paralelas com a combinação das soluções que mais diminuíram o consumo de energia.



Observa-se pela figura 5 que os parâmetros que ocasionam a maior variação no consumo total de energia da edificação (EUI) são a orientação solar da fachada frontal de 135° (em 60% das soluções), cores escuras com absortância de 0,8 (em 60% das soluções), o fator solar de 0,87 (em 80% das soluções) e o percentual de ventilação de 20% (em 70% das soluções). Em relação ao consumo total da edificação base (EUI), as soluções aumentaram em média 2,9% o consumo total de energia, enquanto o consumo de ar-condicionado (EUI_AC) aumentou em média 8,9% em comparação ao consumo do arquétipo.

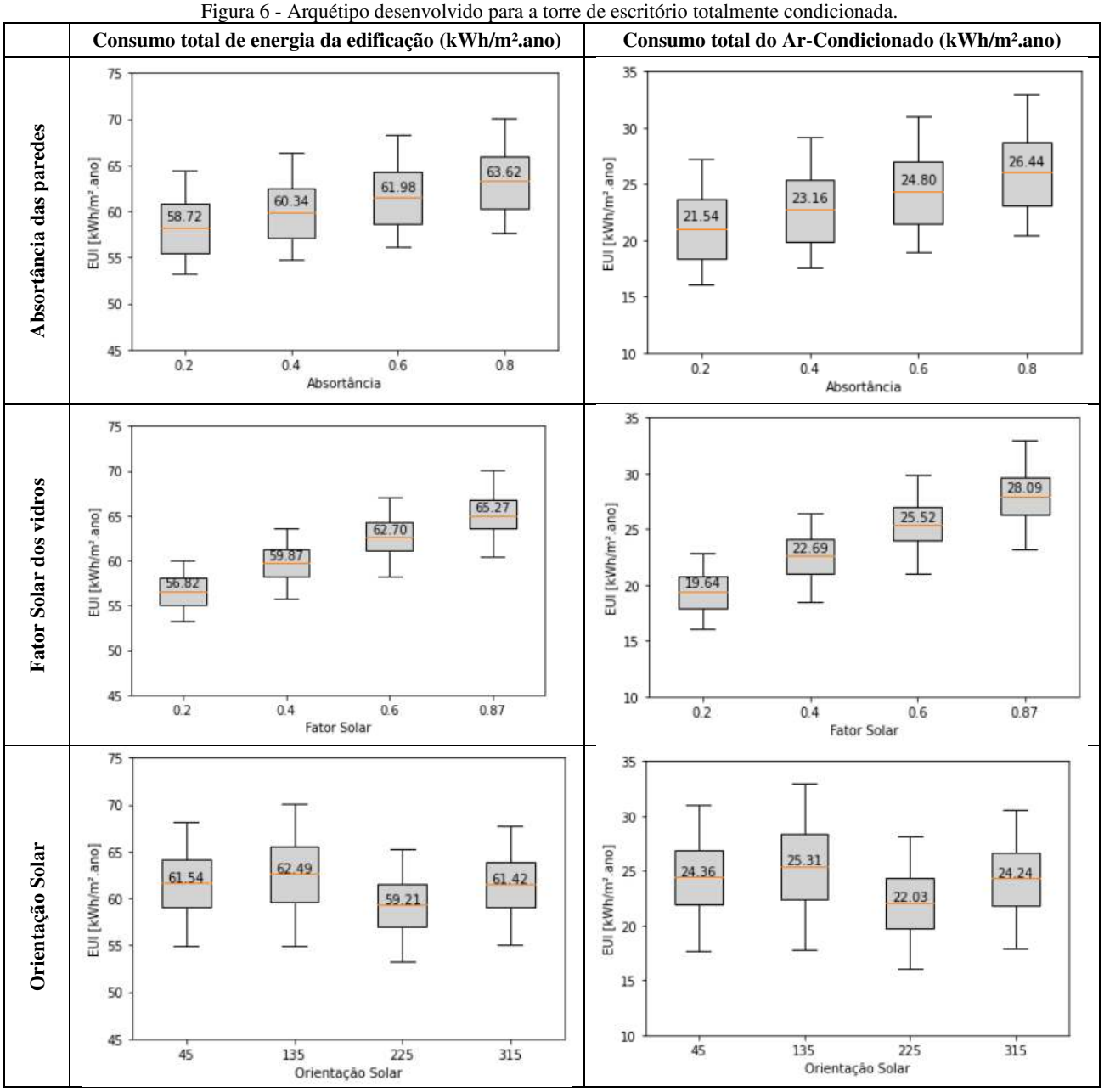
Figura 5 - Gráfico de coordenadas paralelas com a combinação das soluções que mais aumentaram o consumo de energia.



Ao realizar a análise das salas operando constantemente com ar-condicionado (Figura 6), sem a utilização da ventilação híbrida, constatou-se que a variação do consumo de energia foi mais significativa em comparação com a ventilação híbrida. No que diz respeito à absortância, verificou-se um aumento de 8,3% no consumo total de energia e de 22,7% no consumo de ar-condicionado. A modificação do Fator Solar do vidro teve um impacto considerável no sistema de ar-condicionado, resultando em um aumento de 43% no consumo de energia quando o fator solar foi alterado do menor para o maior valor, e um aumento de 14,9% no consumo total da edificação. No que se refere à orientação solar, constatou-se que a maior proporção de janelas voltadas para nordeste/sudoeste resultou no maior consumo de energia na edificação.

Comparando estes resultados com os resultados da edificação funcionando com ventilação híbrida, as variações das alternativas de projeto da edificação totalmente condicionada têm um consumo de energia elétrica total 12% maior. Com relação ao impacto no sistema de ar-condicionado, esse impacto foi em média 39% maior.

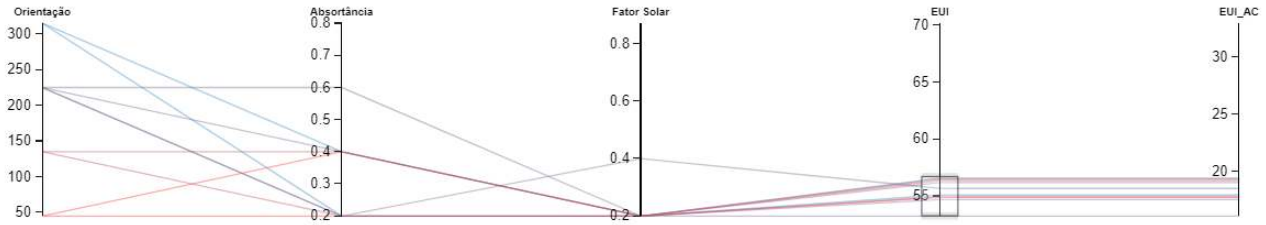
Figura 6 - Arquétipo desenvolvido para a torre de escritório totalmente condicionada.



Ao analisar os dados de forma abrangente, constatou-se que a maioria das dez soluções com os menores valores de consumo total de energia elétrica (EUI), apresentados na Figura 7, apresentaram orientação solar de 225° em 40% dos casos, absortância de 0,2 em 50% dos casos e fator solar de 0,2 em 100% dos casos. Essas

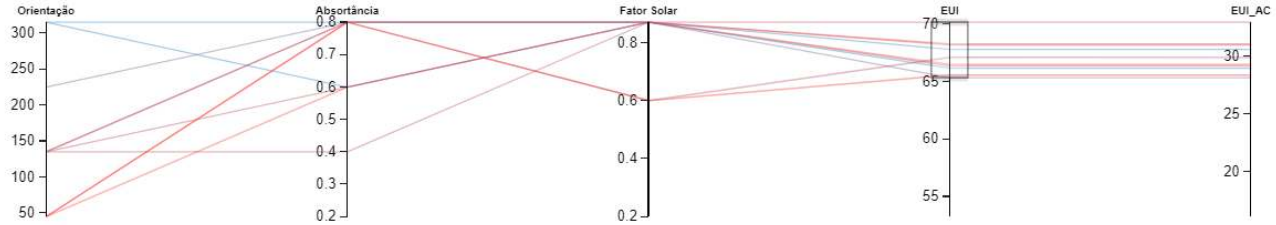
soluções demonstraram uma redução média de 3,6% no consumo total da edificação (EUI) e de 9,7% no consumo de ar-condicionado (EUI_AC) em comparação com o consumo do arquétipo.

Figura 7 - Gráfico de coordenadas paralelas com a combinação das soluções que mais diminuíram o consumo de energia.



Quanto aos parâmetros que causam a maior variação no consumo total de energia (EUI) apresentados na Figura 8, destacam-se a orientação solar de 135° em 40% das soluções, cores escuras com absortância de 0,8 em 60% das soluções e um fator solar de 0,87 em 90% das soluções. Em relação ao consumo total da edificação (EUI), as soluções apresentaram, em média, um aumento de 16,7%, enquanto o consumo de ar-condicionado (EUI_AC) aumentou em média 48,2% em comparação com o consumo do arquétipo.

Figura 8 - Gráfico de coordenadas paralelas com a combinação das soluções que mais aumentaram o consumo de energia.



5. CONCLUSÕES

Este estudo apresentou uma análise de sensibilidade de variáveis de projeto em relação a seu impacto no consumo de energia elétrica de edificações que operam me modo híbrido, comparada ao impacto das mesmas em edificações totalmente condicionadas.

A análise realizada neste estudo, permitiu verificar de forma objetiva o impacto no consumo de energia elétrica a partir de mudanças em parâmetros de projeto em edifícios de escritório tanto com condicionamento de ar híbrido quanto em edificações totalmente condicionadas, sendo este impacto mais sentido nas últimas. Ao comparar a edificação com ventilação híbrida com aquela utilizando apenas ar-condicionado, observa-se um impacto positivo no consumo de energia, com uma redução máxima de aproximadamente 10% no consumo total e de 25% no consumo de ar-condicionado considerando estratégias de projeto consideradas mais adequadas.

Os resultados também indicam que a escolha de materiais adequados e a adoção de estratégias de ventilação natural são importantes para reduzir o consumo de energia e, consequentemente, diminuir os custos operacionais do edifício. Além disso, o estudo demonstra que as soluções com melhor desempenho, utilizando a ventilação híbrida, apresentaram uma redução significativa no consumo de energia, especialmente no consumo de ar-condicionado, o que se configura como uma solução de projeto de especial interesse para edificações em Belo Horizonte, onde há uma tendencia cada vez mais acentuada de construção de edificações totalmente condicionadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 55 – 2013: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta, GA, 2013.

BRAGER, G.S., Mixed-mode cooling. ASHRAE JOURNAL, v.48, p. 30–37, 2006.

BRAGER, G., BAKER, L. Occupant Satisfaction in Mixed-Mode Buildings. **Building Research & Information**, v.37, p. 369–380, 2009.

DE DEAR, R., BRAGER, G. Adaptive Comfort and Mixed-Mode Conditioning. Sustainable Built Environments, p. 481-494, 2017.

DO, H.; CETIN, K.S. Mixed-Mode Ventilation in HVAC System for Energy and Economic Benefits in Residential Buildings. **Energies**, v.15, p.4429, 2022.

EMMERICH, S. J. Simulated Performance of Natural and Hybrid Ventilation Systems in an Office Building. HVAC&R Research, v. 21:4, p. 97–1004, 2011.

IEA. Energy efficiency 2019. Paris: **International Energy Agency**, 2019.

IEA. World energy outlook 2018: The future is electrifying. **International Energy Agency**, 2018.

KIM, J., DE DEAR, R., TARTARINI, F., PARKINSON, T., COOPER, P. Ventilation mode effect on thermal comfort in a mixed mode building. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**, v.609, p.042029, 2019.

KWOK, A. G.; RAJKOVICH, N. B. Addressing climate change in comfort standards. **Building and Environment**, v. 45, n. 1, p. 18–22, 2010.

MME - **Balanço Energético Nacional** 2022: Ano base 2021. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro (2022). Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022 (Acesso em: 19 fevereiro 2023).

NDC Registry, disponível em: https://www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/All.aspx, 2021.

NEVES, L.O., MELO, A.P., RODRIGUES, L.L. Energy performance of mixed-mode office buildings: Assessing typical construction design practices. **Journal of Cleaner Production**, v.234, p. 451-466, 2019.

PENG, Y., LEI, Y., TEKLER, Z.D.; ANTANURI, N.; LAU, S.K.; CHONG, A. Hybrid system controls of natural ventilation and HVAC in mixed-mode buildings: a comprehensive review. **Energy and Building**, v.276, p.112509, 2022.

RUPP, R. F., GHISI, E. Potencial de economia de energia elétrica através do uso da luz natural e da ventilação híbrida em edifícios comerciais em Florianópolis. **Ambiente Construído**, 13 p. 75–86, 2013.

STERN, F. Demand and Time-Differentiated Energy Savings Cross-Cutting Protocols. **National Renewable Energy Laboratory** (NREL), 2013.

TUCK, N.W.; ZAKI, S.A.; HAGISHIMA, A.; RIJAL, H.B.; ZAKARIA, M.A.; YAKUB, F. Effectiveness of free running passive cooling strategies for indoor thermal environments: Example from a two-storey corner terrace house in Malaysia, **Building and Environment**, V. 160, p. 106214, 2019.

VELOSO, A. C. O., SOUZA, R. V. G., KOURY, R. N. N. Evaluation of electric power consumption of non-residential buildings in the city of Belo Horizonte - correlation with design decisions in a study case of a hybrid building. **Energy Procedia**, v.78, p. 747–752, 2015.

VELOSO, A. C. O., SOUZA, R. V. G., SANTOS, F.N. Energy benchmarking for office building towers in mild temperate climate. **Energy and Buildings**, v.222, p.110059, 2020.

VELOSO, A. C. O.; SOUZA, R. V. G.; KOURY, R. N. N. Research of design features that influence energy consumption in office buildings in Belo Horizonte, Brazil. **Energy Procedia**, v. 111, p. 101-110, 2017.

VELOSO, A.C.O.; FILHO, C.R.A.; SOUZA, R. V. G. Desenvolvimento de arquétipo de edifício de escritórios com ventilação híbrida: abordagem metodológica para desenvolvimento de modelo. VII Congresso Latino Americano de Simulação de Edifícios – IBPSA LATAL 2023.

VERA, I.; LANGLOIS, L. Energy indicators for sustainable development. **Energy**, v. 32, n. 6, p. 875–882, 2007.

ZHAI, Z. J., JOHNSON, M., KRARTI, M. Assessment of natural and hybrid ventilation models in whole-building energy simulations. **Energy and Buildings**, v. 43, p. 2251–2261, 2011.

ZHAI, Z.J.; HELMAN, J.M. Implications of climate changes to building energy and design, **Sustainable Cities and Society**, v.44, p.511-519, 2019.

ZHANG, Y.; TEOH, B.K.; WU, M.; CHEN, J.; ZHANG, L. Data-driven estimation of building energy consumption and GHG emissions using explainable artificial intelligence. **Energy**, v. 262, p.125468, 2023.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelos recursos financeiros aplicados no financiamento do projeto.