APLICAÇÃO DE COMPONENTE GRASSHOPPER PARA ESTIMAR O PVN: ESTUDO DE CASO NO VALE DO MUCURI EM MG

Nayara R. M. Sakiyama (1); Davi Drummond Lopes (2); Felipe Isamu Harger Sakiyama (3)
(1) Dr.-Ing., Professora do Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia, nayara.sakiyama@ufvjm.edu.br
(2) Estudante do curso de Ciência e Tecnologia, davi.drummond@ufvjm.edu.br
(3) Dr.-Ing., Professor do Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia, felipe.sakiyama@ufvjm.edu.br
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia, Campus do Mucuri, Rua do Cruzeiro, 01 - Jardim São Paulo, Teófilo Otoni – MG, 39803-371
Tel.:(33) 3529-2700 Ramal:2945

RESUMO
Um edifício de alto desempenho deve atender aos requisitos de conforto ambiental e eficiência energética. As possíveis soluções incluem estratégias passivas como a ventilação natural (VN), que pode proporcionar conforto térmico e economia de energia. No entanto, seu desempenho depende do projeto do edifício e da interação com as características ambientais locais. Neste estudo, avalia-se o Potencial de Ventilação Natural (PVN) das cidades do Vale do Mucuri – MG, a partir de arquivos climáticos disponíveis. O cálculo do PVN foi implementado como um componente do plugin Grasshopper, uma plataforma de parametrização do modelador 3D Rhinoceros. Esse ambiente representa uma nova maneira de pensar o projeto, integrando análises climáticas e simulações termo energéticas à representação gráfica. O PVN baseia-se nos dados de temperatura do ar (bulbo seco e ponto de orvalho) e velocidade do vento. Ele pode ser interpretado como o número de horas/ano em que as condições climáticas externas corroboram para o uso da VN como estratégia de condicionamento de um edifício. Com base nesse dado quantitativo, projetistas podem verificar de maneira genérica se, e quando, a ventilação natural poderia ser adotada a fim de melhorar as condições de conforto dos edifícios numa determinada região.

Palavras-chave: potencial de ventilação natural, plugin grasshopper, plataforma paramétrica, ferramentas Ladybug.

ABSTRACT
A high-performance building must meet environmental comfort and energy efficiency requirements. Possible solutions include passive strategies such as natural ventilation (NV), which can provide thermal comfort and energy savings. However, its performance depends on building design and its interaction with local climate. In this study, we evaluate the Natural Ventilation Potential (NVP) of cities in the Mucuri Valley - MG, from available weather files. The NVP calculation was implemented as a component of the Grasshopper plugin, a parameterization platform inside the 3D modeler Rhinoceros. This environment represents a new way of thinking about design, integrating climate analysis and thermo-energy simulations into the graphical representation. The NVP is based on air temperature (dry bulb and dew point) and wind speed data. It can be interpreted as the amount of hours/year in which the external climatic conditions corroborate to the use of NV as a building conditioning strategy. Based on this quantitative data, designers can verify in a generic way if, and when, natural ventilation could be adopted to improve the buildings comfort conditions in each region.

Keywords: natural ventilation potential, grasshopper plugin, parametric platform, Ladybug tools.

1. INTRODUÇÃO

A ventilação natural (VN) tem ganhado atenção na busca por edifícios de alto desempenho e energeticamente eficientes. A tendência é impulsionada pela necessidade de mitigar as emissões de gases de efeito estufa e as mudanças climáticas. Um dos pontos mais críticos do debate energético atual é justamente a crescente demanda por aparelhos de ar-condicionado, alinhada à previsão de que o consumo de energia por resfriamento pode triplicar até 2050, considerando o cenário mundial (IEA, 2018). Semelhantemente, segundo a empresa Brasileira de Pesquisa Energética (EPE, 2022), as edificações comerciais e residenciais no país também apresentaram um aumento em seu consumo energético em cerca de 40% entre 2012 e 2021.

Nesse sentido, pesquisas apontam que edifícios naturalmente ventilados podem reduzir o consumo energético para resfriamento em cerca de 40% - 75% em relação aos prédios climatizados (RAMPONI, et al. 2014; TONG et al. 2016). Para isso, os edifícios precisam responder ao clima local, explorando estratégias passivas em sua fase de concepção. Como resultado, tem crescido o uso de ferramentas de análise ambiental, como o plugin paramétrico de código aberto e gratuito Ladybug (ROUDSARI, 2013) para o Grasshopper (DAVISON, 2023). O plugin pretende apoiar a tomada de decisão dos projetistas, simplificando o processo de análise ao automatizar cálculos e fornecer visualizações gráficas de fácil compreensão na interface de modelagem 3D Rhinoceros ou Rhino (MCNEEL & ASSOCIATES, 2023).

O projeto algorítmico, computacional ou paramétrico tornou-se uma tendência global. Novas ferramentas de software têm sido desenvolvidas para integrar análises climáticas e simulações termo energéticas do edifício com programas de representação digital. As plataformas representam uma nova maneira de pensar o projeto e de tomar decisões, que ajudam a desenvolver edifícios de alta eficiência (TOULOUPAKI E THEODOSIOU, 2017a). De acordo com Touloupaki e Theodosiou (2017b), softwares como o Rhino aumentaram a aplicação de modelagem paramétrica 3D por não programadores na prática de projeto. A nova geração de arquitetos está cada vez mais familiarizada com os processos digitais, de modo que essas ferramentas integradas subsidiam a criação de projetos baseados no desempenho (SHI et al., 2016).

Nesse contexto, Oliveira et. al (2017) realizaram simulações termo energéticas usando a plataforma Rhino/Grasshopper para variar a disposição e a área de ventilação de aberturas, verificando a influência desses parâmetros no desempenho térmico de uma edificação naturalmente ventilada em Teófilo Otoni – MG, principal cidade do Vale do Mucuri (VM). A região carece de pesquisas na área de arquitetura bioclimática e eficiência energética, pois como trata-se de uma região de clima quente (carga térmica por resfriamento), o conhecimento aprofundado relacionado à VN permitiria a proposição de soluções construtivas alinhadas ao clima local. O trabalho de Oliveira et. al (2017) mostrou justamente o impacto da ventilação natural no conforto térmico do usuário, demonstrando a importância da utilização de simulações computacionais como ferramenta de auxílio no projeto arquitetônico.

Ao mesmo tempo, o estudo apresentado por Souza et. al (2021), mostra que apesar dos arquitetos valorizarem a adoção de estratégias passivas em suas soluções, muitos projetam sem métricas. Os autores destacam que os dados de insolação, iluminação e ventilação natural são de grande relevância tanto para a concepção, quanto para o estudo preliminar, e propõem uma estrutura de trabalho para fomentar a inserção de simulações de desempenho térmico no processo de projeto, pautada no uso de ferramentas Ladybug.

Assim, percebe-se que a modelagem paramétrica 3D, combinada a um processo de projeto baseado em simulação, permeia os desafios atuais por edifícios de alto desempenho. Ao focar nas análises de ventilação natural para se descobrir com precisão os períodos em que a estratégia pode ser adotada, pode-se avaliar o Potencial de Ventilação Natural (PVN) de uma localidade ou de um edifício (SAKIYAMA et. al, 2020). O primeiro pode ser entendido como uma avaliação geográfica ou genérica, com base em dados meteorológicos (CAUSONE, 2016). O segundo é uma investigação mais específica, que estuda uma determinada construção, configuração ou estratégia (LI; LI, 2015). Ambos são essenciais, pois fornecem informações valiosas, tanto no estágio conceitual e para as primeiras decisões de projeto, bem como nas fases mais avançadas, em que até as taxas mínimas de troca de ar podem ser previstas (BEN-DAVID; WARING, 2016).

Pensando na integração de conceitos bioclimáticos às soluções arquitetônicas, especialmente os relacionados à ventilação natural, investigar o PVN de um local configura-se como um ponto de partida. A abordagem permite uma visão geral rápida se a VN sozinha seria capaz de atender exigências de conforto térmico interno, independentemente da tipologia construtiva e, sem ter que realizar simulações termo energéticas, algo útil nas fases iniciais de projeto e nas primeiras etapas de decisões.

2. OBJETIVO

Este artigo objetiva estimar o Potencial de Ventilação Natural (PVN) das cidades do vale do Mucuri – MG com arquivos climáticos disponíveis, quantificando as horas em que as condições externas são propícias para a VN na região.

3. MÉTODO

A avaliação do Potencial de Ventilação Natural de uma localidade quantifica o número de horas em um ano típico (8760h) em que as condições externas são adequadas para a ventilação natural, dispensando a necessidade de sistemas ativos de condicionamento. O procedimento de cálculo do PVN e de implementação de script para a plataforma paramétrica Rhino/Grasshopper/Ladybug, assim como os resultados gerados para as cidades do Vale do Mucuri, com os arquivos climáticos disponíveis, são detalhados a seguir:

3.1. Implementação do cálculo do Potencial de Ventilação Natural (PVN)

Com base no método descrito por Chen, Tong e Malkawi (2017) esta pesquisa utiliza dados de temperatura de bulbo seco (TBS), temperatura do ponto de orvalho (TPO) e velocidade do vento de um arquivo meteorológico para estimar o PVN de um local. O cálculo é implementado usando o editor de script python (Figura 1), um componente nativo do plugin paramétrico Grasshopper no modelador comercial 3D Rhino 7.

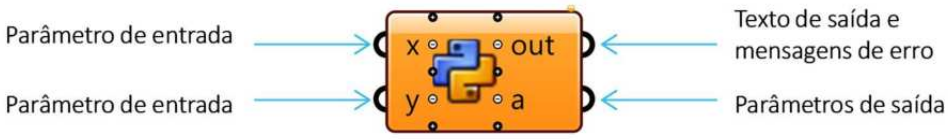


Figura 1 – Componente padrão Gh-Phyton. Modificado de Davison (2023) e Mcneel & Associates (2023)

Para os dados meteorológicos de entrada, utiliza-se o arquivo padrão EnergyPlus Weather (EPW), importado pelo plugin Ladybug (*DownloadEPW*) e desconstruído também por um componente Ladybug (*desconstructData*). Quanto aos limiares, emprega-se o modelo adaptativo da Norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013), que é utilizado para espaços naturalmente condicionados e relaciona as faixas de temperatura aceitáveis no ambiente interno com as condições externas. No componente são utilizados os critérios estabelecidos para espaços naturalmente condicionados e controlados pelos ocupantes, o que significa que as salas devem estar equipadas com janelas operáveis podendo ser abertas e ajustadas pelos usuários. As condições térmicas são consideradas satisfatórias quando a temperatura média externa predominante - $T_{mp(ext)}$ - é superior a 10ºC e inferior a 33.5ºC.

Segundo a ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013) há duas formas de se obter a $T_{mp(ext)}$. Em sua forma mais simples (1), ela pode ser aproximada pela temperatura média mensal. Entretanto, quando calculada a partir de dados climáticos horários, a expressão preferencial é a média exponencialmente ponderada de uma sequência de temperaturas médias diárias anteriores ao dia em análise (2), calculadas de acordo com a fórmula reduzida apresentada no Anexo I da Norma (ASHRAE, 2013). Com esta abordagem, dias do passado mais remoto têm menos influência sobre a temperatura de conforto do que os dias mais recentes. A velocidade média de resposta às mudanças no clima é controlada por uma constante (α) que varia de 0 a 1, onde os valores recomendados estão entre 0.9 e 0.6, representando uma média de resposta lenta e rápida, respectivamente.

No cálculo do potencial de ventilação natural (PVN) do local investigado, o usuário pode escolher como a temperatura externa média predominante - $T_{mp(ext)}$ - será considerada. A configuração mais simples, baseada nas médias mensais é o padrão do componente. Em sua forma preferencial, $T_{mp(ext)}$ é uma média exponencialmente ponderada das temperaturas de uma sequência de dias anteriores ao dia em questão (média móvel). O usuário pode definir a quantidade de dias considerados (entre 6 e 30 dias), assim como o valor adotado para a constante aplicada na velocidade de resposta às mudanças no clima. A teoria do conforto adaptativo sugere que uma resposta lenta ($\alpha = 0.9$), poderia ser mais apropriada para climas em que a variação de temperatura dia a dia é relativamente menor, como nos trópicos úmidos. Para os climas de latitude média, onde as pessoas estão mais familiarizadas com a variabilidade do clima em escala diária, um menor valor de α seria mais apropriado (ASHRAE, 2013).

A Tabela 1 resume os dados de entrada e saída do componente implementado. Os usuários têm acesso ao código fonte, escrito em inglês e podem personalizar o elemento com base em suas necessidades. Para visualizar os resultados componentes de plotagem de gráficos disponíveis no Ladybug podem ser utilizados.

Tabela 1 – Dados de entrada e saída do componente para o cálculo de PVN de uma localidade

		ORIGEM DOS DADOS		.epw	Implementado no componente	Editável
ENTRADA	Parâmetros $T_{mp(ext)}$	**1)** Média simples	Médias mensais	x	sim	não
		2) Média móvel ponderada	Quantidade de dias	-	14	sim
			Constante (α)	-	0.6	sim
	PVN	a) Temperatura de bulbo seco		x	-	não
		b) Temperatura do ponto de orvalho		x	-	não
		c) Velocidade do ar		x	-	não
SAÍDA	Potencial de Ventilação Natural (PVN) - usando todos ou apenas alguns dos limiares (a, b, c) • PVN/anual • PVN/mensal • PVN/noturno e diurno anual e mensal					

O limite para o valor máximo da velocidade do ar $U_{max;out}$ é calculado com base na Equação 1, que é uma relação empírica da pesquisa de Phaff et al. (1980) que considerou os efeitos da turbulência, vento e temperatura na ventilação natural.

$$U_{max,out} = \frac{\sqrt{U_{max,in} - C_2\, h\, \Delta T_{max} + C_3}}{C_1} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:
C_1 é a constante de influência do vento = 0.001 [kg m^{-3}];
C_2 é a constante de influência da temperatura = 0.0035 [m K^{-1} s^{-2}];
C_3 é a constante da velocidade do ar causada por turbulência = 0.01 [m^2 s^2];
$U_{max;in}$ é a velocidade máxima do ar interno = 1.2 [m/s], de acordo com ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013);
h é a altura vertical da abertura = 1 [m];
ΔT_{max} é a diferença máxima da temperatura horária entre a T_{sup}, e a temperatura interna T_{inf} durante os períodos de ventilação natural. Aqui, o valor é obtido assumindo como limites a faixa de temperatura média de conforto prescrito no modelo adaptativo, com 80% de aceitabilidade, que também considera as temperaturas externas médias predominantes - $T_{mp(ext)}$ - e são calculados de acordo com as Equação 2 eEquação 3:

$$\mathbf{T_{sup} = 0.31T_{mp(ext)} + 21.3} \quad \text{Equação 2}$$

$$\mathbf{T_{inf} = 0.31T_{mp(ext)} + 14.3} \quad \text{Equação 3}$$

Finalmente, em relação aos limites de umidade, foi definido um limite superior de 16.8 ºC para a temperatura do ponto de orvalho (TPO), conforme prescrito na Norma (ASHRAE, 2013).

3.2. Avaliação do Potencial de Ventilação Natural (PVN) do Vale do Mucuri, MG

A partir do componente implementado no Rhino/Grasshopper objetiva-se investigar o PVN das cidades do Vale do Mucuri (Figura 2). A mesorregião de Minas Gerais engloba a porção nordeste do estado, possuindo mais de 393.000 habitantes e cerca de 20.000 km² (CIDADE BRASIL, 2023). A maioria das cidades do VM pertencem a Zona Bioclimática 5 – NBR 15220-3 – (ABNT, 2005), que possui como estratégia de condicionamento térmico passivo a ventilação cruzada no verão e a inércia térmica no inverno (Tabela 2).



Figura 2 – Cidades do Vale do Jequitinhonha e Mucuri – MG (VIEIRA, et. al 2014)

Apenas 2 das 23 cidades do Vale do Mucuri possuem arquivos .epw disponíveis para download no plugin Ladybug: Teófilo Otoni (Z5) e Serra dos Aimorés (Z8) (destacadas na Figura 2 e na Tabela 2).

Tabela 2– Cidades do Vale do Mucuri, suas respectivas zonas e estratégias bioclimáticas (ABNT, 2005)

		Zona 5	**Zona 8**
Cidades		Águas Formosas, Ataléia, Bertópolis, Carlos Chagas, Catuji, Crisólita, Franciscópolis, Frei Gaspar, Fronteira dos Vales, Itaipe, Ladainha, Machacalis, Malacacheta, Novo Oriente de Minas, Ouro Verde de Minas, Pavão, Poté, Santa Helena de Minas, Setubinha, **Teófilo Otoni**, Umburatiba	Nanuque **Serra dos Aimorés**
Estratégias	**Aberturas para ventilação**	Médias	Grandes
	Sombreamento das aberturas	Sombrear as aberturas	
	Condicionamento térmico passivo	Ventilação Cruzada (verão) Vedações internas pesadas (inércia térmica)	Ventilação Cruzada permanente

4. RESULTADOS

O componente implementado em Phyton na plataforma paramétrica Rhino/Grasshopperpara o cálculo do Potencial de Ventilação Natural (PVN), a partir de dados climáticos horários (Figura 3), pode ser interpretado como o número de horas/ano em que as condições climáticas externas corroboram para o uso da VN como estratégia de condicionamento passivo de um edifício.

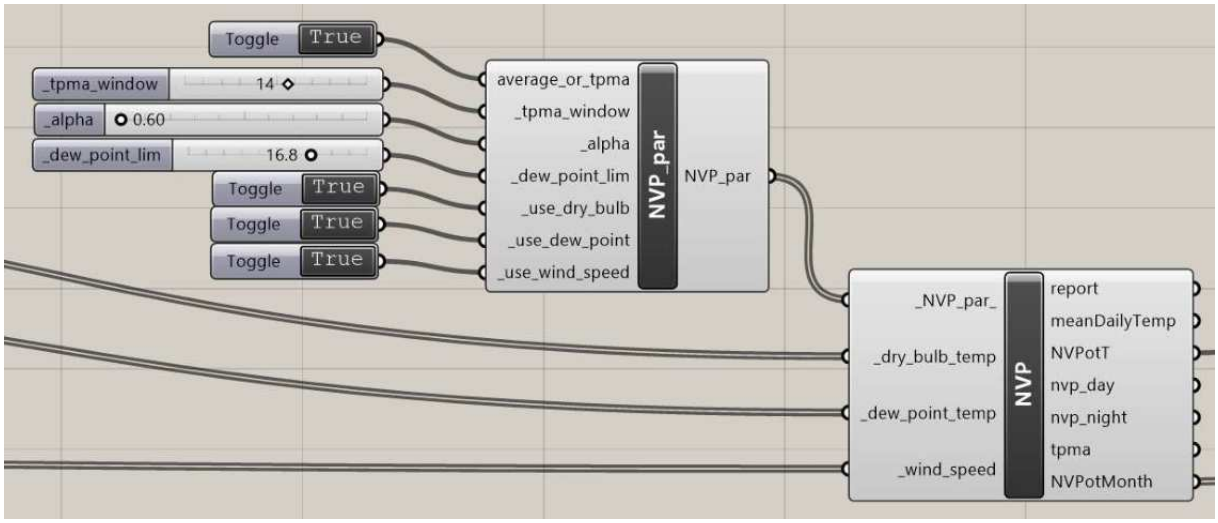


Figura 3 – Componente implementado na plataforma Rhino/Grasshopper para o cálculo do PVN de uma localidade.

Além do valor anual, o PNV mensal do local investigado também pode ser identificado, assim como o potencial de ventilação natural noturno e diurno. Com base nessas informações, projetistas podem verificar de uma forma genérica, mas quantitativa, se a ventilação natural seria uma estratégia capaz de melhorar as condições internas de conforto durante todo o ano, ou se ela se restringiria a alguns meses e/ou horários do dia ou da noite.

Nesse sentido, considerando somente os dados meteorológicos e adotando uma $T_{mp(ext)}$ baseada nos últimos 14 dias e um valor α de 0.6, seria possível abrir as janelas dos edifícios em apenas 1222 horas/ano em Teófilo Otoni (15.5%) e em 630 horas/ano em Serra dos Aimorés (7%). Além dos valores anuais totais, a influência de cada limiar na estimativa do PVN também é apresentada na Figura 4. A temperatura do ponto de orvalho (TPO) é a que configura a maior restrição em ambas as cidades do Vale do Mucuri, mas principalmente em Serra dos Aimorés. Tanto a temperatura de bulbo seco (TBS), quanto a velocidade do vento resultam num PVN mais otimista (superior a 55% e 90%, respectivamente) do que quando considerados em conjunto com a TPO. Isso deve-se a elevada umidade relativa desses locais, que aumenta a sensação térmica de desconforto e diminui a eficácia da ventilação natural.

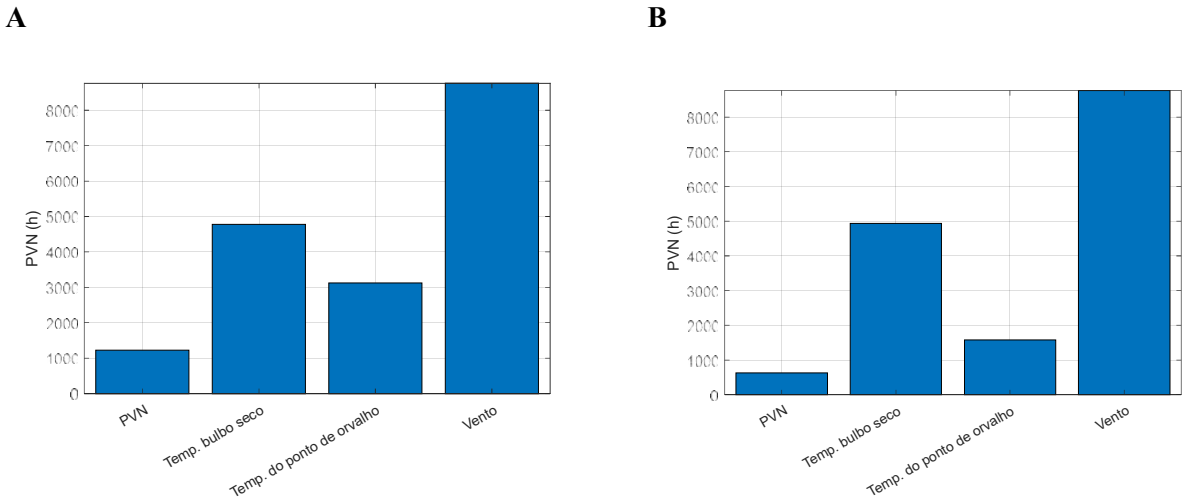
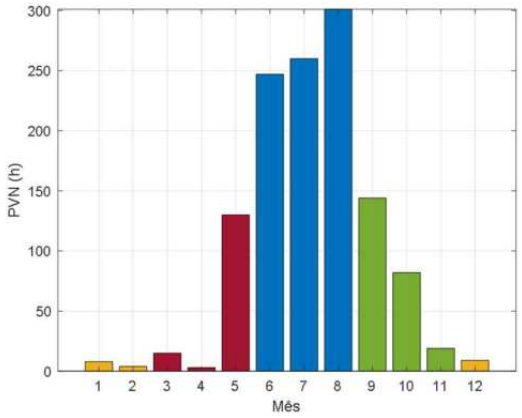


Figura 4 – PVN de acordo com os limiares adotados: (A) Teófilo Otoni; (B) Serra dos Aimorés.

Na Figura 5 é apresentado o Potencial de Ventilação Natural de cada um dos meses, coloridos de acordo com as respectivas estações do ano: outono (vermelho), inverno (azul) e primavera (verde). No verão (amarelo), o PVN é baixo em Teófilo Otoni e nulo para Serra dos Aimorés, que é quando as temperaturas do ponto de orvalho apresentam os maiores valores.

A



B

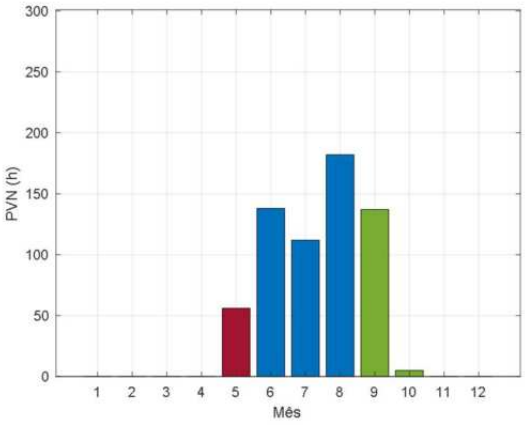


Figura 5 – PVN mensal: (A) Teófilo Otoni; (B) Serra dos Aimorés.

Portanto, com base na avaliação PVN realizada com o componente Grasshoper para as cidades do Vale do Mucuri com arquivos climáticos disponíveis, percebe-se que apenas a ventilação natural seria insuficiente para a manutenção do conforto térmico, principalmente no verão e no outono, sendo necessário a adoção de outras estratégias e/ou sistemas de condicionamento.

5. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta a avaliação do Potencial de Ventilação Natural de duas cidades do Vale do Mucuri – MG, Teófilo Otoni (Zona Bioclimática 5) e Serra dos Aimorés (Zona Bioclimática 8). O cálculo do PVN foi implementado em linguagem phyton num componente para o plugin paramétrico Grasshopper, dentro da plataforma paramétrica 3D Rhino. A partir da interação com o plugin ambiental Ladybug é possível realizar uma rápida análise genérica baseada em dados meteorológicos, a fim de subsidiar a tomada de decisão nas primeiras etapas de projeto.

Os resultados obtidos com o componente para as cidades analisadas apresentaram um baixo PVN, principalmente em detrimento das altas temperaturas do ponto de orvalho. Assim, conclui-se que vários parâmetros climáticos devem ser considerados numa análise geral, restrita aos dados de arquivos meteorológicos. Dessa forma, tem-se um diagnóstico quantitativo, capaz de auxiliar projetistas no uso da ventilação natural como estratégia de condicionamento passivo em suas propostas.

Finalmente, deve-se salientar que o potencial de ventilação não depende exclusivamente do clima, mas também das características do edifício, de modo que a análise específica é tão importante quanto a genérica, restrita ao computar apenas as horas que atendem aos limiares estabelecidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações -Parte 3: Zoneamento bioclimático Brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social**. Rio de Janeiro, 2005.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS: **Standard 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**, 2003.

BEN-DAVID, T., WARING, M.S., Impact of natural versus mechanical ventilation on simulated indoor air quality and energy consumption in offices in fourteen U.S. cities, **Building and Environment**. v. 104, pp. 320–336, 2016. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.007

CIDADE BRASIL. Disponível em: www.cidade-brasil.com.br/mesorregiao-do-vale-do-mucuri.html. Acesso em: abr. 2023.

CAUSONE, F. Climatic potential for natural ventilation, **Architectural Science Review**. v. 59 p.p 212–228, 2016 https://doi.org/10.1080/00038628.2015.1043722

CHEN, Y., TONG, Z.; MALKAWI, A. Investigating natural ventilation potentials across the globe: regional and climatic variations, **Building and Environment**. v. 122, pp. 386– 396, sep. 2017, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.026

DAVISON, S. **Grasshopper-Algorithmic Modeling for Rhino** [Software]. Disponível em: www.grasshopper3d.com. Accesso em: abr.2023)

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço energético nacional: Ano base 2021**. Empresa de Pesquisa Energética, [s. l.], p. 66, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf Acesso em: abr. 2023.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The Future of Cooling**. [s.l], 2018. Disponível em:

www.iea.org/reports/the-future-of-cooling.Acesso em: abri. 2023.
LI, Y., LI, X. Natural ventilation potential of high-rise residential buildings in northern China using coupling thermal and airflow simulations, Building Simulation. v. 8, pp.51–64, 2015. https://doi.org/10.1007/s12273-014-0188-1
MCNEEL, R. & ASSOCIATES. **Rhinoceros** [Software]. Disponível em: www.rhino3d.com. Accesso em abr. 2023.
OLIVEIRA, C. C.; SAKIYAMA, N. R. M.; MIRANDA; L. V. (2017). Desempenho térmico de uma edificação unifamiliar naturalmente ventilada para o clima de Teófilo Otoni-MG. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Vol. 13, pp. 57-72, 2017. Disponível em: https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/42940/pdf_1. Acesso em abr. 2023
PHAFF, J. C.; GIDS, W. F., TON, J. A.; REE, D. v/d.; SCHIJNDEL, L. L. M. v. **The Ventilation of buildings: Investigation of the consequences of opening one window on the internal climate of a room**. 1980.
RAMPONI, R., ANGELOTTI, A., BLOCKEN, B. Energy saving potential of night ventilation: sensitivity to pressure coefficients for different European climates, **Applied Energy**, v.123, pp.185–195, jun.2014, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.041
ROUDSARI, M. S., PAK, M. and SMITH, A. 'Ladybug: a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design', In: 13th Building Simulation, **Proceedings…** Chambéry, France, 2013, August 26-28, pp. 3128–3135.
SAKIYAMA, N. R. M., MAZZAFERRO, L., CARLO, J. C., BEJAT, T. and GARRECHT, H. Natural ventilation potential from weather analyses and building simulation, **Energy and Buildings**, v. 231, p. 110596, 2020. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110596
SOUZA, L. P. de .; BAVARESCO, M. V.; VAZ, C. E. V.; LAMBERTS, R. Inserção de simulações de desempenho térmico no processo de projeto. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 12, n. 00, p. e021011, 2021. Disponível em: https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8657346. Acesso em: abr. 2023.
TONG, Z., CHEN, Y., MALKAWI, A. et al. Energy saving potential of natural ventilation in China: The impact of ambient air pollution. **Applied Energy**, v. 179, pp. 660–668, oct. 2016, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.019
TOULOUPAKI, E. and THEODOSIOU, T. 'Performance Simulation Integrated in Parametric 3D Modeling as a Method for Early-Stage Design Optimization—A Review', **Energies**, vol. 10, pp. 637, 2017a.
TOULOUPAKI, E. and THEODOSIOU, T. Optimization of Building form to Minimize Energy Consumption through Parametric Modelling', **Procedia Environmental Sciences**, vol. 38, pp. 509–514, 2017b.
VIEIRA, F. T.; ALEXANDRINO, C. H.; SANTOS, J.. Rádio ciência: integração acadêmica e comunitária. **Revista Multidisciplinar Acadêmica Vozes dos Vales**, Teófilo Otoni, v. 1, n. 5, p.1-27. 2014.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio da Agência de Pesquisa do Estado de Minas Gerais e Desenvolvimento (FAPEMIG) - Processo: APQ-00872-22 – e da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), que por meio da Comissão de Iniciação Científica e Tecnológica - CICT financiaram parte desta pesquisa.