

SIMULAÇÃO DO SISTEMA TERMORREGULADOR DO CORPO HUMANO NO TREM/METRÔ

Lucas Caselli¹, Cyro Albuquerque Neto²
^{1,2}Engenharia Mecânica, Centro Universitário FEI
 lucas.caselli@icloud.com, cyroan@fei.edu.br

Resumo: O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo do sistema termorregulador para simular as condições no ambiente de um trem/metrô, a fim de que possa ser feita uma análise de conforto térmico. Esse modelo foi desenvolvido a partir das trocas gasosas no sistema respiratório, levando em consideração o fluxo sanguíneo e a geração de energia no corpo humano. O conforto térmico é estudado com base no grau de satisfação do indivíduo nos ambientes simulados nos vagões de trem/metrô.

1. Introdução

No ambiente interno de um trem/metrô, a transferência de calor com o passageiro é influenciada pela ventilação das janelas, difusores, radiação solar, assentos e em alguns casos o ar condicionado, ou seja, a troca térmica está diretamente relacionada ao ambiente externo.

Para essa análise, é necessário levar em consideração o caminho percorrido pelo trem/metrô, pois tanto o percurso acima do solo e o percurso subterrâneo apresentam comportamentos diferentes na questão da troca térmica.

A priori, a modelagem desse complexo sistema é feita com base na fisiologia do corpo humano, pois os modelos da literatura para transferência de calor incluem tecidos e órgãos, além da circulação do sangue, transferência de energia com o ambiente, funções reguladoras de circulação e sudorese.

Além da fisiologia, foi necessário também adotar os modelos que auxiliam na prevenção do conforto térmico de acordo com parâmetros ambientais [1,2].

2. Metodologia

Como ponto de partida, foi realizada uma pesquisa com base nas condições climáticas para definir parâmetros de temperaturas e a quantidade de chuvas, pois como a cidade de São Paulo tem predominância de clima subtropical, o inverno tende a ser mais seco, o que reduz a umidade relativa do ar, já no verão, o clima mais úmido faz com que aumente a quantidade de vapor d'água na atmosfera, com isso, é necessário analisar as mudanças nas propriedades físicas do ar.

Os parâmetros fisiológicos abordados tem como base a troca gasosa de O₂ e CO₂ no sistema respiratório dentro dos alvéolos pulmonares por meio da hematose, o oxigênio é transportado através do fluxo sanguíneo pela hemoglobina aos tecidos e órgãos do corpo, o mesmo fluxo sanguíneo por meio da homeostase, equilibra o O₂ e o CO₂ nos mesmos tecidos e órgãos. Todo esse sistema é regulado por sinais da temperatura corporal, nível de atividade e concentração de oxigênio e gás carbônico no corpo.

Durante o trajeto do usuário do trem/metrô até o seu embarque, alguns passageiros tendem a se locomover mais rápido, isso faz com que o metabolismo seja acelerado gerando um aumento do fluxo sanguíneo, com isso, ocorre um aumento da temperatura do corpo. Essa relação faz com que a troca térmica seja influenciada também por análises de exercício físico [3,4].

Além das atividades físicas, é levado em consideração os mecanismos da perda de calor por taxa de evaporação [5,6], vasomotor [7] e tremor muscular [8] para modelagem do sistema termorregulador.

Para modelagem completa desse sistema, foram realizadas divisões entre compartimentos para simplificação, o corpo humano foi modelado por segmentos no formato de cilindros com seção transversal elíptica [9], os compartimentos dos vasos circulatórios foram divididos em pequenos e grandes, os tecidos tem a mesma temperatura dos vasos pequenos [10], foi feita a modelagem dos compartimentos do sistema respiratório e os mecanismos de funcionamento do metabolismo, e as propriedades das vestimentas que influenciam na troca de calor por condução e convecção das trocas térmicas com o ambiente.

3. Conforto Térmico

De acordo com as diferentes situações existentes no vagão de trem/metrô, foi implementado um índice de conforto térmico, que representa a satisfação de um indivíduo em um ambiente térmico [2]. Pelo fato de cada ser humano ser único, cada indivíduo tem a sua percepção de conforto e satisfação, portanto, a definição desse termo depende de parâmetros físicos, processos fisiológicos, psicológicos e culturais.

Inicialmente, para cálculo das variáveis que influenciam os índices de conforto, aplica-se um balanço de energia da interação térmica do corpo humano com o ambiente [2].

$$M - W = q_{sk} + q_{res} + S_{sk} + S_{cr} \quad (1)$$

Onde:

M = Taxa de produção de calor metabólico [W/m²]

W = Taxa de trabalho mecânico realizado [W/m²]

q_{sk} = Taxa total de calor perdido pela pele [W/m²]

q_{res} = Taxa total de perda de calor pela respiração [W/m²]

S_{sk} = Taxa de armazenamento de calor na pele [W/m²]

S_{cr} = Taxa de armazenamento de calor nos compartimentos internos [W/m²]

O conforto térmico tem a fase inicial de cálculo a partir deste equacionamento, ao longo da pesquisa, a modelagem será desenvolvida de acordo com balanços de massa e variáveis físicas que compõem as funções

metabólicas e as reações do ambiente provocadas no corpo humano.

Os primeiros estudos de conforto térmico foram realizados por Fanger [1] e desenvolvidos na década de 70, e para quantificar esses parâmetros, foi criado o modelo *Predicted Mean Vote* (PMV).

Essa escala representa a média da sensação térmica sentida por um grupo de pessoas com objetivo de definir parâmetros de quente/frio e suas respectivas pontuações. Ela foi feita com base em dados experimentais coletados a partir de padrões de roupas, atividades e determinados ambientes climatizados.

Os parâmetros foram obtidos na combinação de quatro variáveis físicas (temperatura do ar, velocidade do ar, temperatura externa e umidade relativa) e duas variáveis pessoais (isolamento de roupas e nível de atividade). O PMV conta com um range de ± 3 de acordo com a escala *ASHRAE* [11].

Tabela I – Escala de Sensação Térmica.

Parâmetros	Pontuação
Muito quente	+3
Quente	+2
Ligeiramente quente	+1
Neutro	0
Ligeiramente frio	-1
Frio	-2
Muito frio	-3

4. Conclusões

Para nível de controle do conforto térmico, a princípio é feito um gráfico de temperaturas com base nas trocas térmicas, como os seres humanos são endotérmicos (capacidade de geração de calor por reações metabólicas), o calor proveniente da radiação solar aumenta a temperatura da pele, forçando a termorregulação a manter a temperatura interna estável. Portanto, o conforto térmico também está relacionado a quantidade de energia que o corpo gasta para manter a temperatura interna equilibrada.

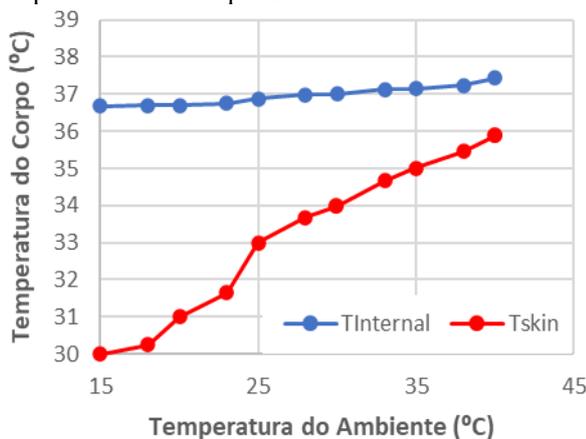


Figura 1 –Gráfico de Temperaturas.

Para as etapas futuras, espera-se analisar as condições com variação de vestimentas, parâmetros fisiológicos e climáticos, além de simular situações de regime transitório, pois este é o mais comum dentro dos vagões de trens/metrô.

Ao final da pesquisa, o resultado mais esperado é a não linearidade e uniformidade dos dados, devido ao conforto térmico abranger parâmetros psicológicos e pessoais, cada indivíduo tem a sua capacidade cognitiva de definir níveis de conforto, porém, é possível adotar um critério médio de satisfação de acordo com as aplicações desejadas.

5. Referências

- [1] P.O. Fanger, *Thermal comfort analysis and application in environmental engineering*, New York McGraw-Hill, (1970).
- [2] Ashrare, *Thermal comfort*, In: *Handbook, Fundamentals*. Atlanta [s.n.] **9** (2009).
- [3] C. E. K. Mady; C. Albuquerque; T. L. Fernandes; et. al., *Journal Energy*, **62** (2013) 370 -378
- [4] C.E K. Mady; T. L. Igarashi; C. Albuquerque; et. al., *Journal Of The Brazilian Society Od Mechanical Sciences And Engineering*, **41** (2019) 1-11
- [5] M.S. Ferreira; J.Y. Yanagihara, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **36** (2013) 370–378.
- [6] M.V. Savage; G. L. Brengelmann, *Journal Of Applied Phydology*, **80** (1996) 1249-1257
- [7] E. R. Nadel; R.W. Bullard. J.A Stolwijk, *Journal Of Applied Physiology*, **31** (1971) 80-87
- [8] R. G.Gordon; R. B. Roemer; S. M. Horvath, *IEEE Transaction on Biomedical Engineering*, (1976) 434-444
- [9] M. S. Ferreira; J. Y. Yanagihara, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **36** (2009) 718–724.
- [10] M. M. Chen; K. R. Holmes, *Annals of the New York Academy Of Sciences*, **335** (1980) 137–150.
- [11] P.O. Fanger, *ASHRAE Transactions*, **73** (1967) 1-20.

¹ Aluno de IC do Centro Universitário FEI. Projeto com vigência de 11/2022 a 12/2023.