XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

Eficiência Geométrica de Elementos Vazados na Aceleração do Fluxo de Ar para Ventilação Natural

Eficiencia Geométrica de Elementos Vazados en la Aceleración del Flujo de Aire para Ventilación Natural

Geometric Efficiency of Perforated Elements in Accelerating Airflow for Natural Ventilation

Simulação física e computacional de desempenho térmico e/ou ventilação natural/ *Simulación Física y Computacional del Desempeño Térmico y/o Ventilación Natural / Physical and Computational Simulation of Thermal Performance and/or Natural Ventilation*

Cardelli, Anny
Técnica em Edificações, Graduanda em Arquitetura e Urbanismo, *Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, Brasil,* anny.cardelli@mackenzie.br

Obata, Sasquia Hizuru

Doutora, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, Brasil, sasquia.obata@mackenzie.br

Nazareth, Samuel

Mestre, faculdade das Américas, São Paulo, Brasil, Samuel.nazareth@outlook.com

Resumo

O estudo aborda o desempenho de diferentes geometrias de condutos na aceleração do fluxo de ar para a aplicação na construção civil. O objetivo é identificar seletivamente a relação entre forma e otimização da ventilação cruzada em ambientes onde sua utilização é normativamente prescrita, como uma estratégia para a manutenção do conforto térmico. Por meio de simulações computacionais, percebeu-se que a eficiência de distintas configurações geométricas, justifica-se pela relação de variáveis como curvatura, proporções das aberturas de entrada e saída, e a influência de caixas. Tais resultados demonstram como se pode promover a redução significativa do impacto ambiental, do consumo energético, bem como, indicar soluções de baixo custo e acessíveis, especialmente para populações em situação de vulnerabilidade, contribuindo para a sustentabilidade e o conforto térmico.

Palavras-chave: Ventilação natural. Conforto térmico. Geometria de condutos. Princípio de Venturi. Simulação computacional

Resumen

El estudio aborda el rendimiento de diferentes geometrías de conductos en la aceleración del flujo de aire para su aplicación en la construcción civil. El objetivo es identificar selectivamente la relación entre forma y optimización de la ventilación cruzada en ambientes donde su uso está normativamente prescrito, como estrategia para mantener el confort térmico. A través de simulaciones computacionales, se percibió que la eficiencia de distintas configuraciones geométricas se justifica por la relación de variables como curvatura, proporciones de las aberturas de entrada y salida, y la influencia de las cajas. Estos resultados demuestran cómo se puede promover una reducción significativa del impacto ambiental, del consumo energético, así como indicar soluciones de bajo costo y accesibles, especialmente para poblaciones en situación de vulnerabilidad, contribuyendo a la sostenibilidad y el confort térmico.

Palabras clave: Ventilación natural. Confort térmico. Geometría de conductos. Efecto Venturi. Simulación computacional.

Abstract

The study addresses the performance of different duct geometries in accelerating airflow for application in construction. The goal is to selectively identify the relationship between shape and optimization of cross-ventilation in environments where its use is normatively prescribed, as a strategy for maintaining thermal comfort. Through computational simulations, it was observed that the efficiency of different geometric configurations is justified by the relationship of variables such as curvature, proportions of inlet and outlet openings, and the influence of boxes. These results demonstrate how significant environmental impact reduction and energy consumption can be promoted, as well as suggest low-cost and accessible solutions, especially for vulnerable populations, contributing to sustainability and thermal comfort.

Keywords: Natural ventilation. Thermal comfort. Duct geometry. Venturi principle. Computational simulation.

Introdução

Segundo o IPCC (2022), prevê-se que metade da população urbana futura será exposta a riscos de calor extremo, especialmente nas regiões do Sul Global, em países de baixa e média renda situados em áreas tropicais ou subtropicais, afetando desproporcionalmente comunidades de baixa renda, crianças, idosos, pessoas com deficiência e minorias étnicas (apud IPCC, 2022). No entanto, a oferta de sistemas ativos; ventiladores e aparelhos de ar condicionado, não acompanham a demanda de sua necessidade, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. O crescimento de seu uso intensifica o consumo de energia elétrica e eleva as emissões de gases do efeito estufa. Por isso, é essencial a busca por novas abordagens que reduzam essas dependências, priorizando tecnologias passivas ou de baixa demanda energética. O resgate de conhecimentos tradicionais sobre ventilação e resfriamento podem aprimorar soluções contemporâneas para desempenho ambiental, por exemplo, a ventilação natural.

No enfrentamento das questões climáticas, do conforto térmico e das tecnologias passivas, destacam-se soluções criativas como o Eco-Cooler, desenvolvido em Bangladesh por Ashis Paul, que utiliza a geometria de garrafas PET, instaladas em janelas, para acelerar o fluxo de ar através do princípio de Bernoulli, reduzindo a sensação térmica (PAUL, 2016). De maneira semelhante, no Cairo, Marwa Dabaieh utilizou o princípio de Venturi em um projeto que incorporou funis de Shisha, típicos da região, em telhados e paredes residenciais. A pesquisa indicou que, ao aplicar esses funis em dois lados opostos dos quartos, utilizando ventilação cruzada, houve melhora na distribuição de ar em relação a aberturas convencionais (DABAIEH, 2021).

Inspirados por esses modelos, observa-se uma diferença na geometria utilizada, o que levanta o questionamento sobre qual formato seria mais eficiente para a aceleração do fluxo de ar em ventilação cruzada. Por isso, este estudo analisa o comportamento do fluxo de ar em diferentes geometrias cônicas, inspiradas nos formatos de garrafas PET. O recorte deste estudo concentra-se na eficiência geométrica de elementos isolados vazados para a ventilação cruzada. Futuramente os ensaios contemplarão testes mais específicos, avaliando o desempenho dos funiculares em grupo e em ambientes reais. Reconhece-se que outros parâmetros como vazão de ar, níveis de ruído e esforços horizontais induzidos também impactam o desempenho global do sistema, sendo indicados para investigações futuras.

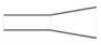
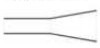
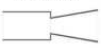
A investigação avalia o desempenho aerodinâmico dessas geometrias com base no princípio de Venturi, considerando sua capacidade de moldar o escoamento do ar e maximizar a aceleração do vento sem a necessidade de energia externa. Para isso, são realizadas simulações computacionais com variações na curvatura, dimensões e na presença de caixas, a fim de identificar a configuração mais eficiente para potencializar a ventilação natural. Espera-se identificar um design otimizado para elementos de ventilação passiva aplicáveis à construção civil, especialmente edificações de infraestrutura precárias, onde soluções passivas são essenciais para garantir o conforto térmico.

O sistema aplica-se a ambientes com temperaturas superiores às de conforto conforme o gráfico de Givoni (29ºC a 32ºC) ou com umidade relativa inferior a 80%, condições em que a ventilação passiva é uma estratégia recomendada (Lamberts et al., 2004). A eficácia do protótipo pode, contudo, ampliar esse intervalo, ao reduzir a sensação térmica. No Brasil, sua aplicação segue as zonas bioclimáticas estabelecidas na NBR 15220-3 (2024), que indicam a ventilação cruzada como estratégia essencial para o atender aos requisitos de desempenho térmico das edificações.

Metodologia

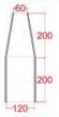
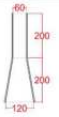
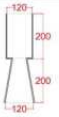
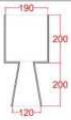
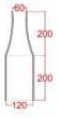
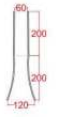
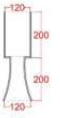
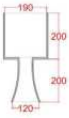
A metodologia a seguir descrita teve como objetivos: Avaliação da eficiência individual de condutos e comportamento isolado em termos de aceleração do fluxo de ar, a partir deste, ter subsídios para a seleção das geometrias mais promissoras em desempenho individual e oferecer um filtro inicial para análises mais complexas e realistas. Para esse estudo, selecionaram-se diferentes modelos de garrafas PET, considerando variações geométricas com curvaturas distintas e formas cônicas. A análise inicial identificou duas geometrias predominantes: uma com curvatura voltada para fora e outra com curvatura dupla. Foram incluídos, também, modelos sem curvatura e um com curvatura interna. Baseado neles, desenvolveram-se modificações para avaliar sua influência no desempenho aerodinâmico, conforme exemplificado no quadro 1. As variáveis analisadas incluem curvatura, razão entre diâmetros de entrada e saída, comprimento total do conduto e presença de caixas. Estas funcionam como variações geométricas acopladas ao cônico, permitindo investigar efeitos sobre o escoamento do ar, como conservação da direção do fluxo ou ocorrência de desvios (quadro 1).

Quadro 1: Classificação das Variações Geométricas dos Condutos.

Variações	Família Principal					
Curvatura	Sem curvatura	Curvatura externa	Curvatura interna	Curvatura dupla		
Exemplo						
Comprimento total	100mm	200mm	400mm			
Exemplo						
Variação da presença de caixa	Sem caixa	Caixa pequena	Caixa média	Caixa grande	Caixa de entrada	Caixa Reduzida
Exemplo						
Diâmetro de Saída	20mm	40mm	60mm			
Exemplo						

Fonte: dos autores.

Quadro 2: Tipologias geométricas dos perfis em corte dos condutos da família principal.

	Comprímento de 100mm			Comprímento 200			Funiculares com Caixa				
	Saída de 20mm	Saída de 40mm	Saída de 60mm	Saída de 20mm	Saída de 40mm	Saída de 60mm	Caixa de Entrada	Caixa Pequena	Caixa Média	Caixa Grande	Caixa Reduzida
Sem Curvatura											
Curvatura Interna											
Curvatura Externa											
Curvatura Dupla											

Fonte: dos autores.

Quadro 3: Tipologias geométricas dos perfis em corte dos condutos das famílias complementares.

Fonte: dos autores.

Os funiculares foram organizados em famílias e subfamílias, a família principal compõem o maior conjunto que possibilita diferentes parâmetros de variações que compõem as subfamílias, estas todas já ilustradas no quadro 2. Testaram-se também modelos baseados em estudos anteriores, como, o trabalho de Marwa Dabaieh (2021), no Cairo, que utilizou funis de shisha como dispositivos Venturi. Replicaram-se, portanto, os cônicos de 5 cm e 7 cm usados pela autora, além de uma versão adaptada. Adicionalmente, considerou-se o "Portable Cooling Module", projeto de Rob Goodier (2017), que combina o princípio de Venturi com a porosidade da cerâmica promoção da evapotranspiração. Inspirados nesse conceito, desenvolveram-se dois funiculares com ondulações internas: um com arestas secas e outro suavizado, para analisar exclusivamente o desempenho da passagem do vento. Essas mesmas geometrias, também foram testadas com a acoplagem de caixas, ampliando a avaliação dos efeitos estruturais no fluxo, todas também ilustradas no quadro 3.

Como etapa preliminar, as geometrias foram simuladas isoladamente para avaliar sua eficiência individual. Essa abordagem subsidia a seleção das configurações mais promissoras para futuras análises em conjunto e em ambientes construídos. As simulações foram conduzidas em regime estacionário, isotérmico, incompressível, turbulento com malha estruturada hexaédrica. Utilizou-se uma velocidade constante de 1m/s, desconsiderando a rugosidade do solo. A partir dos resultados, coletaram-se as imagens e os dados de velocidade no centro da entrada e da saída de cada peça.

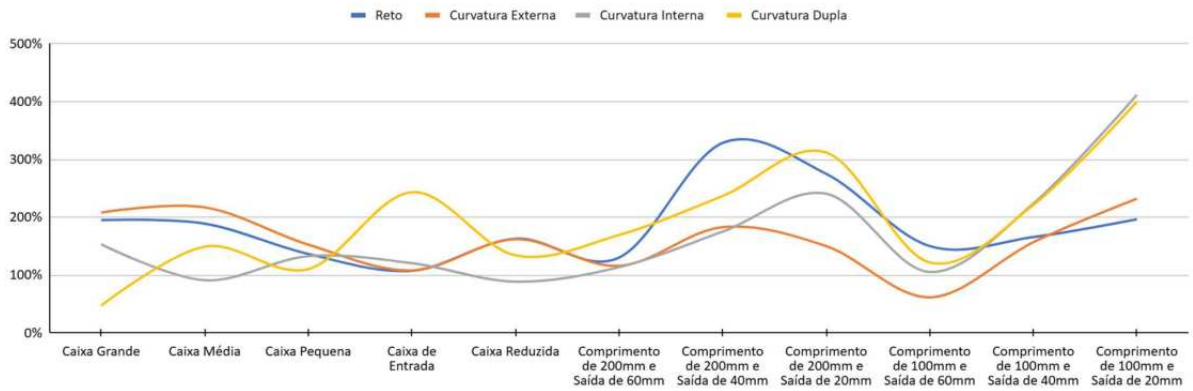
Como software de simulação CFD foi utilizado o Openfoam com a interface do BlueCFD 2020. Em virtude da natureza paramétrica no estudo realizado, os modelos foram modelados no software Rhinoceros 8 e as simulações foram executadas através da codificação algorítmica visual do Grasshopper pelo plug-in eddy3d (KASTNER, DOGAN, 2021). Este, utilizando o módulo SIMPLEFOAM e o modelo de turbulência K-epsilon. O volume simulado deve estar inscrito em um espaço chamado de volume, que segundo Brandão (2009), deve ser estanque, sem aberturas e possuir o negativo volumétrico do modelo simulado. COST (2004) aconselha a relação de 3% entre a área de obstrução dos elementos simulados e o tamanho do domínio. Para o início da simulação, o domínio deve ser dividido em pedaços em um processo chamado meshing. Estas novas geometrias podem ter diversas formas geométricas, a utilizada neste experimento é hexaédrica. A partir disso, a simulação pode ser realizada. A cada nova interação numérica são criados

resíduos, este representa a magnitude do erro das equações entre os dados da interação atual e a anterior. Cóstola (2006) e Leite (2010) apontam que simulações com valores mínimos de resíduos na ordem de 1×10^{-4} são simulações aceitáveis. Todas as simulações realizadas apresentaram estabilidade física de pressão e resíduos na ordem supracitada.

Análise de resultados

Foram analisadas 51 geometrias simuladas com base nas imagens extraídas das simulações e nos dados de velocidade obtidos nas entradas e nas saídas dos funiculares. A partir desses valores, calculou-se a porcentagem de aceleração. Os dados foram organizados em diferentes agrupamentos familiares para fins comparativos, permitindo a discussão dos resultados. O Gráfico 1 apresenta o desempenho aerodinâmico dos condutos cônicos da família principal, enquanto a Tabela 1 reúne os resultados dos modelos funiculares das famílias adicionais.

Gráfico 1: Resultados do desempenho aerodinâmico dos condutos das família principal quanto à velocidade do escoamento de ar.



Fonte: dos autores.

Tabela 1: Resultados do desempenho aerodinâmico dos condutos das famílias complementares quanto à velocidade do escoamento de ar.

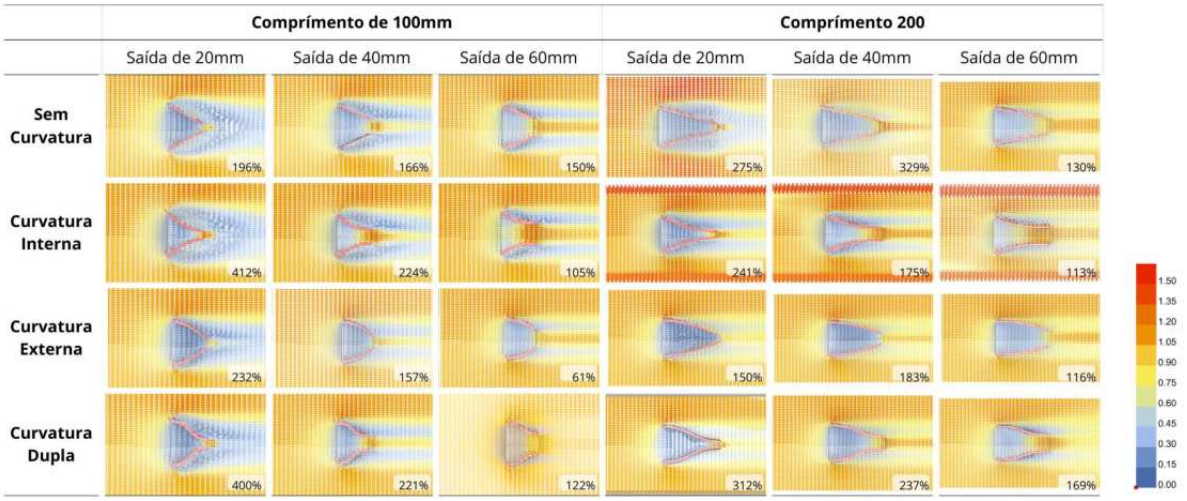
Funicular	Inlet	Outlet	Desempenho

			Entrada	Saída	
Complexos	Sem caixa	Arestas secas	0,47 m/s	1,22 m/s	160%
Complexos	Sem caixa	Suavizado	0,48 m/s	1,25 m/s	160%
Complexos	Com caixa	Arestas secas	0,56 m/s	0,88 m/s	57%
Complexos	Com caixa	Suavizado	0,52 m/s	0,85 m/s	63%
	Shisha	Pequeno	0,45 m/s	0,91 m/s	102%
		Médio	0,34 m/s	0,85 m/s	150%
		Grande	0,35 m/s	0,65 m/s	86%

Fonte: dos autores.

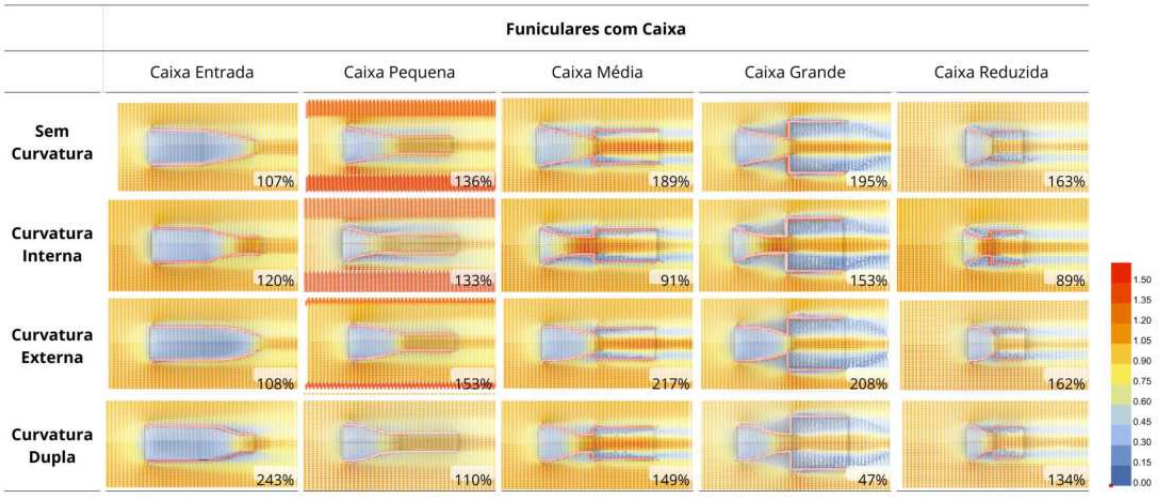
A análise geral dos dados obtidos nas simulações do grupo principal indica que, em média, o funicular com curvatura dupla apresentou a maior aceleração ao longo do conduto, enquanto os modelos com curvatura externa registraram os menores valores de velocidade e aceleração. Por outro lado, os funiculares com curvatura interna atingiram as maiores velocidades na saída, configurando-se como a geometria de melhor desempenho.

Quadro 4: Simulações e resultados da familia principal sem caixa



Fonte: dos autores.

Quadro 5: Simulações e resultados da familia principal com caixa



Fonte: dos autores.

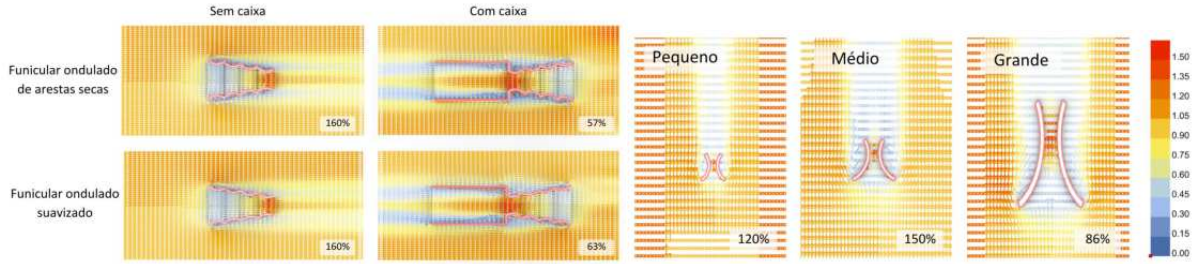
De maneira geral, observa-se que os funiculares com maiores proporções entre entrada e saída tendem a apresentar melhor desempenho, independentemente da curvatura. Além disso, enquanto nas proporções de 1:2 e 1:3 os funiculares longos se destacam, na proporção de 1:4 os funiculares curtos apresentam, em média, um desempenho significativamente superior.

Embora o uso de caixas acopladas não tenha demonstrado uma influência significativa no desempenho das geometrias quando analisado de forma geral, é possível identificar alguns padrões dentro desse recorte específico. Em termos médios, os funiculares de curvatura externa apresentaram os melhores valores de desempenho geral quando acoplados às caixas, enquanto aqueles com curvatura interna registraram os menores índices. Entre as variações de caixa, o melhor desempenho foi obtido com a caixa de tamanho médio, cujo diâmetro correspondia ao da abertura de entrada do funicular, independentemente da curvatura adotada.

Ao analisar as variações de proporção entre a saída e o comprimento dos cônicos, observa-se que, independentemente do comprimento, um maior fator de proporção resulta em um melhor desempenho. Dentro dessa lógica, o cônico mais curto de curvatura interna, com saída de 20 mm, obteve o melhor desempenho entre todos os funiculares simulados, registrando uma aceleração de 414%. Já a curvatura reta demonstrou a melhor performance nos longos. De forma geral,

embora as médias finais dos desempenhos sejam próximas, é possível concluir que os funiculares de menor comprimento apresentaram as melhores performances.

Quadro 6: Simulações e resultados dos condutos complementares



Fonte: dos autores.

Entre as famílias de funiculares complexos, quadro 3, de arestas secas e os suavizados, não foram observadas diferenças significativas de desempenho. Porém, ao comparar o desempenho com a família de elementos cônicos de 200 mm de comprimento e 60 mm de saída, os resultados foram positivos. Outro aspecto que verificou-se foi um aumento da velocidade em cada curvatura interna, o que inicialmente se acreditava poder ser potencializado pela estrutura em caixa. Contudo, essa hipótese não se confirmou, uma vez que os resultados obtidos não foram promissores, quando comparados às famílias de cônicos com estrutura de caixa média. Já os cônicos remodelados dos funis de shisha, também apresentados no quadro 3, apresentaram parâmetros distintos dos utilizados nesta pesquisa. Por esse motivo, apenas o cônico denominado "grande", ajustado para atender a esses parâmetros, pôde ser comparado de forma precisa. De modo geral, os funis pequeno e médio, apesar de suas dimensões reduzidas, demonstraram um desempenho tão promissor quanto os demais. No entanto, o mesmo não pode ser afirmado para o funil grande, cujo desempenho não se destacou.

Conclusão

A análise inicial dos dados revela que as geometrias com curvatura externa apresentaram os piores desempenhos, enquanto aquelas com curvatura interna demonstraram maior eficiência. Embora a presença de uma estrutura em formato de caixa parecesse favorecer a aceleração do vento em uma análise visual das simulações, os dados indicam o contrário. Além disso, observou-se que quanto maior a proporção dos diâmetros de entrada e saída, melhor seu desempenho.

Essa relação, no entanto, não se confirmou para o comprimento do funicular onde os dados mostraram que as geometrias com 100 mm de comprimento foram mais eficientes. O melhor resultado foi obtido por um modelo de curvatura interna com saída de 20 mm, que apresentou uma aceleração de 414%.

Outras geometrias analisadas também trouxeram ideias relevantes. Os cônicos do tipo "shisha" demonstraram um desempenho promissor nas menores variações. Já os cônicos complexos, sem a presença de caixa, se destacaram como a segunda melhor configuração, entre aqueles com 200 mm de comprimento e 60 mm de saída.

Embora a pesquisa se concentre na dinâmica do vento em contextos arquitetônicos, seu foco está exclusivamente no desempenho geométrico, permitindo ampla aplicabilidade. Esses achados corroboram princípios da dinâmica dos fluidos, como o Princípio de Venturi, e se alinham com estudos anteriores, como o trabalho de Dabaieh (2021) com funis de shisha e a solução do Eco-Cooler de Paul (2016). A presente pesquisa expande esses conhecimentos ao testar sistematicamente uma variedade de geometrias e proporções, oferecendo um panorama mais detalhado do desempenho aerodinâmico de diferentes elementos vazados. Por exemplo, a análise de garrafas PET comuns mostra que a geometria de curvatura dupla, típica das garrafas de Coca-Cola, tende a ser mais eficiente. Além disso, observou-se que o desempenho do escoamento melhora com a maior proporção entre áreas de entrada e saída, sendo essa proporção favorecida por garrafas com maior diâmetro corporal, dado o padrão fixo da boca.

Considerando desdobramentos futuros, esta pesquisa sugere a realização de simulações paramétricas voltadas à análise do impacto das proporções e comprimentos das geometrias dos condutos, buscando identificar limites críticos que comprometam seu desempenho. Investigações complementares podem incluir a análise de desempenho em conjunto e em ambientes reais ou simulados, validadas por testes em túnel de vento, além da mensuração de vazão de ar, ruído e esforços horizontais. Outras frentes promissoras incluem a aplicação em sistemas mecânicos de ventilação, analogias com o escoamento de fluidos como a água e a integração com processos de evapotranspiração, a exemplo dos eco-coolers, visando otimizações biofísicas e funcionais.

Esta pesquisa evidencia a relevância das geometrias de condutos como elementos-chave para o aprimoramento de estratégias passivas de ventilação, apontando caminhos viáveis para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e acessíveis. Ao propor alternativas que otimizam o conforto térmico e reduzem a dependência de sistemas mecânicos, o estudo contribui para a promoção da sustentabilidade em contextos urbanos diversos, especialmente onde a ventilação cruzada é normativa e os recursos são limitados. O impacto potencial reside não apenas na inovação técnica, mas na ampliação do acesso a tecnologias ambientais de baixo custo e alta eficiência, reforçando a pertinência e a urgência de seu aprofundamento.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15220-3: desempenho térmico de edificações – Parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.* Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

BRANDÃO, Rafael Silva. *As interações espaciais urbanas e o clima: incorporação das análises térmicas e energéticas no planejamento urbano.* 2009. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CÓSTOLA, Daniel. *Ventilação por ação do vento no edifício: procedimentos para quantificação.* 2006. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. DOI: https://doi.org/10.11606/D.16.2006.tde-26102010-144530.

COST. *Cost Action 14: Recommendations of the use of CFD in predicting pedestrian wind environment.* Brussels: COST, 2004.

DABAIEH, Marwa. Stay cool without fossil fuel: a passive eco-cooler for low-income population in informal settlements. *Journal of Physics*, Malmö, 2021.

GOODIER, Rob. Designed: This air conditioner for homes and offices uses no electricity. *Engineering for Change*, 30 abr. 2019. Disponível em: https://www.engineeringforchange.org/news/designed-air-conditioner-homes-offices-uses-no-electricity/. Acesso em: 14 fev. 2025.

IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. In: PÖRTNER, H.-O. et al. (eds.). *Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1017/9781009325844. Acesso em: 06 maio 2024.

KASTNER, P.; DOGAN, T. Eddy3D: A toolkit for decoupled outdoor thermal comfort simulations in urban areas. *Building and Environment*, 2021.

LAMBERTS, Roberto et al. *Eficiência energética na arquitetura.* 2. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2004.

LEITE, Renan Cid Varela. *Fortaleza: terra do vento – a influência da mudança de padrões de ocupação do solo sobre a ventilação natural em cidade de clima tropical úmido.* 2010. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PAUL, Ashis. Bangladesh: a low-tech air conditioner made from plastic bottles. *France24 Observers*, 2 jun. 2016. Disponível em: https://observers.france24.com/en/20160602-bangladesh-air-conditioner-plastic-bottles-technology. Acesso em: 14 abr. 2025.