



ConBRepro

XI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



01 a 03
de dezembro 2021

Modelos de Conforto Térmico: uma breve revisão de literatura nos últimos 10 anos

Iasmin Lourenço Niza

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Ponta Grossa

Evandro Eduardo Broday

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Ponta Grossa

Resumo: O Conforto Térmico se tornou uma prioridade em ambientes para saúde, eficiência, qualidade de vida ou economia de energia. Fanger desenvolveu o modelo do PMV, capaz de prever a sensação térmica dos indivíduos, porém, costuma subestimar ou superestimar a realidade térmica. O objetivo deste artigo foi verificar os principais estudos da última década que tentaram reduzir essas diferenças por meio de modelos alternativos. Foi realizada uma Breve Revisão de Literatura com o auxílio do software StArt. Os resultados apresentam reflexões sobre os países de origem das pesquisas, mudanças nos modelos e métodos desenvolvidos. Diante das questões apresentadas, os novos modelos e adaptações têm contribuído para a redução de inconsistências nas respostas térmicas, economia de energia, entre outros.

Palavras-chave: Conforto Térmico, PMV, Modelo Adaptativo, Revisão de Literatura.

Thermal comfort models: a short literature review over the last 10 years

Abstract: Thermal Comfort has become a priority in environments for health, efficiency, quality of life and energy savings. In the 1970s, Fanger developed the PMV (Predicted Mean Vote) model, capable of predicting the thermal sensation of individuals. However, this model usually underestimates or overestimates the real thermal sensation, obtained in field studies. The main objective of this article was to verify the main studies in the last decade that tried to reduce these differences by means of alternative models. A Short Literature Review was conducted with the aid of the StArt software. The results present the countries of origin of the research, changes performed in the models and their developed. Given the issues presented, the new models and adaptations have contributed to the reduction of inconsistencies in thermal responses and energy savings.

Keywords: Thermal Comfort, PMV, Adaptative Model, Literature Review.

1. Introdução

Um ambiente termicamente confortável aumenta a satisfação, produtividade e bem-estar dos usuários do local e a análise do conforto térmico é uma questão muito importante, principalmente para engenheiros que projetam sistemas de ventilação, aquecimento e ar-condicionado (BRODAY; XAVIER, 2018).

O Conforto Térmico é definido como um estado de espírito que retrata o grau de satisfação das pessoas com o ambiente térmico (ASHRAE 55, 2021). Para fins de análise, Fanger desenvolveu um modelo chamado de Predicted Mean Vote (PMV), capaz de prever a percepção térmica em uma escala de 7 pontos referente ao equilíbrio térmico do corpo humano (MARTINEZ-MOLINA et al., 2017).

A equação matemática do PMV inclui os efeitos combinados de algumas variáveis e tem sido questionada em diversos estudos devido a sua acurácia nos resultados de apenas 34% (EKICI, 2016; CHEUNG et al., 2019). Partindo-se desta premissa, este artigo teve por finalidade a realização de uma Breve Revisão de Literatura para identificação de artigos que desenvolveram modelos alternativos ao PMV nos últimos dez anos que estavam contidos nas bases de dados da SCOPUS, Web of Science, Engineering Village e Science Direct.

2. Materiais e métodos

O software StArt desenvolvido pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) foi utilizado no processo de Revisão de Literatura. Na fase de planejamento, é realizada uma análise exploratória e as informações são preenchidas nos campos do protocolo.

Durante a fase de execução, os documentos foram pesquisados em quatro bases de dados de pesquisa acadêmica: Engineering Village, Scopus, Science Direct e Web of Science. As bases citadas foram escolhidas, pois são as que servem de referência para a área de pesquisa de Conforto Térmico como diversos periódicos indexados.

Foram considerados apenas os artigos científicos em inglês publicados entre 2011 e 2021, além disso, algumas palavras foram combinadas através de operadores booleanos, como: ("PMV model" OR "PMV" OR "Thermal Comfort model" OR "Predicted Mean Vote model" OR "Adaptative model") AND ("Development" OR "New").

Os artigos foram extraídos das bases e importados para o software e a triagem foi realizada por meio de diversos critérios, tais como: remoção de artigos duplicados; artigos que não continham título, resumo ou palavras-chaves; artigos que não continham título, resumo ou palavras-chaves relacionadas ao tema e artigos que não mencionavam uma proposta de modelo alternativo ao PMV. Na última etapa, foi feita a sumarização através dos levantamentos referentes aos resultados obtidos na Revisão de Literatura.

3. Resultados

De acordo com às consultas nas bases de dados a partir da combinação de palavras-chave, foram identificados 1372 artigos, sendo: 211 da Engineering Village, 387 da Scopus, 465 da Science Direct e 309 da Web of Science, conforme constado na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados encontrados na base de dados

Título, Resumos e Palavras-chave	Engineering Village	Scopus	Science Direct	Web of Science
---	----------------------------	---------------	-----------------------	-----------------------

("PMV model" OR "PMV" OR "Thermal Comfort model" OR "Predicted Mean Vote model" OR "Adaptative model") AND ("Development" OR "New")

211

387

465

309

Total

1372

Fonte: Autoria Própria (2021)

Na fase de seleção do total de documentos, 730 artigos foram rejeitados por não atenderem os critérios estabelecidos, 580 estavam duplicados em mais de uma base de dados e 62 foram aceitos para a etapa de extração. Destes 62 artigos que passaram para a fase de extração, 45 foram rejeitados e apenas 17 foram aceitos para a análise, conforme Figura 1.

Figura 1 – Seleção de artigos



Fonte: Autoria Própria (2021)

Os artigos aceitos para análise representavam apenas 1,24% de todos os documentos do início da busca. A partir das informações extraídas dos artigos, possibilitou a elaboração da Tabela 2 que apresenta os resultados segundo seus autores.

Tabela 2 – Modelos alternativos de Conforto Térmico

Referências	Local	Equações
Orosa (2011)	Espanha	Mode_of_Comfort=17,8001+0,552162.t+0,844826.RH
Orosa e Oliveira (2011)	Espanha	$PMV_n = -5,151 + 0,202 t + 0,553 p_v$
Nguyen, Singh e Reiter (2012)	Ásia	$T_{comf} = 0,341 T_{a,out} + 18,83; R^2 = 0,52$
Yun, Kong e Kim (2012)	Coreia	$T_{c(n)} = 0,113 \cdot T_{rm(n)} + 23,323$

Buratti, Ricciardi e Vergoni (2013)	Itália	$PMV=0,2428.T_o-5,3562$
Liping et al. (2013)	China	$CPMV=(0,303.e^{-0,36M}+0,028).[(M-W)-E'_{sk}-E'_c-E'_{lr}-E_{dr}-E_r]$
Brodav, Xavier e Oliveira (2014)	Brasil	$F(M) = [0,303.e^{(-0,036M)} + 0,028].L$ $- PMV$ $M_{k+1}=M_k-\frac{f(M_k)}{f'(M_k)}$
Yau e Chew (2014)	Malásia	$T_n=0,3314.T_{out}+14,858$
Zhao et al. (2014)	China	$PTV=m_0+m_1P_a+m_2t_a-m_3(R+C)$
Kim et al. (2015)	Coreia	$D_{PMV-ASHRAE} = -4,369 + 0,005T_{indoor} + 4044,633 AH + 1,518M_{clo} + 0,000271 T_{rm}^2$ $NewPMV=\alpha(PMV-D_{PMV-ASHRAE})$
Ruiz e Correa (2015)	Argentina	$IZA=-0,9796+0,0621.T_a-0,3257.v+0,0079.HR$
		$TSENS_{br} = \begin{cases} \frac{0,4685(T_{b,br}-T_{b,c})}{0,47\eta_{e,br}(T_{b,br}-T_{b,c})} & \begin{cases} T_{b,br} < T_{b,c} \\ \leq T_{b,br} \leq T_{b,h} \\ T_{b,h} \leq T_{b,br} \end{cases} \\ \frac{T_{b,h}-T_{b,c}T_{b,c}}{0,47\eta_{e,br}+0,685(T_{b,br}-T_{b,h})} \end{cases}$
Davoodi et al. (2017)	Irã	$TSENS_{cl} = \begin{cases} \frac{0,4685(T_{b,cl}-T_{b,c})}{0,47\eta_{e,cl}(T_{b,cl}-T_{b,c})} & \begin{cases} 0,4685(T_{b,cl}-T_{b,c}) \\ \leq T_{b,cl} \leq T_{b,h} \\ T_{b,h} \leq T_{b,cl} \end{cases} \\ \frac{T_{b,h}-T_{b,c}T_{b,c}}{0,47\eta_{e,cl}+0,685(T_{b,cl}-T_{b,h})} \end{cases}$
		$TSENS_{ov} = \begin{cases} \frac{0,4685(T_b - T_{b,c})}{0,47\eta_e(T_b - T_{b,c})} & \begin{cases} T_b < T_{b,c} \\ \leq T_b \leq T_{b,h} \\ T_{b,h} < T_b \end{cases} \\ \frac{T_{b,h} - T_{b,c}T_{b,c}}{0,47\eta_e + 0,685(T_b - T_{b,h})} \end{cases}$
Da Silva Júnior et al. (2020)	Brasil	$ICS=a+\frac{b}{V_{ar}}+c^*T_{ar}+\frac{d}{V_{ar}^2}+e^*T_{ar}^2+\frac{f^*T_{ar}}{V_{ar}}+\frac{g}{V_{ar}^3}+h^*T_{ar}^3+\frac{i^*T_{ar}^2}{V_{ar}}+\frac{j^*T_{ar}}{V_{ar}^2}$ $PMV_{new} = (0,303e^{-0,036M} + 0,28)\{M - W - 0,0014M(34 - T_a) - 3,96 \cdot 10^{-8}f_{cl}[(T_{cl} + 273)^4 - (\bar{T}_r + 273)^4] - f_{cl}h_c(T_{cl} - T_a) - 1,7 \cdot 10^{-5}M(5867 - P_v) - 0,00305[5733 - 6,99(M - W) - P_v] - Q_{sw}\}$
Omidvar e Kim (2020)	Austrália	$PMV_m=PMV_m(v_{still},t_a-CE,t_{mrt}-CE,RH, M, I_{cl})$
Zhang e Lin (2020)	China	$PMV_m=PMV_m(v_{still},t_a-CE,t_{mrt}-CE,RH, M, I_{cl})$
Zhou, Lai e Chen (2020)	China	$TSV=0,01.TL_g(\text{face})+0,216.T_{sk,m}-7,352+\frac{\Delta TL_s(\text{face})}{-3,0714.T_{out}+166,8}$
Ruivo, Silva e Brodov (2021)	Portugal	$PMV_{aps}=(\alpha_M M_0 - W - \dot{q}_{S,res} - \dot{q}_{L,res} - \dot{q}_{sw,skin} - \dot{q}_{dif,skin} - \dot{q}_{rad} - \dot{q}_{conv})\Psi_{HV,cal} + \Psi_{cal}$

Fonte: Autoria Própria (2021)

Nos artigos foi possível notar que diversas palavras apareciam com grande frequência ao longo de seu desenvolvimento, desta maneira o software StArt gerou uma nuvem de

palavras (Figura 2) que contribuiu para exemplificar e deixar mais visual quais seriam essas palavras.

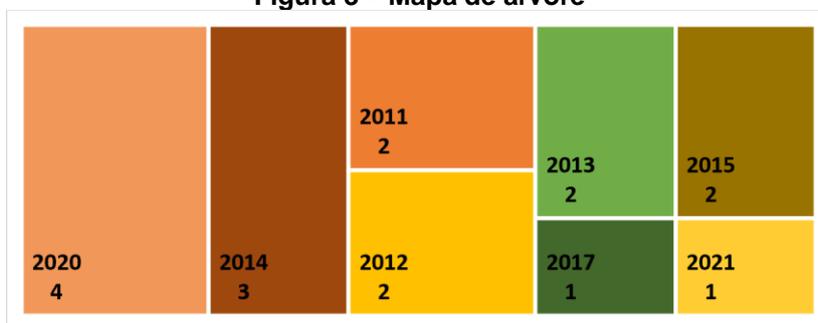
Figura 2 – Nuvem de palavras



Fonte: Autoria Própria (2021)

Neste artigo foi realizada uma análise bibliométrica que buscou trazer características gerais dos estudos que desenvolveram modelos alternativos de Conforto Térmico. Os 17 artigos que compunham esta breve revisão de literatura foram publicados em 8 periódicos diferentes, onde a quantidade publicada a cada ano foi representada no mapa de árvore (Figura 3). Foi possível observar que em 2020 houve um maior número de publicações que correspondiam aproximadamente a 23,53% dos artigos selecionados.

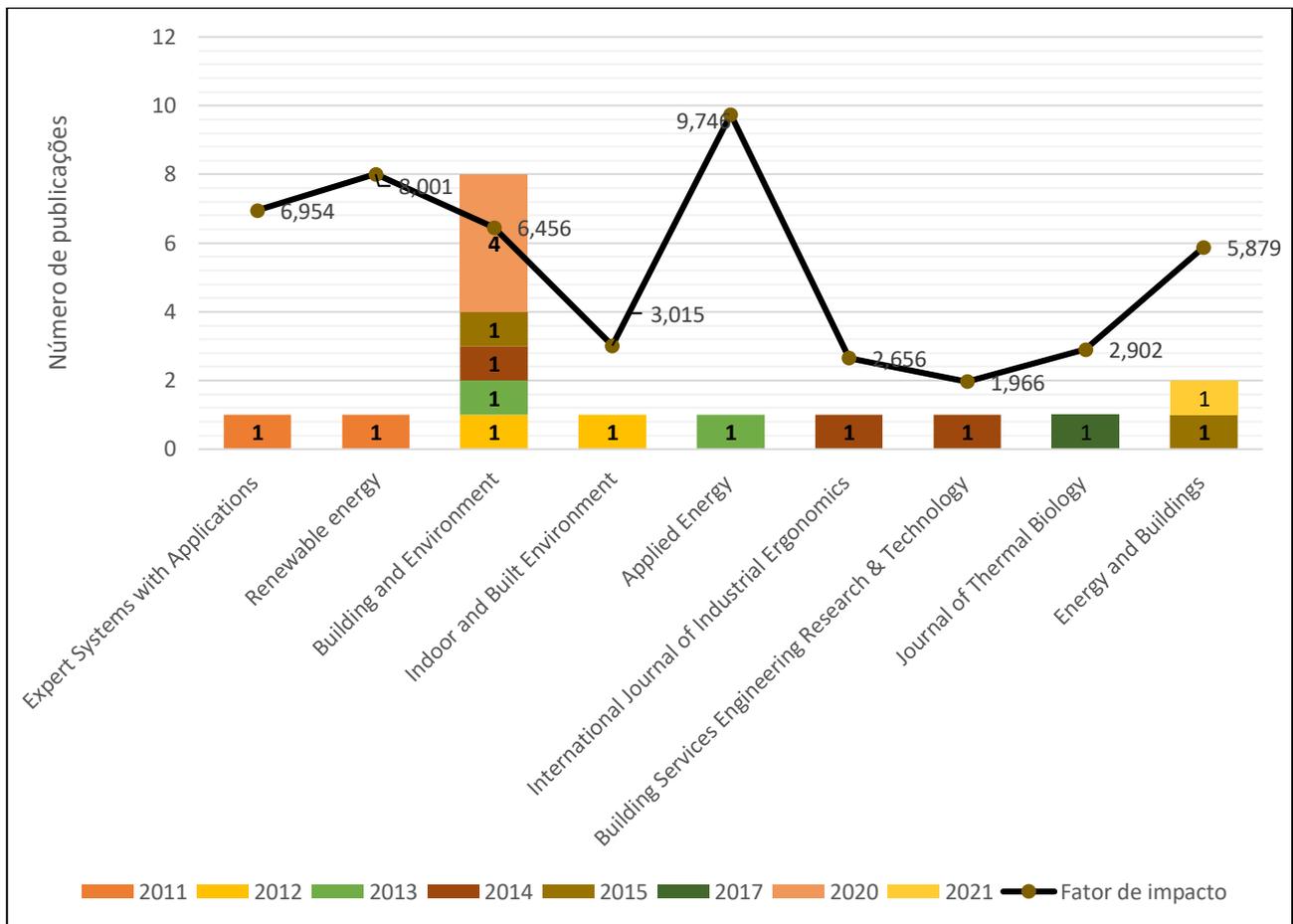
Figura 3 – Mapa de árvore



Fonte: Autoria Própria (2021)

Após a realização da análise dos artigos, a Figura 4 foi apresentada a quantidade de artigos publicados nos periódicos por meio das barras verticais do gráfico em conjunto com os seus respectivos fatores de impacto que foi representado pelas linhas. Este fator de impacto inserido na representação gráfica foi obtido através de uma consulta no site Incites Journal Citation Reports Clarivate Analytics.

Figura 4 – Relação entre o Fator de impacto e a quantidade de artigos publicados nos periódicos



Fonte: Autoria Própria (2021)

4. Discussão

Nos estudos observou-se que ambos possuíam características comuns para melhorar o Conforto Térmico. Muitos desses modelos foram desenvolvidos, aprimorados em um único modelo ou resultaram de modificações em alguns dos parâmetros existentes, como no modelo de Broday, Xavier e Oliveira (2014), que obtiveram duas maneiras para calcular a taxa metabólica e aprimorar o modelo de Fanger.

Além disso, é comum observar as diferentes finalidades com que os modelos foram desenvolvidos, pois os autores buscaram desenvolver metodologias que se adaptassem às realidades das regiões, edifícios, climas, tipos de ventilação, entre outros, como nos modelos: Orosa (2011) adaptado ao ambiente com um registrador térmico; Orosa e Oliveira (2011) que comparam a temperatura neutra com as condições reais; Nguyen, Singh e Reiter (2012) para edifícios com ventilação natural em condições de calor e umidade; Yun, Kong e Kim (2012) para escritórios; Buratti, Ricciardi e Vergoni (2013) para ambientes moderados; Liping et al. (2013) para controlar a temperatura ideal em cabines de aeronaves; Yau e Chew (2014) para uso em hospitais; Zhao et al. (2014) usando coeficientes personalizados; Kim et al. (2015) para reduzir a energia de resfriamento de edifícios com ar-condicionado; Ruiz e Correa (2015) melhorar o design de espaços ao ar livre; Davoodi et al. (2017) estimar a percepção térmica de partes do corpo nuas e vestidas; Zhou, Lai e Chen (2020) prevêem mudanças de carga de calor no motorista devido a uma mudança repentina de radiação solar durante a condução; Da Silva Júnior et al. (2020) voltada para o desenvolvimento de controladores para sistemas de ar-condicionado; Omidvar e Kim (2020) aprimoraram o modelo de Fanger regulando a perda de calor através da transpiração; Zhang e Lin (2020) modificaram em seu modelo a temperatura da pele

simplificada pela temperatura da pele do modelo de temperatura efetiva padrão e Ruivo, Silva e Broday (2021) ajustando a pressão atmosférica.

Diversas metodologias podem ser utilizadas no processo de desenvolvimento do modelo adaptativo ao PMV, optando assim por aquela que promete melhorar seu desempenho ao estimar as percepções térmicas, tais como: Orosa (2011) com abordagem estatística; Orosa e Oliveira (2011) com modelo linear; Nguyen, Singh e Reiter (2012) com meta-análise; Yun, Kong e Kim (2012) com análise de regressão; Broday, Xavier e Oliveira (2014) com o método de Newton; Zhao et al. (2014) com modelagem baseada em dados; Kim et al. (2015) com a teoria da caixa preta e a teoria do conforto adaptativo; Ruiz e Correa (2015) com modelo estatístico; Davoodi et al. (2017) com modelo de conforto térmico personalizado baseado em um modelo de 3 nós; Zhang e Lin (2020) com o modelo PMV modificado; Da Silva Júnior et al. (2020) com o modelo de regressão não linear; Omidvar e Kim (2020) com a regressão fuzzy parcial partes; Buratti, Ricciardi e Vergoni (2013), Liping et al. (2013), Yau e Chew (2014), Zhou, Lai e Chen (2020) e Ruivo, Silva e Broday (2021) com a regressão linear.

5. Considerações finais

As pesquisas para melhorar o Conforto Térmico continuam a fim de proporcionar ambientes mais adequados às necessidades dos indivíduos, visto que passam a maior parte do seu dia nesses locais. De acordo com os 17 estudos selecionados, os métodos apresentaram mudanças significativas na previsão do conforto térmico, bem como na economia de energia pela redução do uso de sistemas de ventilação e ar-condicionado, adaptação ao clima local, entre outros.

O modelos adaptativos são capazes de reconhecer as diferentes necessidades das pessoas e isso faz com que eles tenham um diferencial maior em relação ao PMV de Fanger. Graças a revisão de literatura, foi possível mostrar a importância, relevância e aplicabilidade dos modelos.

Financiamento

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES).

Referências

American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers, INC. **Thermal environmental conditions for human occupancy**. ASHRAE STANDARD 55-2020. Atlanta, 2021.

BRODAY, E. E., XAVIER, A. A. P. A systematic literature review on Thermal Response Votes (TSV) and Predicted Mean Vote (PMV). In: Azeres, P. M.; Baptista, J. S.; Barroso, M. P.; Carneiro, P.; Cordeiro, P.; Costa, N.; Melo, R. B.; Miguel, A. S.; Perestrelo, G. **Occupational Safety and Hygiene VI - Selected contributions from the International Symposium Occupational Safety and Hygiene**. CRC Press, 2018, p. 13-17.

BRODAY, E. E., XAVIER, A. A. P., OLIVEIRA, R. Comparative analysis of methods for determining the metabolic rate in order to provide a balance between man and the environment. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 44, p. 570-580, 2018.

- BURATI, C., RICCIARDI, P., VERGONI, M. HVAC systems testing and check: A simplified model to predict thermal comfort conditions in moderate environments. **Applied Energy**, v. 104, p. 117-127, 2013.
- CHEUNG, T., SCHIAVON, S., PARKINSON, T., LI, P., BRAGER, G. Analysis of the accuracy on PMV – PPD model using the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II. **Building and Environment**, v. 153, p. 215-217, 2019.
- DA SILVA JÚNIOR, A., MENDONÇA, K. C., VILAIN, R., PEREIRA, M. L., MENDES, N. On the development of a simplified model for thermal comfort control of split systems. **Building and Environment**, v. 179, 2020.
- DAVOODI, F., HASANZADEH, H., ZOLFAGHARI, S. A., MAEREFAT, M. Developing a new individualized 3-node model for evaluating the effects of personal factors on thermal sensation. **Journal of Thermal Biology**, v. 69, p. 1-12, 2017.
- EKICI, C. Measurement Uncertainty Budget of the PMV Thermal Comfort Equation. **International Journal of Thermophysics**, v. 37, 2016.
- KIM, J. T., LIM, J. H., CHO, S. H., & YUN, G. Y. Development of the adaptive PMV model for improving prediction performances. **Energy and Buildings**, v. 98, p. 100-105, 2015.
- LIPING, P., YINGJIE, W., MENG, L., HELIN, Z., JUN, W. Method to predicting optimal cabin operative temperature for civil aircraft. **Building and Environment**, v. 69, p. 160-170, 2013.
- MARTINEZ-MOLINA, A., BOARIN, P., TORT-AUSINA, I., VIVANCOS, J.-L. Post-occupancy evaluation of a historic primary school in Spain: Comparing PMV, TSV and PD for teachers' and pupils' thermal comfort. **Building and Environment**, v. 117, p. 248-259, 2017.
- NGUYEN, A. T., SINGH, M. K., REITER, S. An adaptive thermal comfort model for hot humid South-East Asia. **Building and Environment**, v. 56, p. 291-300, 2012.
- OMIDVAR, A., KIM, J. Modification of sweat evaporative heat loss in the PMV/PPD model to improve thermal comfort prediction in warm climates. **Building and Environment**, v. 176, 2020.
- OROSA, J. A. A new modelling methodology to control HVAC systems. **Expert Systems with Applications**, v. 38, p. 4505-4513, 2011.
- OROSA, J. A., OLIVEIRA, A. C. A new thermal comfort approach comparing adaptive and PMV models. **Renewable Energy**, v. 36, n.3, p. 951-956, 2011.
- RUIVO, C. R., SILVA, M. G., BRODAY, E. E. Methodology for calculating an atmospheric pressure-sensitive thermal comfort index PMVaps. **Energy & Buildings**, v. 240, 2021.
- RUIZ, M. A., CORREA, E. N. Adaptive model for outdoor thermal comfort assessment in an Oasis city of arid climate. **Building and Environment**, v. 85, p. 40-51, 2015.

YAU, Y. H., CHEW, B. T. Adaptive thermal comfort model for air-conditioned hospitals in Malaysia. **Journal of Building Services Engineering Research & Technology**, v. 35, n. 2, p. 117-138, 2014.

YUN, G. Y., KONG, H. J., KIM, J. T. The Effect of Seasons and Prevailing Environments on Adaptive Comfort Temperatures in Open Plan Offices. **Indoor and Built Environment**, v. 21, n. 1, p. 41-47, 2012.

ZHANG, S., LIN, Z. Predicted Mean Vote with skin temperature from standard effective temperature model. **Building and Environment**, v. 183, 2020.

ZHAO, Q., ZHAO, Y., WANG, F., WANG, J., JIANG, Y., ZHANG, F. A data-driven method to describe the personalized dynamic thermal comfort in ordinary office environment: From model to application. **Building and Environment**, v. 72, p. 309-318, 2013.

ZHOU, X., LAI, D., CHEN, Q. Thermal sensation model for driver in a passenger car with changing solar radiation. **Building and Environment**, v. 183, 2020.