



# MESTRADO EM ENGENHARIA DE SEGURANÇA E HIGIENE OCUPACIONAIS

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre  
Engenharia de Segurança e Higiene Ocupacionais  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

## AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO DINÂMICO USANDO O MODELO RACIONAL

Cleres Romualdo Borges Júnior

**Orientador:** Professora Doutora Joana Cristina Cardoso Guedes (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto)

**Coorientador:** Professora Mestre Joana Alexandra Silva Duarte (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto)

**Arguente:** Professor Doutor André Duarte Lucena (Universidade Federal Rural do Semi-Árido) - BR

**Presidente do júri:** Doutor Mário Augusto Pires Vaz (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto)

2020





---

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto PORTUGAL

VoIP/SIP: [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt) ISN: 3599\*654

 Telephone: +351 22 508 14 00  Fax: +351 22 508 14 40

 URL: <http://www.fe.up.pt>  Correio Electrónico: [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)



Este trabalho está redigido segundo o acordo ortográfico em português do Brasil.



## **AGRADECIMENTOS**

Desejo expressar um agradecimento em especial ao meu grandioso e querido DEUS, à minha orientadora e Prof. Doutora Joana Guedes, por toda a sua contribuição e dedicação durante todo o curso, e na realização dessa Dissertação, mostrando-se sempre disponível e atenciosa, foi uma satisfação enorme adquirir conhecimento, e por me dar a oportunidade de aprender com ele, sempre me incentivou a obter resultados científicos de alta qualidade, a você o **MEU MUITO OBRIGADO!**

Agradeço imensamente ao meu amigo “Afonso Ferro”, por sempre fazer-se presente durante a minha trajetória de vida, por me ajudar a tomar a decisão de realizar esse Mestrado, e aconselhar-me na vida, és uma pessoa muito especial para mim, a você o **MEU MUITO OBRIGADO!**

Gratifico muitíssimo ao meu amigo “Carlos Espanhol”, desde sempre presente nessa Dissertação, me ajudando e aconselhando com suas pesquisas e dicas para o levantamento de dados, me incentivando e motivando nas horas de recaídas e esmorecimentos, a você o **MEU MUITO OBRIGADO!**

Quero agradecer e expressar o quão sou grato ao meu grande amigo e mentor “Eng. Paulo ferro e sua família”, sem a sua orientação, lá no início de tudo, não seria possível chegar a essa fase, a você o **MEU MUITO OBRIGADO!**

Um agradecimento especial ao professor Mestre “Eng. Marcus Bergman, Rosemberg Brasileiro” e aos Professores e Doutores “ Eng. Rodrigo Otávio, Eng. Vinícios Machado e José Seixas” da Escola de Engenharia e Ciências do Centro Universitário Augusto Motta, por contribuir para a minha formação acadêmica e incentivo ao ingresso desse Mestrado, a vocês o **MEU MUITO OBRIGADO!**

A minha coorientadora e Professora Mestre “Joana Alexandra” por toda sua assistência na análise estatística, escolhas de artigos e feedbacks na hora de expressar as ideias científicas para o corpo do trabalho. Aos meus novos amigos do MESHÓ, Kemislani de Souza, Marcelo de Paula e Luís Trinta, agradeço a companhia, as petiscadas e as partilhas de experiências, a vocês o **MEU MUITO OBRIGADO!**

E por último, mas definitivamente não menos importante, desejo agradecer a minha família em especial ao meu primo “Daniel Jerônimo Romualdo”, amigos em especial “Ricardo Lyra e família” que me deram toda a força, apoio e motivação para realizar todas as conquistas dos últimos anos. Dedico em especial esse trabalho a minha doce e amada “MÃEZINHA”, “Sra. Maria da Paz”, por ter me orientado e formado a pessoa que sou, a Senhora o **MEU MUITO OBRIGADO!**



*“Tudo que for fazer, faça com amor, fé e dedicação... O reconhecimento virá com o tempo, não para fortalecer seu ego, mas para que as pessoas notem que você é uma pessoa cheia de luz e que Deus te usa de uma forma única!”*

*Guilherme Albuquerque*





## RESUMO

O conforto térmico ao ar livre vem sendo alvo de atenção a algumas décadas, isso por que a demanda de trabalho ao ar livre tornou-se demasiadamente grande, e, a falta de índices para torna a avaliação suficientemente em conformidade para ambiente transiente, faz com que o tipo de avaliação para essas condições não tenha parâmetros suficientes para analisar fisiologicamente os profissionais em exposição direta ao clima exterior. Neste trabalho procurou-se analisar a termorregulação humana através de um modelo matemático dinâmico racional, capaz de detectar as respostas fisiológicas do corpo humano e investigar os índices que são gerados pelas respostas do modelo em função do tempo em condições reais, que seja capaz de adapta-se a versatilidade do ambiente. O modelo apresentado nessa pesquisa originou-se através do Modelo de Dois Nós de Gagge (1972, 1986), onde foram realizadas algumas implementações na modelagem para a correção do isolamento do vestuário e adaptações do modelo para convecções forçadas em ambiente externo transitórios, as adaptações foram realizadas através de equações matemáticas utilizando algumas normas voltadas ao conforto térmico como a ISO 7933 (1987), ASHRAE (1997), ISO 7730 (2007), ISO 9920 (2006) e ISO 7726 (1998). Na prática pudemos conceptualmente distinguir dois sistemas separados em termorregulação: o sistema ativo que basicamente retrata as respostas fisiológica que o corpo humano reproduz quando exposto a diferentes condições térmicas e o sistema passivo que é reproduzido pelos eventos de transferência de calor que incidem dentro do corpo humano e o ambiente externo, estes se dividem em duas camadas, sendo representado em forma de cilindro, a concha que retrata a pele e o núcleo do cilindro o sistema central sanguíneo. A programação foi realizada em linguagem Python, por demonstrar vantagem de ser multiplataforma. Nesta investigação propõem-se, logo, duas formas de analisar o ambiente, sendo ao ar livre e interno simulado, de maneira a verificar o comportamento do modelo para diferentes condições climáticas (frio, quente e termoneutral), os índices gerados na modelagem correspondem a  $T_{sk}$ ,  $T_{cr}$ ,  $ET^*$  e  $SET^*$  que tiveram comportamentos diferentes para cada condições correspondente em função dos parâmetros ambientais e das atividades a serem realizadas. Os dados medidos pela estação microclimática para o ambiente exterior, comportou-se de forma dinâmica e com respostas diretas a cada ciclo de cálculo programado de 5 minutos, já para o ambiente simulado tiveram algumas alterações, como o modelo retrata uma capacidade de se “auto-recuperar”, por conta da oscilação do clima. Foram demonstrados alguns picos em relação a  $T_{sk}$  e  $T_{cr}$  por haver uma grande dissipação de calor ou podendo ser ligado diretamente a molhagem cutânea. O modelo teve um melhor comportamento para temperatura superior a  $10^{\circ}\text{C}$  com uma taxa metabólica até  $300\text{ W/m}^2$  e ótimo desempenho para o ambiente termoneutral, a correção do vestuário teve um melhor resultado para o ambiente frio. Sobre a sensação térmica e a preferência térmica dos três indivíduos em análise, na maioria dos votos com 67,70%, preferiam o ambiente mais quente e classificaram como  $\pm$  aceitável e 33,34% classificaram como inaceitável e preferiam o ambiente mais frio.

**Palavras-chave:** termorregulação, ambiente externo, modelo de dois nós, conforto térmico, modelo racional, ambiente transitório.



## ABSTRACT

Thermal comfort in the open air has been the focus of attention for some decades, this is because the demand for outdoor work has become too great, and the lack of indexes to make the assessment sufficiently conform to the transient environment, makes that the type of assessment for these conditions does not have enough parameters to physiologically analyze the professionals directly exposed to the outside climate. In this work we tried to analyze human thermoregulation through a rational dynamic mathematical model, capable of detecting the physiological responses of the human body and investigating the indices that are generated by the model's responses as a function of time in real conditions, which is capable of adapting the versatility of the environment. The model presented in this research originated through the Two Knot Model by Gagge (1972, 1986), where some implementations were made in the modeling for the correction of the insulation of the clothing and adaptations of the model for forced conventions in transitory external environment, the adaptations were carried out through mathematical equations using some standards aimed at thermal comfort such as ISO 7933 (1987), ASHRAE (1997), ISO 7730 (2007), ISO 9920 (2006) and ISO 7726 (1998). In practice, we could conceptually distinguish two separate systems in thermoregulation: the active system that basically depicts the physiological responses that the human body reproduces when exposed to different thermal conditions and the passive system that is reproduced by the heat transfer events that occur within the human body and the external environment, these are divided into two layers, being represented in the form of a cylinder, the shell that depicts the skin and the nucleus of the cylinder, the central blood system. The programming was carried out in Python language, as it demonstrates the advantage of being multiplatform. In this investigation, two ways of analyzing the environment are proposed, being simulated outdoor and indoor, in order to verify the model's behavior for different climatic conditions (cold, hot and thermoneutral), the indexes generated in the modeling correspond to Tsk, Tcr, ET \* and SET \* that had different behaviors for each corresponding condition depending on the environmental parameters and the activities to be carried out. The data measured by the microclimate station for the external environment behaved dynamically and with direct responses to each programmed calculation cycle of 5 minutes, however, for the simulated environment, there were some changes, as the model portrays an ability to “self- recover ”, due to the oscillation of the climate. Some peaks in relation to Tsk and Tcr have been demonstrated because there is a great heat dissipation or can be directly linked to skin wetness. The model had a better behavior for temperature above 10°C with a metabolic rate up to 300 W/m<sup>2</sup> and excellent performance for the thermoneutral environment, the correction of clothing had a better result for the cold environment. Regarding the thermal sensation and the thermal preference of the three individuals under analysis, in the majority of votes with 67.70%, they preferred the warmest environment and rated it as ± acceptable and 33.34% classified it as unacceptable and preferred the coldest environment.

**Keywords:** thermoregulation, external environment, two-node model, thermal comfort, rational model, transient environment.



## ÍNDICE

A - PARTE 1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA ....	1
1 INTRODUÇÃO GERAL .....	3
<b>1.1 Conforto Térmico Humano e a Relação com o Ambiente .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Enfatização da Relevância do Tema .....</b>	<b>5</b>
2 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	7
<b>2.1 Revisão Sistemática .....</b>	<b>7</b>
3 FUNDAMENTAÇÃO DA MODELAGEM RACIONAL .....	13
<b>3.1 Mecanismos da Vasoconstrição e Vasodilatação .....</b>	<b>13</b>
<b>3.2 Sistema Controlado (Passivo) .....</b>	<b>14</b>
3.2.1 Sistema de Tecidos .....	15
3.2.2 Respiração .....	15
3.2.3 Vestuário .....	16
<b>3.3 Sistema de controle (Ativo) .....</b>	<b>17</b>
3.3.1 Fluxo Sanguíneo da Pele .....	18
3.3.2 Sudorese e Tremores .....	19
<b>3.4 Modelos Racionais .....</b>	<b>20</b>
3.4.1 Evolução dos Modelos a Partir de Gagge e Stolwijk (1972; 1971) .....	20
3.4.2 Modelo de Wissler (1964, 1985) .....	22
3.4.3 Modelo de Fiala (1999, 2012) .....	26
3.4.4 Modelo de Tanabe (2002) .....	33
3.4.5 Modelo de Takada (2011) .....	35
<b>3.5 Conclusões .....</b>	<b>37</b>
B - PARTE 2. DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO .....	39
4 INTRODUÇÃO METODOLÓGICA .....	41
<b>4.1 Materiais .....</b>	<b>41</b>
4.1.1 Linguagem Python .....	41
4.1.2 Bibliotecas Data Science para Python .....	42
<b>4.2 IDE para Python .....</b>	<b>42</b>
5 MÉTODO .....	45
<b>5.1 Desenvolvimento do Modelo .....</b>	<b>45</b>

<b>5.2 Implementação e Adaptação do Modelo</b> .....	<b>48</b>
5.2.1 Modelo de 25 nós StolWijk (1971).....	48
5.2.2 Modelo de Dois Nós Gagge (1972, 1986) .....	49
5.2.3 Apropriação do Modelo .....	50
<b>5.3 Design do Modelo</b> .....	<b>52</b>
5.3.1 Troca de calor com o ambiente .....	52
5.3.2 Equilíbrio Térmico .....	54
5.3.3 Troca de Calor Entre a Pele e o Núcleo .....	55
5.3.4 Modelação do Isolamento do Vestuário.....	62
5.3.5 Correção do Isolamento do Vestuário.....	63
5.3.6 Cálculo da Temperatura Efetiva (ET*).....	67
5.3.7 Cálculo da Nova Temperatura Efetiva Padrão (SET*).....	69
<b>5.4 Resultados e Discussões</b> .....	<b>75</b>
5.4.1 Ambiente Quente .....	77
5.4.2 Ambiente Frio .....	80
5.4.3 Ambiente termoneutral por simulação em câmara climática.....	83
5.4.4 Simulação do Ambiente Termoneutral para um individuo Despido.....	86
<b>6 CONCLUSÕES LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS</b> .....	<b>93</b>
<b>6.1 Conclusões</b> .....	<b>93</b>
<b>6.2 Perspectivas Futuras</b> .....	<b>94</b>
6.2.1 Dificuldades .....	94
6.2.2 Principais Limitações do Modelo .....	95
6.2.3 Trabalhos Futuros .....	95
<b>7 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>97</b>
APÊNDICES A.....	1
APÊNDICES B .....	1
APÊNDICES C .....	1
ANEXO A.....	1
ANEXO B .....	1

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Representação da fisiologia humana e trocas térmicas (Becker, Potchter, & Yaakov, 2003).....	4
Figura 2.1 - Países de publicações dos principais artigos abordado e seus respectivos autores. .9	
Figura 2.2 - Fluxograma da revisão sistemática. Fonte Adaptada de PRISMA Statement. ....	10
Figura 3.1 – Diagrama simplificado do sistema termorregulador. Fonte adaptada (McIntyre, 1980).....	13
Figura 3.2 - Modelo neuronal para controle do fluxo sanguíneo da pele. Fonte adaptada (Kingma et al., 2012).....	14
Figura 3.3 – Composição da parte do corpo. Fonte adaptada (Potter et al., 2020).....	15
Figura 3.4 – Diferentes condições do vestuário em relação as circunstâncias ambientais e atividades do homem Fonte Adaptada, (Parsons, 2010). ....	17
Figura 3.5 - Convecção dos vasos sanguíneos atuando como transportador, e a percepção da troca de calor com o SNC. ....	18
Figura 3.6 - Modelos racionais pioneiros: influência dos modelos dinâmicos atuais (Gagge, 1972; J. A. J. Stolwijk, 1971).....	20
Figura 3.7 - Modelo geométrico de termorregulação por (Wissler, 1964).....	23
Figura 3.8- Vista esquemática do corpo humano para o modelo Fiala (Fiala, Kevin J. Lomas, 1999).....	27
Figura 3.9 - Vista esquemática do corpo humano para o modelo ativo de Fiala (Fiala, 2012)	31
Figura 5.1 - Representação esquemática do sistema controlado do modelo de dois nós. Fonte Adaptada (Gagge, 1972) .....	45
Figura 5.2 - Diagrama de fluxo do modelo de dois nós, para a simulação da termorregulação humana. ....	47
Figura 5.3 – Fluxograma de equações para adaptação da termorregulação humana, modelo de dois nós.....	51
Figura 5.4 – Código para determinação da Hcg e Tr.....	53
Figura 5.5 – Código para determinação do fator de eficiência térmica da roupa.....	54
Figura 5.6 – Código fluxo de calor respiratório .....	55
Figura 5.7 – Código Sistema termorregulatórios ativo. ....	58
Figura 5.8 – Código Determinação do fluxo sanguíneo para Tsk e Tcr.....	59
Figura 5.9 – Código Controle regulatório de sudação e evaporação.....	62
Figura 5.10 – Código atribuição do posicionamento para determinação do tipo de convecção para o vestuário. ....	66

Figura 5.11 – Código adaptação de Isolamento dinâmico para o vestuário.....	67
Figura 5.12 – Código determinação da temperatura efetiva ET* .....	69
Figura 5.13 – Código Determinação da Temperatura efetiva padrão SET* .....	71
Figura 5.14 Adaptação do modelo com os dados de entradas iniciais dos autores.....	77
Figura 5.15 Verificação do Modelo para ambientes quentes .....	78
Figura 5.16 Comparação do modelo em ambientes quente, com implementação da correção do vestuário .....	79
Figura 5.17 Comportamento do modelo para ambientes frio no sudeste do Brasil para atividade moderada leve .....	81
Figura 5.18 Comportamento do modelo para ambientes frio no sudeste do Brasil para atividade intensa .....	82
Figura 5.19 Comportamento do modelo para ambientes simulado termoneural para atividades leves .....	84
Figura 5.20 Comparação do modelo entre o ambiente simulado e um ambiente ao ar livre ...	85
Figura 5.21 Verificação do modelo para um indivíduo despido.....	86
Figura 9.1 Medição em câmara climática, laboratório do PROA .....	1



## ÍNDICE DE TABELAS E ANEXOS

Tabela 2.1 – Número de publicações por cada combinação de palavras-chave.....	7
Tabela 2.2 – Valores quantificáveis e particularidade de exclusão.....	8
Tabela 2.3 – Criação e adaptação dos modelos racionais de termorregulação do corpo humano. .....	12
Tabela 3.1 – Classificação de alguns modelos de conforto térmico e seus respectivos seguimentos.....	21
Tabela 8.1 – Essenciais características obtidas das publicações elegíveis.....	1
Tabela 9.1 – Valores estatísticos das variáveis em simulação para um ambiente termo .....	1
Tabela 10.1 – Dados de saída dos coeficientes de transferência de calor apresentado por (J. A. J. Stolwijk, 1971). .....	1
Tabela 10.2 Dados de saída do sistema termofisiológico do modelo de 25 nós para os homens. (J. A. J. Stolwijk, 1971).....	2
Tabela 10.3– Dados de saída da simulação por atividade do modelo de dois nós. Fonte Adaptada (Gagge, 1972).....	3
Tabela 10.4 – Índices de Transferências de calor durante o conforto térmico sedentário (Nishi & Gagge, 1977).....	4
Tabela 10.5 – Índices de Transferências de calor durante o conforto térmico sedentário (Nishi & Gagge, 1977).....	5
Tabela 10.6 Fatores fisiológicos associados ao ambiente padrão (Nishi & Gagge, 1977).....	6
Tabela 11.1 – Medição dos parâmetros climáticos no verão e inverno . Fonte Adaptada (Hirashima & Assis, 2017).....	1



## **GLOSSÁRIO/SIGLAS/ABREVIATURAS/...**

CFD Computational fluid Dynamics (Sistema de mecânica de fluidos computacional)

DTS Sensação térmica dinâmica

ET Temperatura efetiva

MET Taxa metabólica

PET Temperatura equivalente fisiológica

PMV Voto médio previsível

PPD Percentagem de pessoas insatisfeitas (%)

PRISMA Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

RA Umidade absoluta (%)

RH Umidade relativa (%)

SET Temperatura efetiva padrão

GR Radiação solar global ( $W/m^2$ )

ISO Organização internacional para padronização

SNC Sistema nervoso Central

Ta temperatura do ar ( $C^\circ$ )

Tc Conforto térmico

TL Carga térmica

Tr Temperatura radiante ( $C^\circ$ )

Ts Sensação térmica

Tsk Temperatura média da pele ( $C^\circ$ )

TSV Voto de sensação térmica

V velocidade do vento (m/s)

Va velocidade do ar



## **PARTE 1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA**

O homem sempre busca um melhor estado de adaptação aos critérios de conforto para cada circunstância, encontrando formas de refúgios para se proteger do tempo e do clima (Parsons, 2010). A previsão do conforto térmico é fundamental para a existência do ser humano e consequentemente sempre foi uma consideração de prioridade para alcançar o bem-estar (Robalo & Sousa, 2008).

Este capítulo visa analisar e estabelecer as condições necessárias para a avaliação e concepção de um ambiente térmico adequado às atividades e ocupação humanas, bem como estabelecer métodos e princípios nos modelos matemáticos aqui abordado.

Um ambiente termoneutral é um ambiente no qual a produção de calor metabólico é equilibrada pelos desperdícios de calor sensível (Duarte, 2019), pelas perdas de calor respiratório e pela perspiração insensível, sem que o organismo tenha necessidade de se ajustar contra ao calor ou contra o frio (Lau, Shi, & Ng, 2019).

Segundo (1973), um ambiente termoneutral passa a ser confortável quando os parâmetros fisiológicos que determinam a sensação de frio/calor se apresentam em valores ótimos. Estes parâmetros são, a temperatura cutânea média e o débito de sudorese. Em alguns estudos sobre termo neutralidade, um ambiente neutro, “é a condição da mente que expressa satisfação com a temperatura do corpo como um todo” (Lamberts, 2016). Analisando-se dentro de uma ótica física dos mecanismos de trocas de calor. Dessas definições, pode-se dizer que a termoneutralidade é uma condição necessária, mas não suficiente para uma pessoa esteja em conforto térmico (Blazeyczyk, K.; Tokura, 1997).

---



# 1 INTRODUÇÃO GERAL

## 1.1 Conforto Térmico Humano e a Relação com o Ambiente

Desde os princípios da adaptação do homem com o ambiente, o ser humano vem se transpondo para que o ambiente torna-se relevante à sobrevivência, e beneficie do desempenho das mais distintas ocupações essenciais ao seu cotidiano, e sempre busca um melhor estado de acomodação aos critérios de conforto para cada circunstâncias, encontrando refúgios para se proteger do tempo e do clima.

O conceito que se impõe, atualmente, à segurança de restituir as circunstâncias de conforto na percepção e no projeto de lugares residenciais, ocupacionais ou de entretenimento. Para a existência e a saúde humanas, é essencial proporcionar conforto térmico em ambiente interno (Katic, Zeiler, & Boxem, 2014).

As pessoas encontram diferentes condições térmicas diariamente no ambiente construído (Robalo & Sousa, 2008). A previsão do conforto térmico é fundamental para a existência humana, portanto, sempre há uma consideração, mesmo na ausência de pesquisa controlada e publicações de resultados (Parsons, 2010).

Outro fator a considerar é a Sensação térmica ( $T_s$ ) de um ser humano, sendo está relacionada principalmente ao equilíbrio térmico do seu corpo como um todo, esse balanço é influenciado pela atividade física e vestuário, bem como pelos parâmetros ambientais (ISO 7730, 2005). A ( $T_s$ ) é uma propriedade física do corpo, definida como “um sentimento consciente comumente classificado nas categorias muito frio, frio, levemente frio, neutro, levemente quente, quente e muito quente” determinada pela escala de 7 pontos apresentado no modelo de Fanger (1970). E também é a decorrência da “reação psicofísica” do corpo aos impulsos térmicos relacionados às condições internas do ambiente (Parsons, 2010). O ( $T_c$ ) depende da temperatura do corpo humano, que, por sua vez, é uma função dos efeitos dos fatores de conforto. Esses fatores de conforto são indicadores ambientais internos (temperatura média do ar, velocidade relativa do ar, umidade e temperatura média radiante) ao redor do corpo. Tudo isso ajuda a definir o conceito de conforto térmico humano, “aquela condição mental na qual é expressa satisfação com o ambiente térmico” (ISO 7730, 2005). Sendo variável de indivíduo a indivíduo.

Certamente, o conforto térmico ao ar livre vem sendo alvo de interesses e estudos publicados nas últimas décadas. A princípio, os investigadores buscam entender a sensação térmica em ambiente externo sob diferentes gamas de condições climatéricas (Cheng, Ng, Chan, & Givoni, 2011). Em um ambiente externo, o conforto térmico de um indivíduo varia com as condições ambientais dinâmicas. Entretanto, a maioria dos modelos de conforto térmico ao ar livre na literatura são para regimes estacionários. Conforme considerados nos estudos de (2017), os parâmetros ambientais levado em considerações foram:

- $T_a$  → temperatura do ar ( $^{\circ}C$ );

- RH → umidade relativa (%);
- GR → radiação global ( $\text{W}/\text{m}^2$ );
- Velocidade do vento ( $\text{m}/\text{s}$ ).

Durante a investigação, a partir do monitoramento da temperatura da pele registaram que a carga térmica, a temperatura média da pele e a respectiva taxa de variação constituíram os três parâmetros mais significativos que influenciam a efeito térmico. A carga térmica traduz o impacto do ambiente térmico na sensação térmica, enquanto a temperatura média da pele e sua taxa de variação são referências das extensões dinâmicas do ambiente no estado térmico do corpo. A capacidade de prever respostas térmicas humanas em diferentes condições ambientais foi o principal incentivo ao desenvolvimento de modelos termofisiológicos (Katic et al., 2014).

A transferência de calor, o equilíbrio térmico, a fisiologia térmica e a termorregulação integram os modelos em uma representação matemática do corpo humano junto com seus sistemas passivo e ativo de termorregulação. A simulação completa das respostas térmicas de uma pessoa pressupõe a resposta dinâmica do indivíduo a qualquer ambiente (Parsons, 2010).

A troca de calor com o meio ambiente, como se pode ver na Figura 1.1 As reações de termorregulação diferem de pessoa a pessoa, prevendo aproximadamente a reação do corpo humano e do conforto térmico. Com isso, os modelos de termorregulação humana são capazes de calcular as temperaturas externas da pele e a distribuição de temperaturas centrais do corpo (Mouratidis, 2009). A simulação matemática dinâmica do corpo humano e suas respostas ao ambiente são fornecidas por modelos racionais, onde, são envolvidos sistema passivo (controlado) e sistema ativo (controlador), responsáveis pelo mecanismo de troca de calor.

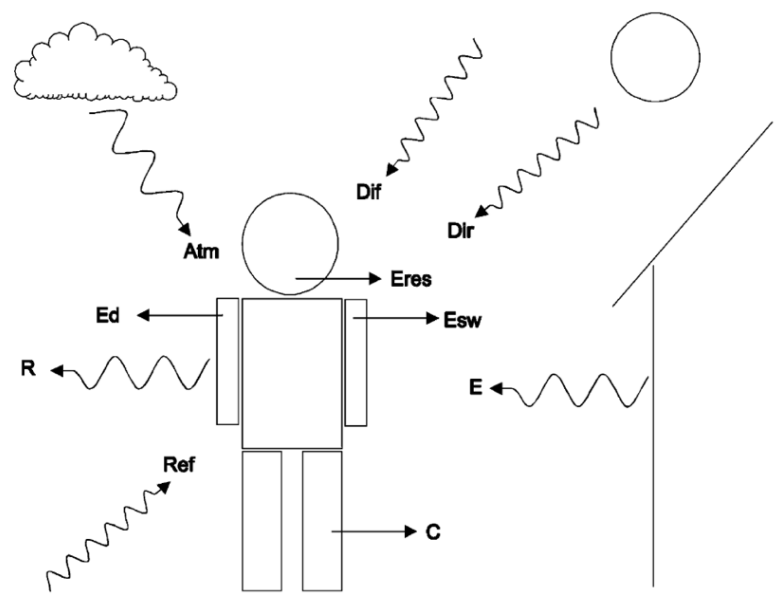


Figura 1.1 - Representação da fisiologia humana e trocas térmicas (Becker, Potchter, & Yaakov, 2003)



## 1.2 Enfatização da Relevância do Tema

Um ambiente ao ar livre pode ser caracterizado em diversos aspectos, sendo ele em parques urbanos, campos, áreas verdes, praças, sendo ligado diretamente a natureza (Faustini, 2017). O bem-estar em um espaço ao ar livre confortável pode ser influenciado pelo o tipo e a quantidade de atividade física que um indivíduo pode realizar, a interpretação da sensação térmica geralmente é motivada pelas estações do ano, a necessidade de criar espaços confortáveis para atender à demanda dos usuários recreativos ao ar livre e dos trabalhadores expostos (Vanos, Warland, Kenny, & Gillespie, 2010).

Com isso, o conforto térmico em ambiente aberto vem sendo alvo de atenção nas últimas décadas, visto que não há índice de avaliação suficiente para análise do ambiente transiente exterior, pois os modelos matemáticos apresentados em alguns estudos não se aplicam a ambientes ao ar livre, ocorrendo uma imperfeição da informação analisada. Na sua maioria, as pesquisas realizadas sobre a temática de conforto térmico humano, foram desenvolvidas em grandes escala visando o conforto térmico em ambiente interior, onde os indivíduos controlam os parâmetros ambientais (Givoni et al., 2003), são proporcionadas a incidência de radiação solar direta, com uma baixa velocidade do ar e umidade ótima controlada.

A variação do clima em diferentes espaços sob uma gama de condições climatéricas variáveis, dificultam algumas abordagens transversais na análise do conforto em ambiente exterior, com as constantes mudanças das condições climáticas, essa abordagem fornece diferentes critérios causados por parâmetros fisiológicos de pessoa a pessoa, como: idade, gênero e personalidade, aumento da velocidade do vento na sensação térmica (Cheng et al., 2011). A influência da radiação solar na fisiologia do indivíduo que interfere fisicamente com ondas eletromagnéticas com comprimentos oscilatórios de 0,1 a 0,4 $\mu$ m, apresentada em três faixas: ultravioleta (< 0,4 $\mu$ m), luz visível (0,4 a 0,76 $\mu$ m) e infravermelho (> 0,76 $\mu$ m), sendo o Homem exposto a radiação direta e radiação difusa. (Blazeczyk, K.; Tokura, 1997).

Por causa do aumento das preocupações pertinentes com as alterações climatéricas e implicações na saúde humana, especialmente em analogia com as atividades das pessoas, a relação entre o desempenho humano e o ambiente térmico ao ar livre e as afinidades entre os espaços na diversidade e níveis particulares de conforto térmico, embora esse cenário estar bem apoiado e determinado na modernidade atual, a complicação temporal dos indicadores entrelaçados no ambiente externo, que ocasiona os escassos layouts, procurando perceber a consequência das classes de conforto nos indivíduos (Cavalcanti, 2017), proporcionando diversos benefícios, sendo eles econômicos, sociais e culturais, tornando essas pessoas expostas mais confortáveis auxiliando na melhoria da qualidade urbana (Bröde, Krüger, Rossi, & Fiala, 2012). O modelo apresentado na dissertação ajudará a analisar e avaliar o conforto em ambiente externo, proporcionando um resultado dos índices térmicos e apresentado uma temperatura final do núcleo e da pele que satisfaça a avaliação para os indivíduos em ambientes termoneutral, frio e quente.



## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO

Nesse tópico serão abordados os estudos que suportam o assunto da atual dissertação. Alarga-se os aspectos das metodologias de recolha de informação da literatura, por consequência uma apresentação contemporânea sobre conforto térmico em ambiente exterior, **modelos racionais, indicado para avaliar a sensação térmica em regime transitório e estacionário a partir da modelagem matemática dinâmica.**

### 2.1 Revisão Sistemática

A revisão sistemática foi feita nas bases de dados, SCOPUS e WOS (Web of Science), com o intuito de selecionar um conjunto de referências científicas para a dissertação através da metodologia PRISMA<sup>1</sup>, que é um instrumento para auxiliar a melhor nitidez possível dos periódicos publicados. O rastreamento dos artigos utilizados foram feitas durante 3 meses, e organizado em forma de planilha eletrônica, a qual quantificava e organizava de forma clara e objetiva os estudos selecionados e excluídos, os critérios de seleção para desenvolvimento dessa dissertação, teve como os indicadores de inclusão os seguintes parâmetros; artigos revisados, seleção de apenas artigos científicos, adequação sobre o tema da dissertação, artigos em inglês, ótimos procedimentos metodológicos, equações em função do tempo, aplicação da temática conforto térmico em ambiente ao ar livre, ambiente transitório, modelos matemáticos racionais e sistema de termorregulação controlado e controlador, o critério de tempo (ano de publicação dos artigos), não foi abordado nesse estudo com juízo crítico de exclusão, pois trata-se de artigos com modelos originais que datam da década de 60, 70 e 80.

A combinação das palavras-chaves prosseguiu com a investigação no tema que regênci esse estudo, portanto definiu-se que as agregações dessas palavras seriam: “*thermal comfort*”, “*rational model*”, “*transient conditions*”, “*overall thermal sensation*”, “*transient model*”, “*skin temperature*”, “*human thermal*”, “*thermoregulatory*” e “*mathematical model*”. O operador logico “AND”, auxiliou como intermédio para alcançar um melhor resultado de associações de palavras, sendo assim, exibidas na Tabela 2.1, obtendo 306 palavras pelo conjunto das associações.

Tabela 2.1 – Número de publicações por cada combinação de palavras-chave

Número de arranjos	Palavras-chaves	Número de promulgações encontradas
1	"transient conditions "AND "thermal comfort"	144

<sup>1</sup> <http://www.prisma-statement.org/> (acedido em 28/08/2014)

Número de arranjos	Palavras-chaves	Número de promulgações encontradas
2	"overall thermal sensation" AND "comfort thermal" AND "transient model"	6
3	"thermal sensation" AND "skin temperature" AND "rational"	9
4	"Two-node" AND "human thermal" AND "comfort thermal "	12
5	"comfort model" AND "thermal sensation" AND "skin temperature"	46
6	"thermal comfort" AND "thermoregulatory" AND "human thermal"	48
7	"temperature regulation" AND " "mathematical model"	41

Em seguida, com as particularidades de exclusão, atingiu-se a 336 artigos, sendo que 27 artigos promoveram dos artigos originais e de rastreio das fontes citada nos mesmos, deixando na totalidade 35 artigos elegíveis para avaliação e leitura, sendo eletivo definitivamente para a criação da contextualização bibliográfica 20 artigos na vertente qualitativa. Demonstrado pelo fluxograma na Figura 2.2. A Tabela 2.2 demonstra resumidamente o critério de exclusão utilizado no estudo, o indicar da fase de seleção 3 da tabela relaciona os artigos que não apresentam equações em função do tempo.

Tabela 2.2 – Valores quantificáveis e particularidade de exclusão

Fase de Seleção	Particularidade do método de exclusão	Número de publicações encontradas
1	Registos excluídos por critério de triagem	286
2	Artigos excluído por duplicidade	35
3	Registos excluídos por outros motivos	15

Os critérios de elegibilidade dos artigos que garantem a conformidade na definição das metodologias e resultados aplicados, diferem dos critérios de exclusão, exigindo uma leitura atenciosa dos periódicos selecionado nessa fase. Sobre essa questão, os critérios empregues.

Portanto, prevalece que a seleção será a mesma determinada para os critérios de exclusão, com tudo que, um dos elementos abordados na revisão sistemática encontra-se em estado simplificado, esse necessita ser rejeitado e revisado, para uma posterior observação, não sendo eliminado definitivamente.

Foi feita uma descrição inicial dos 20 artigos elegíveis, de forma resumida, explorando os critérios mais importante para a construção dessa dissertação, assim demonstrado na Tabela 6.1 do Apêndice B. Os conceitos fundamentais de conforto térmico, a importância dos modelos aplicados em cada estudo, as particularidades de cada seguimento em questão, sendo ele em estado transitório ou estacionário, a Figura 2.1 demonstra os principais países de publicação dos artigos elegíveis e seus principais autores dentro da literatura científica técnica abordada nesse estudo, os principais estudos sobre a vertente da modelagem da termorregulação do homem em função do conforto térmico tem origem internacional, principalmente os trabalhos de autores asiáticos e americanos, que por sua parte fundamentou o estudo aqui aplicado, os artigos chaves citados em trabalhos ou conferências tem origens do artigos originais dos respectivos autores com por exemplo (Fiala, Kevin J. Lomas, 1999; Gagge, 1972; J. A. J. Stolwijk, 1971; Tanabe & Kobayashi, 2002).

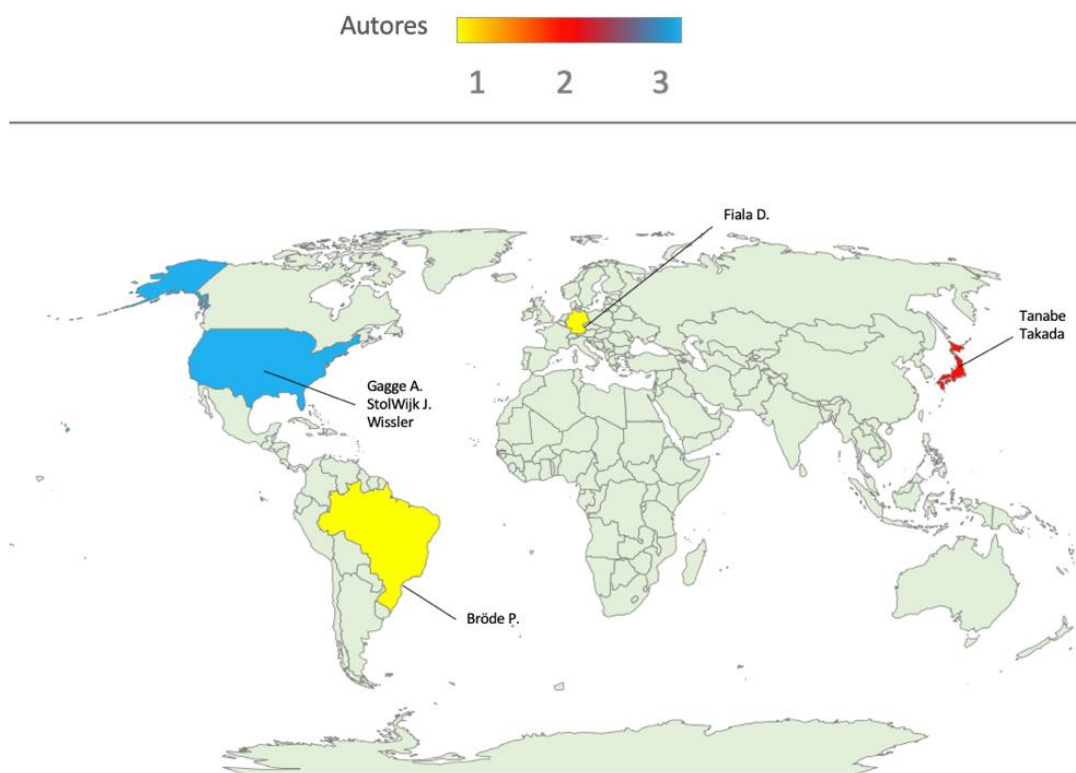


Figura 2.1 - Países de publicações dos principais artigos abordado e seus respectivos autores.

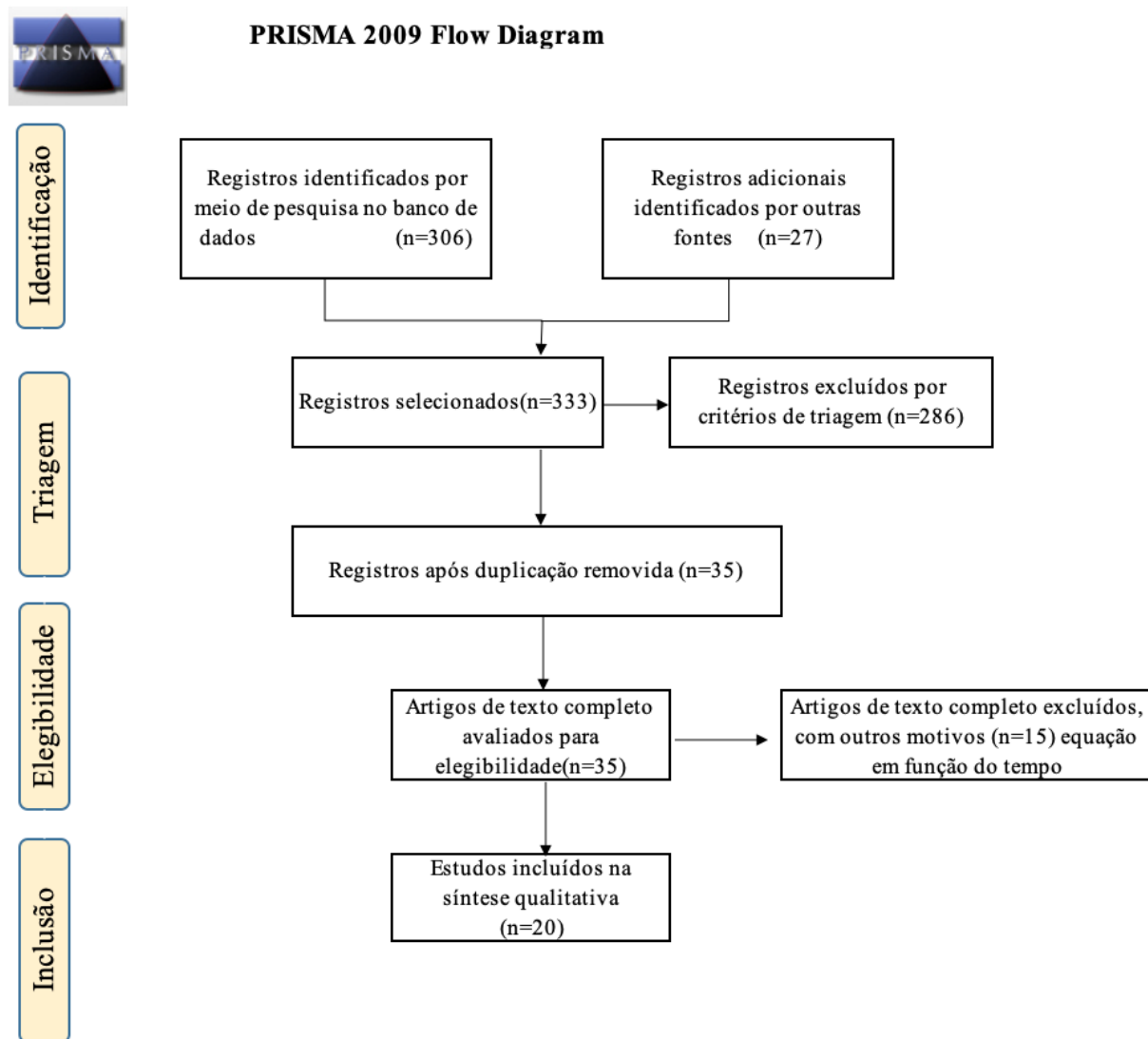


Figura 2.2 - Fluxograma da revisão sistemática. Fonte Adaptada de PRISMA Statement<sup>2</sup>.

A grande versatilidade dos modelos racionais aplicados nos estudos da termorregulação humana, traz alguns parâmetros fisiológicos ou ambientais distintos dentro da literatura abordada nessa dissertação, se notou que os modelos, em sua grande maioria, se reporta a modelos pesados e complexos, como o modelo de Wissler (1964), o autor desenvolveu uma modelagem fantástica, porém poucos estudos e reprodutibilidades de seus estudos devido a sua complexidade de aplicação em campo, com previsão rápida das respostas da temperatura do corpo humano, adaptável a diversos ambientes, com boa leitura a ambientes frios com submersão em águas geladas, o autor não levou em consideração os cálculos para o vestuário e suas respectivas correções. Outro modelo extremamente importante no âmbito do conforto térmico são os modelos de Fiala (2012; 2001), aplicável em ambientes transitórios e estacionários, o modelo é abrangente

<sup>2</sup> <http://www.prisma-statement.org/> (acedido em 28/08/2014)

do corpo inteiro, porém possui algumas restrições por ter sido elaborado por regressão linear, detém ótimas respostas que são previsíveis para a temperatura da pele sob condições de estresse frio, moderado e quente, e é adaptado a todos os tipos de ambiente.

A criação ou adaptação de novos modelos não é uma tarefa fácil, pois a cada projeção criada com dados médios que implementam ou alimentam os modelos, como por exemplo (a média da temperatura do ar, a média da temperatura do vento, a média da umidade relativa do ar e etc ...) a maioria dos pesquisadores limitam seus estudos geralmente em uma hora de exposição, com isso, não a dados suficientes que representem as variações do ambiente exterior como na realidade. Não faz sentido utilizar um modelo de análise da termorregulação com previsões minuciosas, com cálculos de elementos infinitos, que necessitam de uma interpretação das equações de equilíbrios, isso só demanda de mais erros na modelagem, sendo desnecessário a utilização de modelos complexos racionais.

A Tabela 2.3, demonstra os autores responsáveis pela criação e adaptação do modelo abordado nessa dissertação, sendo influenciador de forma indireta para alguns dos passos na modelação abordada, foi feita uma comparação do modelo de StolWijk (1971), com os respectivos modelos abordado na tabela, trazendo formas de mensurar os parâmetros e as características de modelação abordado pelos autores, com isso, procurou-se implementar na modelagem a facilidade com os dados de entradas em tempo real, levando em consideração as restrições dos estudos anteriores apresentado nas modelações, adaptação interativa com o tempo, ou seja, suporta entradas de 5s, 10s, 5 min, 10 min ou mais de 1h de análise, além de trazer o cálculo da correção do vestuário, que difere do modelo original de Gagge (1972, 1986), com facilidade de adequação a indivíduos individuais.

Modelos	Atributos	Camada/Nó	comparação	Restrições	Limitações	Vantagens	Aplicabilidade
(Gagge, 1972, 1986)	Corpo inteiro, segmento único, duas camadas. Fácil de implementar. Tempo de cálculo curto	2	StolWijk	Somente condições uniformes. Nível moderado atividade. Tempo de exposição de (<1 hora).	Tempo de exposição de (<1 hora) Não aplica uniformidades espaciais. Não a sensação de pele nua ou vestida.	Boas estimativas da Tsk. Modelo simples e direto. Apresenta os índices de SET* e ET*	Transitórios. Atividades Moderadas.
(Fiala, 1998; Fiala et al., 2001; Fiala, Lomas, & Stohrer, 2003)	Temperaturas ambientais: 5°C e 50°C. Intensidade de atividade 0,8 a 10 Met. Média de desvio para a Tcr de 0,2°C rms.	187	StolWijk	Baseado em regressão Linear.	Menor previsibilidade das temperaturas da pele durante o exercício em ambientes frios. O modelo é apresentado em software comercial.	Diversas faixas de aplicabilidade. Previsões precisas para a Tsk em condições de estresse frio, moderado e quente. Previsão da Tcr no ambiente frio.	Estado estacionário e transitório. Não uniforme interno e exterior.
(Fiala, 2012)	Corpo inteiro, 12 segmentos	187	StolWijk	Baseado em regressão Linear.	Demorado quando em tempo real, é necessário a execução do modelo fisiológico.	Ampla faixa de aplicabilidade. Previsão dos efeitos térmicos corporais (hipertermia e hipotermia)	Aplicações em ambientes externos. Adapta-se em todo o tipo de climas.
(Tanabe & Kobayashi, 2002)	Temperaturas locais da pele e do núcleo. 16 segmentos, modelado para radiação e CFD. Podem ser alteradas as características físicas.	65	StolWijk	Com base nas temperaturas do ponto de ajuste de cada segmento.	Extremamente sensível ao ponto de ajuste da temperatura da pele em cada segmento	Ampla faixa de aplicabilidade	Validado para estado transitório e transitórios não uniformes.
(Wissler, 1964)	Corpo inteiro, múltiplos segmentos. Particularidades específicas de entradas dos parâmetros fisiológicos.	5300	StolWijk	Variações mensuráveis, com medição da amplitude para condições de temperatura transitórias. A versão do autor não foi extensivamente reproduzida ou testada por outros pesquisadores em campo devido sua complexidade.	Diversas equações necessárias para representar a variação de temperatura no espaço e o fluxo térmico nos limites. Não considera o vestuário.	Previsão precisa da resposta do corpo humano às mudanças de temperatura. Imersão de água gelada em prática de mergulho.	Estacionário e Transitório. Ambientes Frios e quentes. Ambiente hiperbárico de 1 atm.
(Takada, Sakiyama, & Matsushita, 2011)	Corpo inteiro, segmento único, duas camadas. Fácil de implementar. Tempo de cálculo curto	2	Gagge	Condições transitórias	Prever em estado estacionário ou variável termofisiológicas diferentes da Tsk.	Modelo simples e direto. Atribui o cálculo de erros para determinação do sinal da pele e núcleo.	Ambiente estacionário uniformes
(J. A. J. Stolwijk, 1971)	Temperatura locais da pele, 6 segmentos	25	-	Não se aplica o cálculo do vestuário.	Faixa limitada de aplicabilidade. Previsão menos precisas da Tcr em ambiente frio. Baseados em dados limitados.	Previsão exatas da temperatura local da pele. Fornecimento instantâneo para todos os segmentos do corpo.	Ambientes estacionários e transitórios uniformes.

Tabela 2.3 – Criação e adaptação dos modelos racionais de termorregulação do corpo humano.



### 3 FUNDAMENTAÇÃO DA MODELAGEM RACIONAL

#### 3.1 Mecanismos da Vasoconstrição e Vasodilatação

A temperatura interna do homem necessita ser constante e manter o seu sistema regulador central próximo a 37°C, qualquer alteração na temperatura interna pode alterar algumas funções metabólicas e enzimáticas (Isawa & Shukuya, 2016). Alguns impulsos mais aferentes subministram receptores anatomicamente distintos ao frio e ao calor, podendo ser periféricos ou centrais (Braz, 2019). Se a pele entrar em contato com superfícies de temperatura moderada, nenhum dano à pele ocorrerá devido a troca de calor, mas pode ocorrer vasodilatação e vasoconstrição, levando a sensações que variam de (quente a neutra a fria e desconforto). A condição da pele será amplamente ditada pela resposta de todo o corpo às condições térmicas. Sob condições frias, haverá vasoconstrição e a pele pode estar seca e a uma temperatura inferior a 30 °C. Sob condições "normais" e moderadas, a pele apresentará alguma vasodilatação, geralmente estará seca e terá uma temperatura em torno de 33 °C. Em condições quentes, os vasos sanguíneos serão dilatados e a pele úmida e a uma temperatura em torno de 36 °C. (Parsons, 2010). A Figura 3.1 abaixo demonstra o sistema termorregulador de forma simplificada, o deslocamento da temperatura do cérebro acima do ponto definido resulta em vasodilatação e sudorese e uma redução na temperatura da pele produz vasoconstrição e tremores. Existem conexões inibitórias cruzadas entre os sistemas quente e frio (McIntyre, 1980).

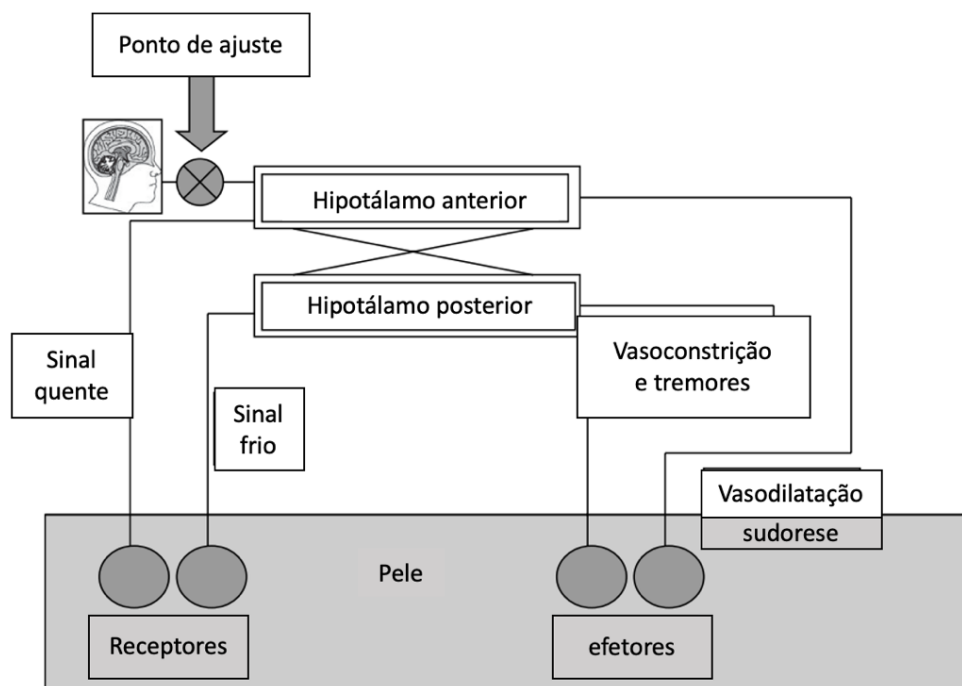


Figura 3.1 – Diagrama simplificado do sistema termorregulador. Fonte adaptada (McIntyre, 1980)

O fluxo sanguíneo da pele é de grande importância na termorregulação humana. Os modelos clássicos de termorregulação requerem um ponto de ajuste explícito para controlar a temperatura. Normalmente, esse ponto de ajuste é definido na unidade da variável controlada (ou seja, Celsius). No entanto, o corpo humano não sente a temperatura diretamente, ao invés disso, as informações de temperatura são codificadas nas taxas de disparo dos neurônios. No estudo apresentado por Kingma (2012), o autor explora a termorregulação da neurofisiologia para desenvolver um modelo matemático do fluxo sanguíneo da pele que não requer um ponto definido e apresentado na Figura 3.2 abaixo.

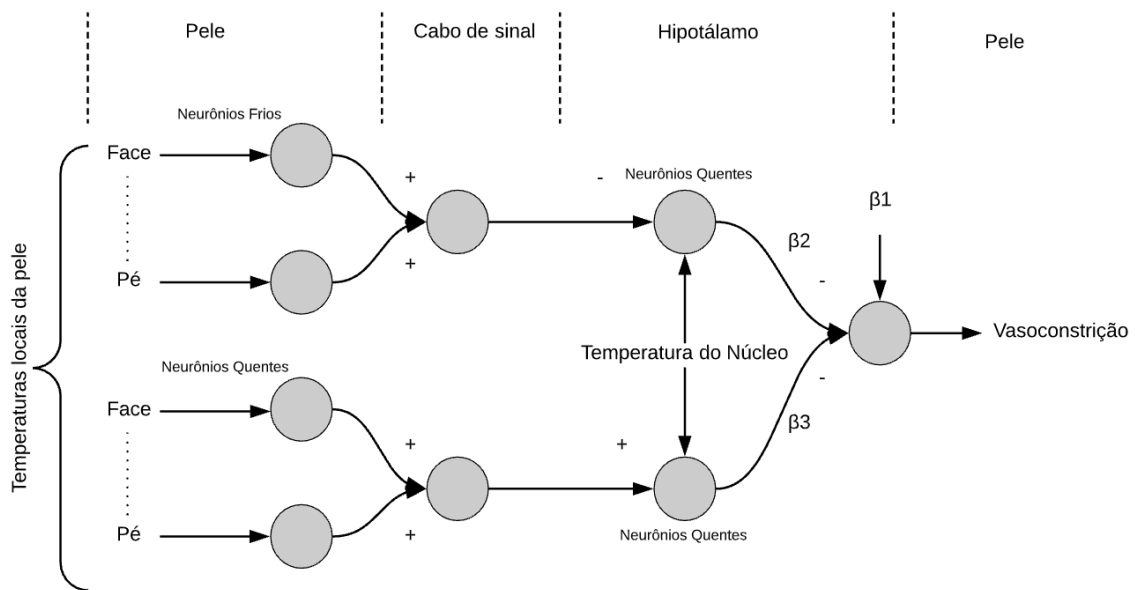


Figura 3.2 - Modelo neuronal para controle do fluxo sanguíneo da pele. Fonte adaptada (Kingma et al., 2012)

### 3.2 Sistema Controlado (Passivo)

O sistema passivo (ou controlado) é reproduzido pelos eventos de transferência de calor que incidem dentro do corpo humano e o ambiente externo. A transferência de calor no núcleo acontece por condução com a pele e dois fenômenos de convecção (um com a pele necessitando à convecção dos vasos sanguíneos, fazendo com que o sangue atua como transportador) e outro com o ambiente externo devido à respiração). No núcleo, o calor é gerado pelo metabolismo e trabalho muscular (Palella, 2017). O modelo de multicamadas consiste em camadas anulares de tecido concêntrico e usa sete materiais diferentes de tecido: cérebro, pulmão, osso, músculo, vísceras, gordura e pele. Cada um deles é subdividido em um ou mais nós de tecido (Fiala, Kevin J. Lomas, 1999), com isso, o calor é transportado pelo tecido para a superfície do corpo, isolada da roupa por condução (Fiala, 1998). Para simular os fenômenos de transferência de calor, os principais parâmetros são as propriedades térmicas do sangue, músculo, gordura e ossos (Katic et al., 2014).

### 3.2.1 Sistema de Tecidos

Modelar as partes do corpo imitando a verdadeira anatomia do ser humano é uma das características dos autores, que tem como as camadas de músculo, a gordura e a pele como o conceito de representatividade da termorregulação do corpo, distribuindo-se através dos nós apresentados, esses nós, costuma interligar as camadas representativas dos modelos que simulam os tecidos. Todavia, o sistema passivo do corpo humano depende da capacidade de transferência de calor do tecido, que representa o corpo humano segmentado em elementos, e inclui as características físicas do tecido humano por transferência de calor e massa que ocorre dentro e entre os elementos do corpo representado na Figura 3.3, bem como entre a superfície do corpo e o ambiente. Atualmente, os modelos permitem o ajuste do nível de condicionamento físico, dias de aclimatação, tamanho corporal e porcentagem de gordura corporal de uma pessoa simulada (Lundgren-Kownacki et al., 2017)

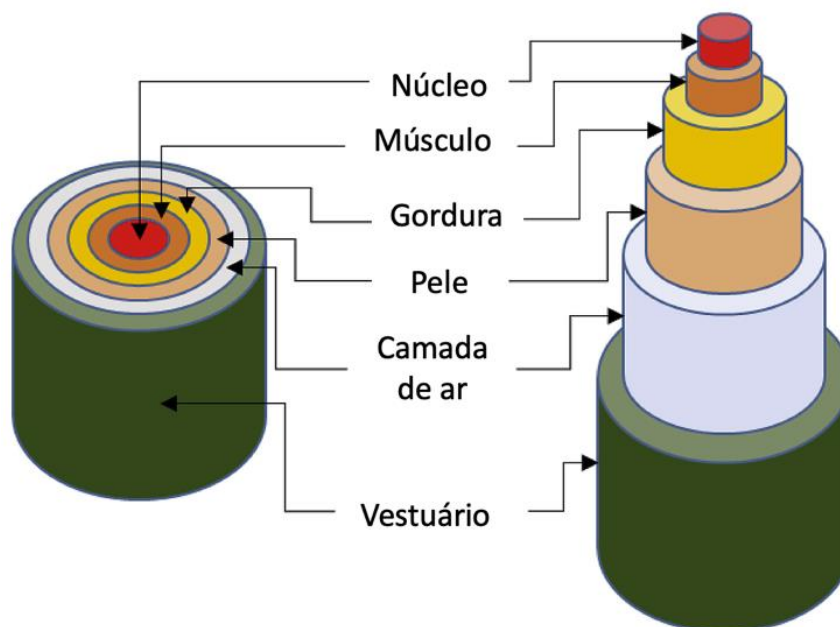


Figura 3.3 – Composição da parte do corpo. Fonte adaptada (Potter et al., 2020)

### 3.2.2 Respiração

A troca de calor entre o corpo humano e o meio ambiente mudará com a pressão atmosférica (Nishi & Gagge, 1977). A perda de calor por respiração (Cres), ocorre por transferência de calor por convecção ‘seca’ devido ao ar frio sendo inalado, aquecido até a temperatura central nos pulmões e calor transferido no ar expirado para o ambiente. Além disso, o ar inalado é umedecido (até a saturação) pelos pulmões. Quando exalado, portanto, ocorre uma transferência de massa (calor) do núcleo do corpo para o ambiente externo (Eres). Na ASHRAE (1997) e Parsons (2010), apresenta as seguintes equações para a respiração:

$$Cres + Eres = [(0.0014 M(34 - Ta) + 0.0173 M(5.87 - Pa))] \quad (1)$$

Onde

- M é a taxa metabólica de geração de calor em W/m<sup>2</sup>, Ta é a temperatura do ar ambiente, em °C;
- Pa é a pressão de vapor na temperatura do ar ambiente, em Pa. (As perdas de calor são introduzidas direta e uniformemente na camada de tecido pulmonar localizada na seção torácica).

### 3.2.3 Vestuário

A exposição dos indivíduos em diferentes condições climáticas, trazem respostas diretamente proporcional para a pele, as características relevantes do vestuário para o transporte de calor são os isolamentos, a resistência ao vapor de água e absorção de umidade. O principal efeito isolante da roupa é baseado nas camadas de ar parado entre a pele e as diferentes camadas da roupa, o que reduz as perdas de condução para o meio ambiente. A roupa resiste às perdas convectivas, impedindo a formação de correntes de convecção próximas ao corpo e fornecendo uma barreira contra as correntes de ar no ambiente. A roupa também reduz a perda de calor radiante, servindo como barreira contra radiação térmica e a perda de calor por evaporação, restringindo a evaporação do suor produzido pelo corpo. O efeito de isolamento de uma peça de vestuário individual depende das propriedades do material, da folga ou do aperto do ajuste, da área de superfície do corpo coberta pela peça e da área de superfície aumentada para perda de calor (Holopainen, 2012).

O nível de isolamento do vestuário sofre variação de vestimenta a vestimenta, pois são denominados a parti das variações ambientais, sendo menor que 0.5 clo para ambientes com temperaturas ideais á (23 °C), e superior para as condições elevadas, isso pode identificar o grau de conforto térmico (Cavalcanti, 2017). Alguns procedimentos e padronização para diferentes vestimentas e atividades desempenhadas para garantir o conforto térmico e o bem-estar do ser humano são dimensionados na (ISO 9920, 2006).

Os métodos de contabilização dos efeitos da ventilação da roupa variaram de orientações gerais, como para pessoas ativas, o isolamento de roupas pode ser reduzido em 50% no frio (ISO 11079 Standard, 2007), a equações empíricas e métodos de medição. Alguns dos fatores que não foram incluídos nos modelos podem ter efeitos significativos nas propriedades térmicas da roupa. Clark (1973), observou que a isolação é fornecida pelos próprios tecidos e pelas camadas de ar retidas entre a pele, a roupa e as camadas da roupa. Sendo possível observar as relações do vestuário com as condições do ambiente e a influência da atividade do indivíduo na Figura 3.4.

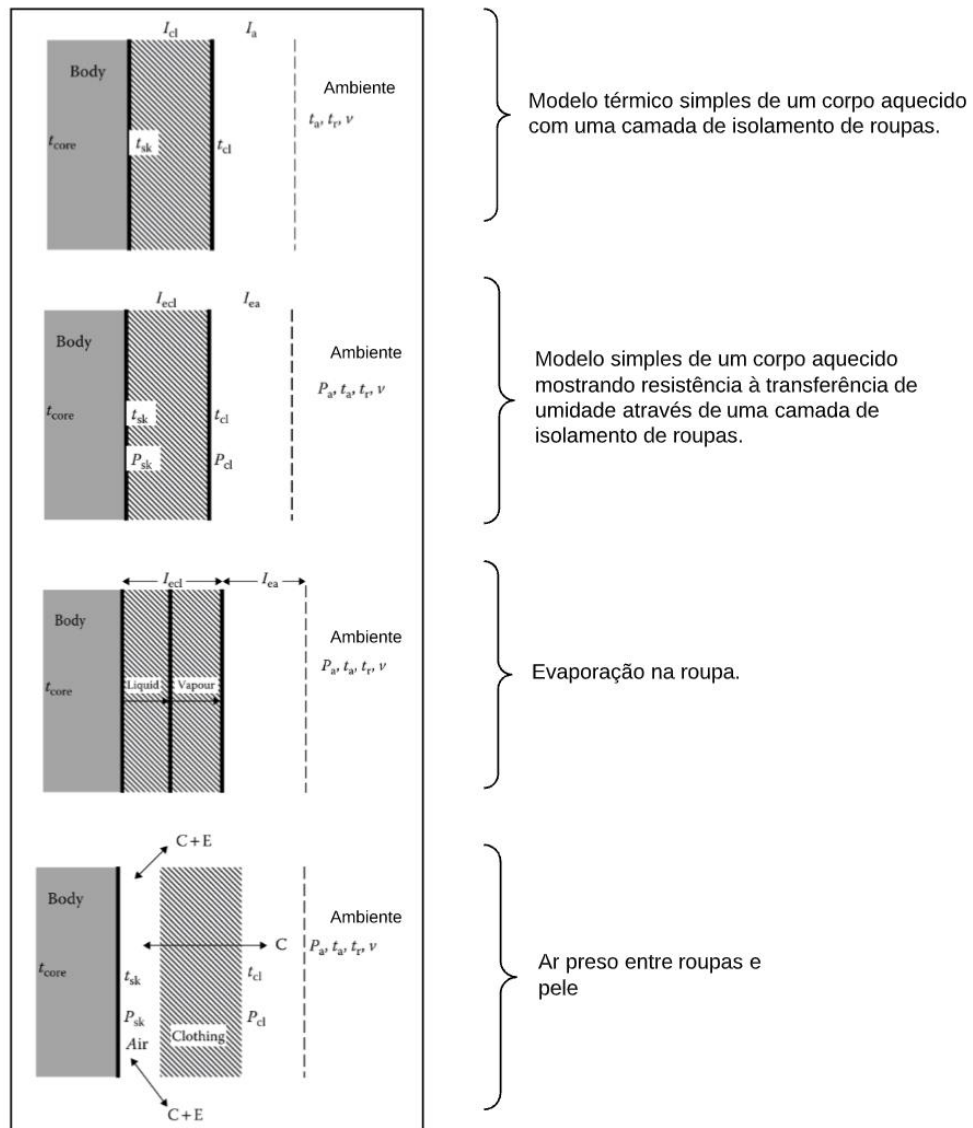


Figura 3.4 – Diferentes condições do vestuário em relação as circunstâncias ambientais e atividades do homem  
 Fonte Adaptada, (Parsons, 2010).

### 3.3 Sistema de controle (Ativo)

O sistema ativo (ou controlador) controla o sistema passivo para proporcionar a temperatura do corpo humano em ambientes sólidos e transitórios (Katic et al., 2014). Em geral, o sistema ativo pode ser visto como o sistema nervoso central atuando com um feedback negativo de acordo com o estado térmico físico, com recursos limitados, mantendo a homeotermia, do sistema controlado (Guedes, 2016), representado na Figura 3.5. O sistema ativo considera as respostas regulatórias do corpo humano de vasodilatação, vasoconstricção, sudorese e tremores, assim apresentado no modelo de Gagge (1986), aonde o autor buscou representar a dilatação e a vasoconstricção no modelo. O modelo de Katavoutas (2014), descreve algumas equações que representa o calor

gerado pelo corpo e a troca com o ambiente, além de representar o fluxo sanguíneo com a pele, a molhagem da pele, e a perda de calor evaporativo, tendo como objetivo fornecer a termorregulação, mantendo a temperatura constante do núcleo do corpo. Por esse fim, o principal sinal de feedback vem da temperatura da pele, da variação da temperatura hipotalâmica e da perda de calor por evaporação basal da pele (Jendritzky & de Dear, 2009), que também foi abordado no modelo de StolWijk (1971), onde o autor representou o sistema ativo, dimensionando em três partes distintas capazes de reconhecer o sistema passivo enviando respostas apropriadas aos fatores para a sistema nervoso central (SNC).

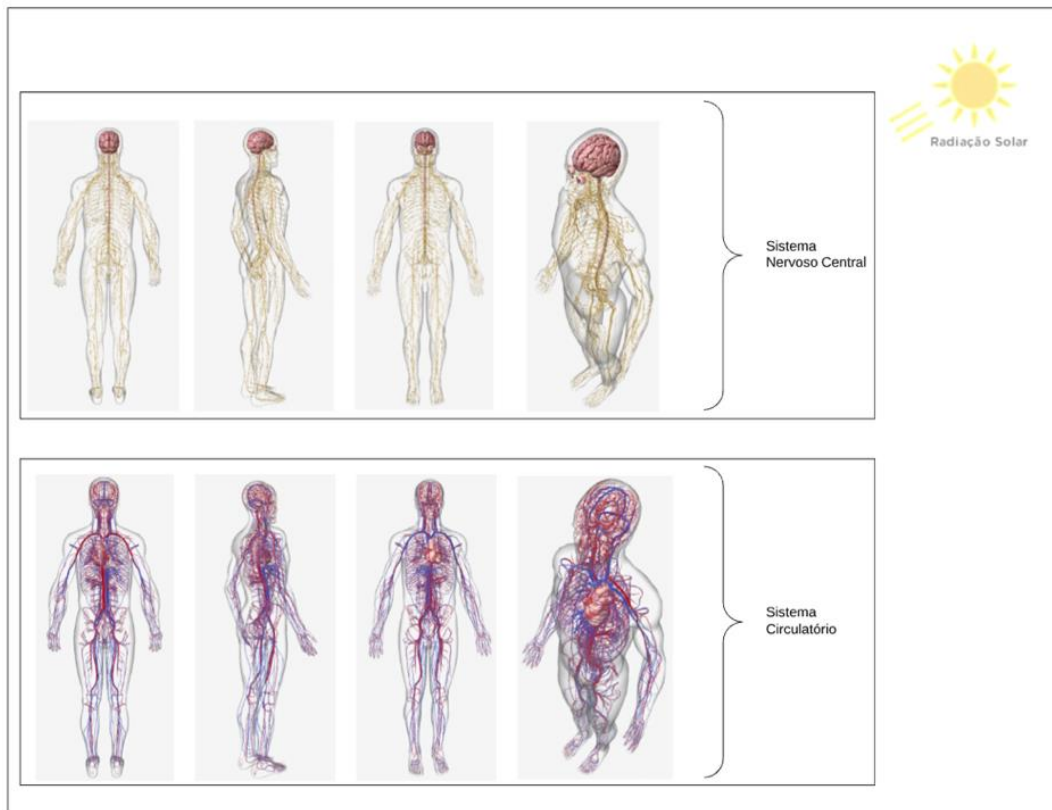


Figura 3.5 - Convecção dos vasos sanguíneos atuando como transportador, e a percepção da troca de calor com o SNC.

### 3.3.1 Fluxo Sanguíneo da Pele

O funcionamento do corpo humano encontra-se a desempenhar atividades que podem ser divididas em 2 partes: atividades internas e atividades externas, sendo, o funcionamento interno dos órgãos e as realizadas através de seu trabalho e tarefas desempenhadas. Para desempenhar qualquer das duas atividades, nosso organismo depende de calor, sendo gerado pelo metabolismo dos alimentos ingeridos (Lamberts, 2016). A perda sensível de calor, por convecção e radiação, a perda latente de calor, por evaporação do suor e por dissipação da umidade de pele.

A fisiologia térmica do corpo humano funciona como um sistema termodinâmico que se termorregula mantendo a temperatura interna corporal próxima dos 37° C e a temperatura da pele (superficial), normalmente entre 33 °C à 34 °C, tendo uma variação de  $\pm 2$  °C do valor da temperatura central (Watanabe, Nagano, Ishii, & Horikoshi, 2014). O fluxo sanguíneo da pele é controlado pelos mecanismos de vasodilatação e vasoconstrição que resultam em um fluxo sanguíneo maior ou menor da pele, respectivamente. As correlações dependem da temperatura média da pele e da temperatura central. Segundo Vinet (2010), existe um estado de termoneutralidade quando o núcleo e as temperaturas médias da pele são 36,8 °C e 33,7 °C, respectivamente. À medida que a temperatura central sobe acima de seu valor neutro, ocorre vasodilatação e o débito cardíaco aumenta dramaticamente. Quase 100% desse aumento vai para o tecido da pele. Um estado de vasodilatação máxima é alcançado quando a temperatura central atinge 37,2 °C. Nesse estado, a taxa total de fluxo sanguíneo da pele pode ser até sete vezes seu valor basal. Entre as temperaturas centrais de 36,8 °C e 37,2 °C, o fluxo sanguíneo da pele segue a temperatura central linearmente. Como a temperatura média da pele cai abaixo de seu valor neutro 33,7 °C, ocorre vasoconstrição. O fluxo sanguíneo da pele e o débito cardíaco diminuem de acordo. Em um estado de vasoconstrição máxima, quando a temperatura média da pele cai para 10,7 °C, a taxa total de fluxo sanguíneo da pele pode ser tão baixa quanto um oitavo do seu valor basal (Vinet & Zhedanov, 2010). O fluxo sanguíneo da perfusão cutânea é avaliado a partir das equações de controle térmico que determinam a interação térmica entre a pele e o núcleo (Holopainen, 2012).

### 3.3.2 Sudorese e Tremores

Se a resposta da vasodilatação não for suficiente para impedir que a temperatura central suba ainda mais, a temperatura central atingirá um nível, aqui referido como o limiar da transpiração, onde a transpiração começa. Além desse limite, a taxa de suor aumenta linearmente com o aumento da temperatura central. A temperatura da pele pode afetar a transpiração de duas maneiras:

- (i) Quanto maior a temperatura da pele, menor o limiar de transpiração. No entanto, não ocorre transpiração para temperaturas centrais inferiores ou iguais a 36,85 °C, independentemente da temperatura da pele. No entanto, para temperaturas mais altas ou iguais a 37,10 °C, a transpiração sempre ocorre independentemente da temperatura da pele.
- (ii) A queda da temperatura da pele inibe a taxa de produção de suor.

Se a vasoconstrição não é capaz de manter o calor no corpo, a função termorreguladora metabólica ocorre e o corpo começa a tremer para aquecer o corpo. O ponto em que o tremor começa, o limiar do tremor, depende da temperatura central. Se a temperatura média da pele for menor que o limite de calafrios para uma determinada temperatura central, ocorrerá calafrios. O aumento máximo na geração de calor metabólico causado por tremores, ocorre a uma temperatura média da pele de aproximadamente 20 °C.

### 3.4 Modelos Racionais

#### 3.4.1 Evolução dos Modelos a Partir de Gagge e Stolwijk (1972; 1971)

Os modelos racionais traduzem uma definição matemática das respostas humanas a ambientes térmicos. Eles podem ser analisados como uma influência da equação do balanço térmico usada para definir índices térmicos racionais. No entanto, face aos índices, o termo modelo térmico geralmente refere-se a uma simulação matemática dinâmica do corpo humano e sua resposta aos ambientes térmicos, abrangendo um sistema passivo e de controle para o corpo, bem como mecanismos de troca de calor.

Esses modelos vêm sendo desenvolvidos à bastante tempo. O modelo de Stolwijk e Hardy (1971), foi um dos pioneiros na década de 70, sendo apresentado pela primeira vez em 1960, nos Estados Unidos da América, com intuito de representar as respostas térmicas dos astronautas para a “conhecida NASA”, Este modelo foi referência dos modelos publicados atualmente, conforme demonstra a Figura 3.6, esses modelos matemáticos levam em consideração alguns segmentos do corpo e o sistema de termorregulação.

Outro modelo que se julgou importante para as pesquisas sobre o tema tratado nessa dissertação foi o estudo do A. Pharo Gagge (1972), biofísico formado pela Universidade de Virgínia e PhD por Yale, em 1941 ingressou no Laboratório Aeromédico da Base aérea de Wright Patterson. No período entre 1960 a 1972 Gagge (1972), desenvolveu o modelo dinâmico simplificado, de fácil aplicação, com base na versão de Stolwijk, onde, incluiu equações para a resistência térmica fornecida pela roupa sobre o corpo, providenciando uma parte complementar dos cálculos para determinar a nova temperatura efetiva (ET). Este modelo conhecido como o modelo de dois nós.

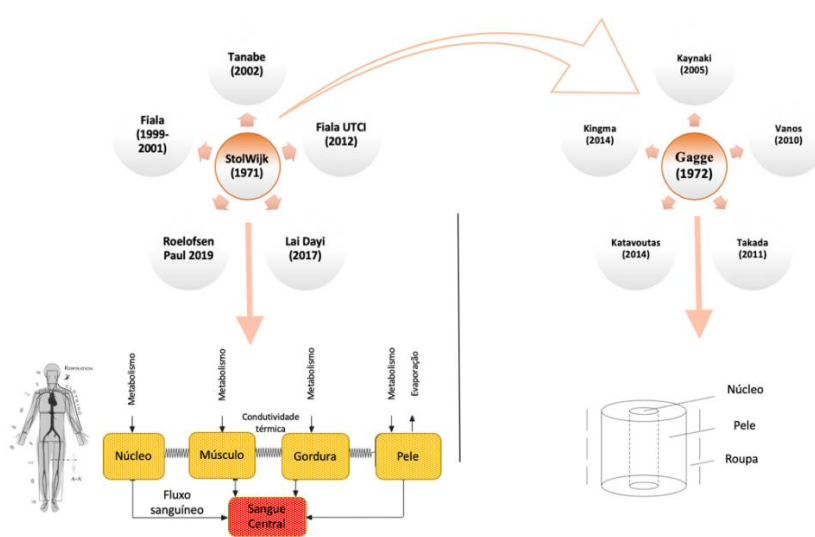


Figura 3.6 - Modelos racionais pioneiros: influência dos modelos dinâmicos atuais (Gagge, 1972; J. A. J. Stolwijk, 1971).



Os modelos são classificados de acordo com dois níveis: primeiro de acordo com a separação do corpo humano, por exemplo em segmentos, e segundo de acordo com cada separação de segmento, como mostra a Tabela 3.1.

No primeiro nível, o corpo humano pode ser simulado de três maneiras: como corpo de segmento único, como corpo de múltiplos segmentos ou como corpo de múltiplos elementos.

No segundo nível de classificação, cada segmento é separado em modelos fisiológicos térmicos de um nó, dois nós, múltiplos nós e múltiplos elementos. Os modelos de segmento único representam o corpo humano como um segmento ou elemento, enquanto modelos multissegmentados o separam em mais elementos.

Os modelos de vários elementos simulam uma representação tridimensional do corpo usando análise de elementos finitos. Cada segmento pode ser representado como: a) camada uniforme (um nó), b) duas camadas (dois nós) ou c) com várias camadas (vários nós).

Tabela 3.1 – Classificação de alguns modelos de conforto térmico e seus respectivos seguimentos.

Separação do Corpo	Classificação	Modelos	Seguimentos
<b>Seguimento Simples (a) e (b)</b>	Um-nó Dois-Nós	Fanger 1970 Givoni and Goldman 1971 Gagge 1971 KSU two-node 1977	
<b>Seguimentos Múltiplos (b)</b>	Dóis-nós Múltiplos-nós	Kohri and Mochida 2002 Crosbie 1961 Stolwijk 1971 Fiala 1999 UC Berkeley 2001 Tanabe 2002 ThermoSEM 2004 Lai and Chen 2016	
<b>Múltiplos-elementos (c)</b>	Múltiplos-elementos	Wissler 1985 Smith 1991 Ferreira 2009 Schwarz 2010 Guedes 2016	

### 3.4.2 Modelo de Wissler (1964, 1985)

Dr. Eugene Harley Wissler<sup>3</sup>, é um dos mais importantes pesquisadores em modelagem termofisiológica. Ele começa estudando profundamente os conceitos fisiológicos da termorregulação humana e aplicando-os de maneira revolucionária.

O seu modelo matemático dinâmico foi desenvolvido com particularidade de simular as características físicas do sistema térmico do corpo humano no estado transitório. Tem como particularidade específicas as entradas dos parâmetros fisiológicos, como taxas de geração de calor metabólico local, taxas de fluxo sanguíneo local e taxas de transpiração, sendo implementado ao modelo para estudo da regulação térmica no ser humano. No modelo de Wissler (1964), o corpo foi dividido em 15 segmentos geométricos: a cabeça, o tórax, o abdômen e os segmentos proximal, medial e distal dos braços e pernas. Os fluxos venosos foram coletados juntos no coração antes de fluir para os capilares dos pulmões, permitindo uma liberdade considerável na atribuição de propriedades físicas, como condutividade térmica e taxa de fluxo sanguíneo.

De acordo com o autor, a síntese de um modelo matemático adequado para o sistema térmico humano deve incluir os fatores gerados por reações metabólicas, Condução de calor, convecção pela circulação do sangue, perda de calor pelo trato respiratório, sudorese e tremores entre outros. Por outro lado, os fatores como a taxa local de geração de calor só podem ser medidos in vivo com bastante dificuldades, e seus valores devem ser deduzidos a partir de medições indiretas. De fato, um dos principais usos de um modelo matemático é atribuir valores razoáveis aos parâmetros que não podem ser medidos diretamente em um experimento (Parsons, 2010).

Wissler, referência em seus estudos, as pesquisas de C.H. Wyndham e A. R. Atkins (1960), que simulam o corpo humano por uma conjunto de cilindros concêntricos, J. D. Hardy e E. Fessenden (1961), que perfilharam uma abordagem muito parecida empregando uma laje infinita ao oposto de um cilindro, enquanto isso, em 1964, Wyndham e Atkins diligenciavam adaptar seu modelo para incluir alterações locais, empregando um sistema físico.

Assim, decidiu-se pesquisar a possibilidade de alcançar um recurso mais mutável utilizando processos de elementos finitos. O alvo do estudo é expor o sistema físico no qual as equações se baseiam, consistindo-se em vários elementos cilíndricos que representam segmentos longitudinais dos braços, pernas, tronco e cabeça. Todo elemento consiste num aglomerado de tecido, osso, gordura e pele, possui um sistema vascular que pode ser dividido em três subsistemas representando as artérias, as veias e os capilares conforme a Figura 3.7.

---

<sup>3</sup> <https://www.legacy.com/obituaries/statesman/obituary.aspx?n=eugene-harley-wissler&pid=189449535>

(Acedido em 29/01/2020)

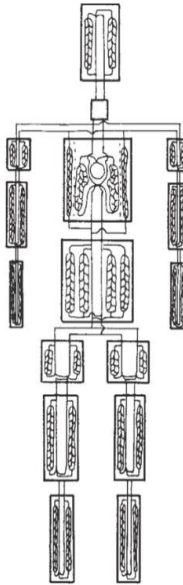


Figura 3.7 - Modelo geométrico de termorregulação por (Wissler, 1964).

O calor que é gerado nos gerado nas camadas teciduais por reações metabólicas e é contido no elemento, transferido pelo sangue circulante ou transportado para a superfície onde é dissipado para o ambiente. Isso é uma reprodução da primeira lei da termodinâmica, que pode ser estabelecida matematicamente como a equação de condução de calor exibida na equação 2

$$\rho C_i \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_i r \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + h m_i + Q_{c_i} (T_{a_i} - T_i) + H_{a_i} (T_{a_i} - T_i) + H_{v_i} (T_{v_i} - T_i) \quad (2)$$

Onde:

- $T_i(t, r)$  - é a temperatura instantânea do tecido à distância radial  $r$  do eixo do elemento  $i^{th}$ ;
- $\rho_i(r)$  - é a densidade do tecido;
- $C_i(r)$  - é o calor específico do tecido;
- $k_i(r)$  - é a condutividade térmica do tecido;
- $h m_i(t, r)$  - é o calor metabólico gerado por unidade de volume;
- $Q_{c_i}(t, r)$  - é a quantidade de calor resultante do produto da vazão mássica e do calor específico do sangue por unidade de volume;
- $H_{a_i}(t, r)$  - é o coeficiente de transferência de calor entre as artérias e os tecidos por unidade de volume;
- $H_{v_i}(t, r)$  - é o coeficiente de transferência de calor entre as veias e os tecidos por unidade de volume;
- $T_{a_i}(t)$  - é a temperatura arterial do sangue no elemento  $i^{th}$ ;
- $T_{v_i}(t)$  - é a temperatura venosa do sangue no elemento  $i^{th}$ .

A equação simula a taxa de acumulação de energia térmica por unidade de volume, sucedido pela à mudança de temperatura do tecido e do sangue capilar. A taxa de geração de calor por reações metabólicas, a taxa líquida em que o calor é transportado para o volume pelo sangue capilar, a taxa na qual o calor é transferido do sangue arterial para o tecido e a taxa na qual o calor é transferido do sangue venoso para o tecido em função do tempo e espaço. Podemos ressaltar que esta forma da equação de condução de calor é aplicável exclusivamente a um sistema axial radial. A circulação sanguínea é o mecanismo mais importante para conduzir o calor, e a temperatura do sangue modifica ao decorrer do tempo, sendo indispensáveis duas expressões matemáticas extras para antecipar as alterações nos reservatórios arteriais e venosos em cada segmento. Ao formular a equação para as artérias, assumiu-se que as artérias no elemento ( $i^{th}$ ) formam um reservatório com uma temperatura uniforme em função da temperatura do ar. A taxa de acumulação de energia térmica neste reservatório é igual à soma da taxa líquida na qual o calor é transportado para a piscina pelo fluxo de sangue, a taxa na qual o calor é transferido do tecido vizinho para o sangue no reservatório, com isso, o calor é transferido diretamente do reservatório venoso para o reservatório arterial devido à circunvizinhança de algumas artérias e veias, sendo descritas pela equação 2.1.

$$(MC)_{ai} \frac{\partial T_{ai}}{\partial t} = Q_{ai}(T_{am} - T_{ai}) + 2\pi L_i \int_0^{a_i} H_{ai}(T_i - T_{ai})rdr + H_{avi}(T_{vi} - T_{ai}) \quad (2.1)$$

Onde:

- $M_{ai}$  - é a massa de sangue contida no reservatório arterial do elemento  $i^{th}$ ;
- $C_{ai}$  - é o calor específico do sangue arterial;
- $Q_{ai}(t)$  - o produto da vazão mássica e do calor específico para o sangue que entra no reservatório arterial;
- $T_{am}(t)$  - é a temperatura do sangue que entra no reservatório arterial;
- $L_i$  - é o comprimento do elemento  $i^{th}$ ;
- $H_{avi}$  - é o coeficiente de transferência de calor para transferência direta entre grandes artérias e veias.

A equação (2.2) corresponde para o reservatório venoso:

$$(MC)_{vi} \frac{\partial T_{vi}}{\partial t} = Q_{vi}(T_{vn} - T_{vi}) + 2\pi L_i \int_0^{a_i} (Q_{ci} + H_{vi})(T_i - T_{vi})rdr + H_{avi}(T_{ai} - T_{vi}) \quad (2.2)$$

Onde:

- $M_{vi}$  - é a massa de sangue contida no reservatório venoso do segmento  $i^{th}$ ;
- $C_{vi}$  - é o calor específico do sangue venoso;
- $Q_{vi}$  - é o produto da vazão mássica e do calor específico para o sangue venoso que entra no reservatório venoso do segmento  $i^{th}$  proveniente do segmento  $n^{th}$ ;

- $T_{vn}$  - é a temperatura do sangue que vem do segmento  $n^{th}$ .

A temperatura venosa e a temperatura na seção abdominal, sofre leves variações por conta da ramificação das veias para essa seção, também foi necessária uma alteração na equação que corresponde a seção torácica, fazendo com que as correntes venosas terminem, nascendo as correntes artérias, com isso, o sangue entra pelos capilares pulmonares com uma determinada temperatura média do corpo, entrando no ventrículo direito. Isso exigiu uma mudança na equação 2 porque a temperatura do sangue venoso que entra nos capilares pulmonares é diferente da temperatura do sangue arterial que entra nos capilares mais superficiais do tórax representado na equação 3.

$$\rho C_i \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_i r \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + h_{mi} + Q_{ca} (T_{ai} - T_i) + Q_{cv} (T_{vi} - T_i) + H_{ai} (T_{ai} - T_i) \dots$$

$$\dots + H_{vi} (T_{vi} - T_i) \quad (3)$$

Onde:

- $Q_{ca}(t, r)$  - é o produto da vazão mássica e do calor específico do sangue arterial que flui para os capilares;
- $Q_{c,}(t, r)$  - é o produto da taxa de fluxo mássico e calor específico para o sangue venoso que flui para os capilares pulmonares.

As equações (2.1) e (2.2) também foram modificadas para tomar conhecimento do fato de que o sangue venoso flui para os capilares pulmonares, que por sua vez desagua no reservatório arterial equações 4 e 5.

$$(MC)_{ai} \frac{\partial T_{ai}}{\partial t} = 2\pi L_i \int_0^{ai} Q_{cv} (T_i - T_{ai}) r dr + 2\pi L_i \int_0^{ai} H_{ai} (T_i - T_{ai}) r dr + H_{vi} (T_i - T_{ai}) \quad (4)$$

$$(MC)_{vi} \frac{\partial T_{vi}}{\partial t} = \sum_i Q_{vii} (T_{vi} - T_{vi}) + 2\pi L_i \int_0^{ai} H_{vi} (T_i - T_{vi}) r dr + H_{vi} (T_{ai} - T_{vi}) + q_{rvi} \quad (5)$$

Onde:

- $q_{rvi}(t)$  - é a taxa na qual o calor é transferido do sangue venoso no tórax para o ar no trato respiratório;
- $Q_{vii}(t)$  - é a taxa na qual o sangue venoso flui do elemento  $i^{th}$  para reservatório venoso no tórax =  $Q_{ai}(t)$  para os elementos que estão conectados ao segmento torácico.

As equações (2.1), (2.2) e (2.3) são as principais equações da modelagem passiva de Wissler, a falha dessas equações descritivas detalhadas, é a necessidade de um grande conjunto de informações que não possam ser diretamente medidas ou avaliadas.

As equações (4) e (5), basicamente retratam a dificuldade de analisar os elementos como um todo. O procedimento utilizado consiste em subdividir cada um dos elementos circulares em várias conchas anulares e atribuir uma única temperatura característica ao material em cada uma das conchas. Então o lado direito da equação (2.1) para um valor particular de  $(r)$  pode ser aproximado por uma equação algébrica linear. Além disso, nenhuma tentativa é feita para calcular as temperaturas das conchas como funções contínuas do tempo. Em vez disso, emprega-se um procedimento de marcha no qual as temperaturas iniciais são usadas para calcular as temperaturas num curto intervalo de tempo. Wissler foi o primeiro pesquisador a desenvolver um modelo multissetorial do corpo humano para prever respostas fisiológicas a uma ampla gama de ambientes (Guedes, 2016).

Wissler (1985), observa o trabalho de Machle e Hatch (1947), que introduziu o conceito de temperatura do núcleo e da concha, e relaciona-o com o trabalho de Pennes (1948), que descreveu a perfusão de calor em cilindros usados (Guedes, 2016), para representar o antebraço. Assim descreve seu primeiro modelo, que era uma representação de seis cilindros do corpo humano que evoluiu para um modelo que calcula 225 temperaturas em 15 elementos mais O<sub>2</sub> e concentrações de CO<sub>2</sub> e lactato Wissler (1961). O modelo é uma ordem de magnitude maior que o modelo Stolwijk e Hardy (1972) e validado para ambientes quentes e frios e para ambientes de uma atmosfera hiperbáricas. Os detalhes fornecidos permitem seu uso em áreas especializadas, como imersão em água gelada e mergulho, onde foi utilizado em aplicações.

### **3.4.3 Modelo de Fiala (1999, 2012)**

O Modelo Fiala é um modelo de universal de vários segmentos e vários nós. É um dos modelos mais reconhecidos, entretanto, o modelo original Fiala (1999), inclui um sistema ativo e um passivo com circulação sanguínea simulada. Além disso, o modelo Fiala é aplicável a ambientes internos e externos e, em condições estáveis ou transitórias com uma grande variedade de níveis de atividade de até 10 met (Fiala, 1998). De acordo a evolução da temperatura central e a simulação da temperatura média da pele é possível prevê o PPD (Mouratidis, 2009). Porém torna-se um modelo fechado para os usuários e é implementado por software comercial (Enescu, 2019). Para os indivíduos sedentários, os modelos demonstram que o sinal de erro de temperatura da pele revê melhor para a sensação térmica. Além disso, a sensação térmica está mais bem correlacionada com o Tsk do que com outras variáveis fisiológicas (taxa de suor, temperatura interna e fluxo sanguíneo da pele) (ASHRAE 55, 2013).

Fiala (2003), apresentou um indicador gerado a partir do modelo multissegmentado (DTS - sensação térmica dinâmica), usado para prever a temperatura humana e as respostas regulatórias para combinações das condições climáticas predominantes no exterior. Fornecendo métodos

subjacentes que constituem o modelo UTCI (Fiala, 2012), de vários nós da fisiologia e conforto térmico humano. Os tópicos tratados incluem modelagem de transferência de calor e massa dentro do corpo, modelagem de trocas de calor ambientais, reações termorregulatórias do sistema nervoso central e respostas perceptivas.

Outras contribuições desta edição especial descrevem a validação do modelo UTCI em relação a dados laboratoriais e o desenvolvimento do modelo de vestuário adaptável para climas ao ar livre. Incluindo o calor metabólico gerado no corpo, o respectivo calor disseminado pelas regiões do corpo pela circulação sanguínea e o calor conduzido à superfície do corpo (Bröde et al., 2012). O calor é perdido da superfície corporal para o ambiente por convecção, radiação e evaporação (Guedes, 2016). As trocas térmicas entre o corpo e seu ambiente são calculadas através de técnicas de cálculo numérico. Cada segmento do corpo é modelado como cinco camadas do corpo (núcleo, músculo, gordura, pele interna e pele externa). Também são incluídas as variações locais de convecção de superfícies, troca direcional de radiação, evaporação e coleta de umidade na pele, e a não uniformidade dos conjuntos de roupas (Kaynakli & Kilic, 2005). A separação setorial de cada elemento permite que o modelo se aplique condições diferentes e, assim, simule o ambiente de maneira mais realista (Mouratidis, 2009).

O corpo foi idealizado como 15 elementos esféricos ou cilíndricos do corpo: cabeça, face, pescoço, ombros, braços, mãos, tórax, abdômen, pernas e pés. O modelo de multicamadas consiste em camadas de tecido concêntrico anular e utiliza sete materiais diferentes de tecido: cérebro, pulmão, osso, músculo, vísceras, gordura e pele. Os critérios para divisão consistem em camadas separadas sempre que ocorre uma alteração significativa nas propriedades do tecido. Conforme mostrado na Figura 3.8, o modelo é composto por 19 compartimentos e 342 nós, e é capaz de considerar a assimetria e a direção da transferência de calor para cada compartimento (Guedes, 2016; Parsons, 2010).

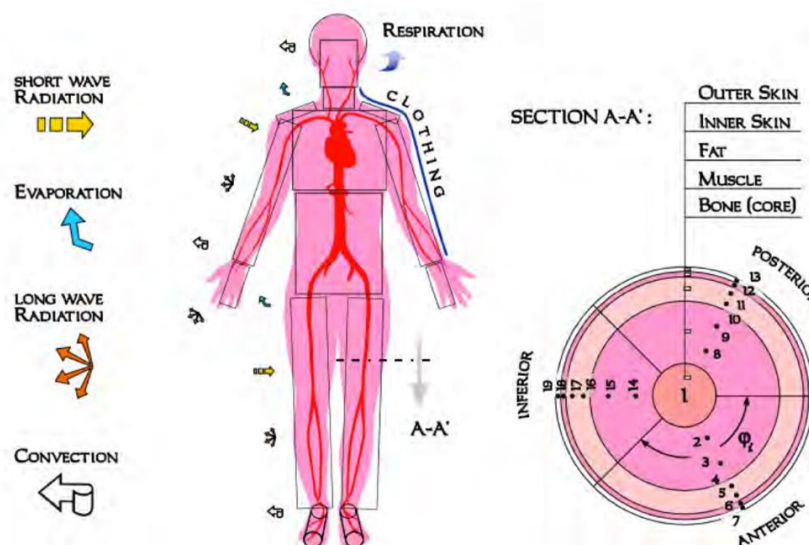


Figura 3.8- Vista esquemática do corpo humano para o modelo Fiala (Fiala, Kevin J. Lomas, 1999).

O sistema passivo do corpo humano depende da transferência do calor do tecido biológico. Pennes (1948), desenvolveu uma equação diferencial que descreve a transferência de calor dentro de tecidos, apelidada como “equação de *Bioheat*”, que é rerepresentada no modelo de (1999), na equação 6.

$$k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\omega}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + qm + \rho_{bi} W_{bi} C_{bi} (T_{bi,a} - T) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

Onde:

- T - (°C) é a temperatura desconhecida do tecido;
- r - é o raio (m);
- t - é o tempo (s);
- $\omega$  - é um fator de geometria igual a 1 para coordenadas cilíndricas ou 2 para esféricas;
- k - é a condutividade térmica (W/(mK));
- $\rho$  - é a densidade (kg / m<sup>3</sup>);
- C - é a capacidade de aquecimento (J/ (kg K));
- T<sub>bi,a</sub> - é a temperatura do sangue arterial;
- qm\* - é o metabolismo tecidual produzido em um volume finito de tecido (W/m<sup>3</sup>);
- $\rho_{bi}$ , W<sub>bi</sub><sup>5</sup> e C<sub>bi</sub> - é a densidades sanguíneas, a taxa de perfusão sanguínea e a capacidade de aquecimento do sangue.

No modelo numérico, cada camada de tecido é transformada em distribuição contínua de unidades individuais, com um ou mais nós de tecido, totalizando 187 nós de tecido para o corpo como um todo (Fiala, 2012). Para minimizar o erro numérico, os nós dos tecidos são separados de maneira desigual na direção radial, com um espaçamento mais denso em direção às regiões externas do corpo, onde ocorrem os gradientes de temperatura mais relevantes (Mouratidis, 2009). Um esquema de diferenças finitas é empregado para discretizar a equação (6) no modelo numérico.

As derivadas parciais com o raio, são modeladas usando o método da diferença central, em transformações temporais na temperatura do tecido. O esquema Crank-Nicholson ( $\Omega_{CN}$  Tr), que é constituído pela média do método explícito ( $\Omega_{Ex}$  Tr), e implícito ( $\Omega_{im}$  Tr), é definido para o intervalo de tempo atual (t), e o intervalo de tempo 'futuro' (t + 1), respectivamente na equação (7).

<sup>4</sup> Note-se que a temperatura sanguínea arterial T<sub>bi,a</sub> geralmente não é conhecida e, na maioria dos casos, é expressa em termos da temperatura dos tecidos de todos os elementos do corpo.

<sup>5</sup>\* Note-se também que os parâmetros W<sub>bi</sub> e qm são influenciados pelo sistema ativo e são atualizados a cada iteração.



$$\Omega_{CN} T_r^{(t)} = \frac{1}{2} (\Omega_{Ex} T_r^{(t)} + \Omega_{im} T_r^{(t)}) \quad (7)$$

Onde:

- $\Omega_{CN}$  - é o operador linear médio de Euler explícito;
- $\Omega_{Ex}$  - é o operador linear médio de Euler implícito.

∴

Aplicado à eq. (6) as expressões explícitas e implícitas para o nó r produzem as equações (8) e (9).

$$\begin{aligned} \Omega_{Ex} T_r^{(t)}: \rho r C r &= \dots & (8) \\ \dots &= k r \left[ \frac{T^{(t)}_{r+1} + T^{(t)}_{r-1} - 2T_r^{(t)}}{\Delta r^2} + \frac{T^{(t)}_{r+1} - T^{(t)}_{r-1}}{2r\Delta r} \right] + q_{m,r}^{(t)} + \beta r^{(t)} [T^{(t)}_{bia} - T^{(t)}_r] \end{aligned}$$

E

$$\begin{aligned} \Omega_{im} T_r^{(t)}: \rho r c r \frac{T_r^{(t+1)} - T_r^{(t)}}{\Delta t} &= \dots & (9) \\ \dots &= k r \left[ \frac{T^{(t+1)}_{r+1} + T^{(t+1)}_{r-1} - 2T_r^{(t+1)}}{\Delta r^2} + \frac{T^{(t+1)}_{r+1} - T^{(t+1)}_{r-1}}{2r\Delta r} \right] + q_{m,r}^{(t+1)} + \beta r^{(t+1)} [T^{(t+1)}_{bia} - T^{(t+1)}_r] \end{aligned}$$

Portanto, os índices (r-1), (r) e (r + 1), referem-se ao nó do tecido (adjacente anterior, posterior respectivamente). Aplicando a equação (6), e separando os termos de temperatura “futura”, é obtida a seguinte forma numérica da “equação de biocalor”

$$\begin{aligned} [\gamma_r - 1] T_r^{(t)} - 1 + \left[ \frac{\zeta_r}{\Delta t} + 2 + \delta_r \beta_r^{(t+1)} \right] T_r^{(t)} - [1 + \gamma_r] T_{r+1}^{(t+1)} - \delta_r \beta_r^{(t+1)} T_{bia}^{(t+1)} \\ = & (10) \\ [1 - \gamma_r] T_r^{(t)} - 1 + \left[ \frac{\zeta_r}{\Delta t} - 2 - \delta_r \beta_r^{(t)} \right] T_r^{(t)} + [1 + \gamma_r] T_{r+1}^{(t)} + \delta_r [q_{m,r}^{(t+1)} + q_{m,r}^{(t)}] \dots \\ \dots + \delta_r \beta_r^{(t)} T_{bia}^{(t)}. \end{aligned}$$

Portanto:

$$\gamma_r(cil^6) = \frac{\Delta r}{2r} \quad ; \quad \gamma_r(cab^7) = \frac{\Delta r}{r} \quad ; \quad \delta_r(cil) = \frac{\Delta r^2}{2r} \quad ; \quad \zeta_r = 2 \Delta r^2 = \frac{\rho r C r}{k r}$$

Onde

---

<sup>6</sup> Coeficiente referente ao cilindro (cil).

<sup>7</sup> Coeficiente referente a cabeça (cab).

- $\gamma, \delta, \zeta$  - São os coeficientes independentes do tempo decorrentes da formulação numérica da “equação bioheat”;
- $\beta_r$  - é o Fator da taxa de perfusão sanguínea ( $W K^{-1}. m^{-3}$ );
- $q_m$  - é a taxa metabólica ( $W/m^{-3}$ );
- $T_{bia}$  - é a Temperatura Arterial do sangue;
- $T$  - é a temperatura ( $C^\circ$ );
- $r$  - é o raio (m)
- $r$  é o número do nó.

O intervalo de tempo  $\Delta t$  (s), aproxima a função diferencial  $\partial t$  na equação (6), e o índice  $\beta_r$  corresponde equivalentemente a um calorimétrico que depende do tempo e da taxa de fluxo sanguíneo nodal sendo:

$$\beta_r = (\rho_{bi} C_{bi} W_{bi,r}) \quad (11)$$

A Equação (10) é aplicada a cada um dos 187 nós de tecido do modelo, usando as propriedades apropriadas do material do tecido basal ( $k, \rho, c$ ) e as taxas basais de geração de calor ( $q_m$ ) e as taxas de perfusão sanguínea  $W_{bi}$  (Mouratidis, 2009). Portanto, o sistema de equações lineares é resolvido para cada etapa de iteração de tempo em simulação, usando técnicas apropriadas de solução de calculo matricial. Para simulações rápidas, os coeficientes da equação são organizados como um sistema estruturado de matrizes de condução independentes do tempo e matrizes de sangue dependentes do tempo. Os coeficientes das matrizes de condução incluem as constantes  $\gamma, \delta, \zeta$  que descrevem as propriedades termofísicas da geometria e dos tecidos, logo, precisam ser calculadas apenas uma vez em uma simulação (Fiala, 2012).

O autor expõe uma proposta de modelagem de sistema ativo onde as reações fisiológicas do sistema nervoso central (tremores, fluxo sanguíneo da pele) são consecutivamente ajustadas (Guedes, 2016), de acordo com os valores da temperatura hipotalâmica e da temperatura média da pele demonstrado na Figura 3.9. O sangue atravessa todos os compartimentos e algumas camadas, incluindo a pele interna, mas não a externa, que contém glândulas sudoríparas (Parsons, 2010). O sistema termorregulador foi desenvolvido por meio de análise de regressão usando dados medidos obtidos de experimentos fisiológicos que cobrem estresse frio constante e transitório, condições de estresse frio, moderado, quente e quente e níveis de atividade de até exercícios pesados (Katic et al., 2014). A análise de regressão revelou que os sinais de temperatura da pele, o núcleo da cabeça e as taxas de alteração da temperatura da pele são os impulsos motrizes que governam a sensação térmica geral do ser humano (Fiala et al., 2001).

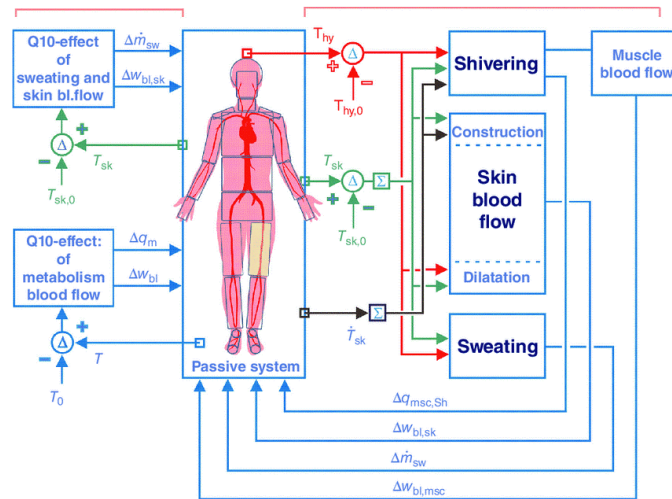


Figura 3.9 - Vista esquemática do corpo humano para o modelo ativo de Fiala (Fiala, 2012)

No modelo UTCI a radiação solar não é abordada explicitamente, mas faz parte do processo de cálculo da temperatura radiante média do ambiente ( $T_{rm}$ ). O modelo de evaporação da pele congregado garante balanceamento de calor e massa em cada face do setor corporal. A condução de energia latente de um setor de pele da área  $A_{sk}$  é dado por (Fiala, Kevin J. Lomas, 1999), a equação (12), representa o transporte de energia líquida devido ao potencial evaporativo entre a pele e o ar.

$$\frac{P_{sk} - P_a}{Re, cl, l} = \lambda_{H^2O} \frac{dm_{sw}}{A_{sk} dt} + \frac{P_{osk, sat} - P_{sk}}{Re, osk} \quad (12)$$

Onde

- $P_{sk}$  e  $P_a$  [Pa] - são as pressões parcial do vapor de água na superfície da pele e no ar;
- $Re, cl, l$  - é a resistência evaporativa local da roupa;
- $\lambda_{H^2O}$  - é o calor da vaporização da água e a taxa local de transpiração reguladora  $\frac{dm_{sw}}{dt}$ ;
- $P_{osk}$  - é o transporte de calor por difusão da umidade através da pele, com a pressão parcial de vapor saturada;
- $A_{sk}$  - é área da pele.

O Sistema termorregulador e as respostas perceptivas das equações de controle que governam as respostas termorregulatórias individualmente no modelo, que prediz as quatro respostas termorregulatórias essenciais do sistema nervoso central, ou seja, (vasoconstrição, dilatação do fluxo sanguíneo cutâneo, tremores e excreção da umidade do suor) (Fiala et al., 2001).

$$SH = 10[\tanh(0.48 \Delta T_{sk, m} + 3,62) - 1]\Delta T_{sk} - 27,9\Delta T_{hy} + 1,7 \Delta T_{sk, m} \frac{dT_{sk, m}}{dt} - 28.6 \quad (13)$$

$$CS = 35[\tanh(0.34 \Delta T_{sk,m} + 1,07) - 1]\Delta T_{sk} - 3.9 \Delta T_{sk,m} \frac{dT_{sk,m}}{dt} \quad (14)$$

$$DL = 21[\tanh(0.79 \Delta T_{sk,m} - 0,70) + 1]\Delta T_{sk} + 32[\tanh(3,29 \Delta T_{hy,m} - 1,46) + 1]\Delta T_{hy} \quad (15)$$

$$SW = [0.8 \tanh(0.59 \Delta T_{sk,m} - 0,19) + 1,2]\Delta T_{sk} + [5,7 \tanh(1,98 \Delta T_{hy,m} - 1,03) + 6.3]\Delta T_{hy} \quad (16)$$

Onde

- SH<sup>8</sup> (W) - é a equação de controle para tremores, usa o sistema passivo com o controlador baseado em  $\Delta T_{sk}$ ;
- CS<sup>9</sup> (g/min) - é a equação de controle para vasoconstrição periférica;
- DL<sup>10</sup> (W/k) - é a equação de vasodilatação, sendo proporcional ao aumento do fluxo sanguíneo muscular causado pelo exercício;
- SW (g/min) - é a equação de controle para sudorese.

As respostas gerais SH, CS, DL e SW são distribuídas pelo corpo empregando os coeficientes de distribuição (Cw, asw, adl, acs e ash). Os coeficientes de distribuição para sudorese e vasodilatação foram obtidos em (J. A. J. Stolwijk, 1971). Os coeficientes utilizados no modelo UTCI-Fiala para distribuir as respostas gerais de tremores e vasoconstrição foram estimados a partir de simulações de exposições ao frio e ao frio extremo em (Fiala et al., 2001), enquanto os coeficientes de sensibilidade cutânea foram obtidos por (Crawshaw, Nadel, Stolwijk, & Stamford, 1975; Nadel, Mitchell, & Stolwijk, 1973).

A análise de regressão revelou que os sinais de temperatura da pele, o núcleo da cabeça e as taxas de alteração da temperatura da pele são os estímulos motrizes que governam a TS geral do ser humano, para prever a DTS, tem a equação 17 obtida no modelo de (Fiala et al., 2003):

$$DTS = 3 \tanh \left( \alpha \Delta T_{sk,m} + g + \frac{0,11 \frac{dT_{sk,m}^{(-)}}{dt} + 1,91 e^{-0,681t} \frac{dT_{sk,m}^{(+)}_{max}}{dt}}{1+g} \right) \quad (17)$$

<sup>8</sup> No modelo, o SH tem um máximo de 350W, sendo compensado pela quantidade de calor, devido ao exercício.

<sup>9</sup> No modelo a resposta de CS têm um valor máximo 600 W/k.

<sup>10</sup> No modelo a resposta de SW têm um valor máximo 23 g/mim.

Onde

- $\alpha^{11}$  - é o coeficiente de absorção de ondas curtas;
- $\Delta T_{sk,m}$  - é a variação da temperatura média da pele;
- $g$  é o gradiente sanguíneo

$$g = 7,94 \exp\left(\frac{-0.902}{\Delta T_{hy+0,4}} + \frac{7.612}{\Delta T_{sk,m-4}}\right) \quad (18)$$

### 3.4.4 Modelo de Tanabe (2002)

Com base no modelo Stolwijk, o modelo de termorregulação de 65 nós de Tanabe (2002), foi desenvolvido por Shinichi Tanabe, Doutor e Professor do Departamento de Arquitetura da Universidade de Waseda-Japão, este modelo é capaz de prever a variação das condições fisiológicas para várias partes do corpo, totalizando 16 segmentos (Katic et al., 2014), sendo dividido em cabeça, peito, costas, pelve, ombro direito, ombro esquerdo, braço direito, braço esquerdo, mão direita, braço esquerdo, coxa direita, coxa esquerda, perna direita, perna esquerda, pé direito e pé esquerdo. As partes corporais consistem em divisões do núcleo, músculo, gordura e pele (Tanabe & Kobayashi, 2002). Ele compara a dinâmica do calor entre o homem e o meio ambiente, integrando o modelo humano em um sistema de mecânica de fluidos computacional conhecido como CFD (Guedes, 2016). O último 65º nó do modelo simula o compartimento sanguíneo central e todos os segmentos corporais, possuem reservatórios sanguíneos nas artérias e veias. Também veias superficiais e anastomoses arteriovenosas, e estão incluídas no sistema vascular dos membros. Vasoconstrição, vasodilatação, transpiração e tremores também estão incluídos no modelo. Como as características térmicas do corpo humano dependem da altura, peso, sexo, idade, percentual de gordura corporal, taxa metabólica basal e índice cardíaco.

As equações do balanço térmico do modelo de 65 nós, são demonstradas juntamente com o compartimento sanguíneo, os índices (i), representa o número de seguimentos e o índice (j) o número de camadas, totalizando no todo em quatro camadas.

Onde

- $C(i, j)$  é a capacidade térmica do nó (i, j);
- $T(i, j)$  é a sua temperatura;
- $Q(i, j)$  é a taxa de produção de calor (W);
- $B(i, j)$  é a taxa de troca de calor entre o compartimento sanguíneo central e o nó (i, j) (W);
- $D(i, j)$  é a taxa condutora de troca de calor com a camada vizinha (W);

<sup>11</sup> Onde  $\alpha$  equivale a  $0,30 \text{ k}^{-1}$  e  $1,08 \text{ k}^{-1}$  para  $T_{sk, m} < 0$  e  $\Delta T_{sk, m} > 0$ ,

- RES (i, j) perda de calor por respiração na camada central do segmento torácico (W);
- $Q_t(i, 4)$  é a taxa de troca de calor convectiva e radiante entre a superfície da pele e o ambiente (W);
- $E(i, 4)$  é a perda de calor por evaporação na superfície da pele (W)

O calor é transportado pelos tecidos por segmentos individuais por condução, ocorre uma troca de calor entre o corpo e o ambiente por respiração, o fluxo sanguíneo é simplificado em troca de calor entre os tecidos locais e o compartimento sanguíneo central, muscular, a camada de gordura e a pele, sendo distribuído em quatro camadas do corpo, representando as equações de balanço térmico do modelo de 65NM:

Camada central 1, equação 19.

$$C(i, 1) \frac{dT(i, 1)}{dt} = Q(i, 1) - B(i, 1) - D(i, 1) - RES(i, 1) \quad (19)$$

Camada muscular 2, equação 20.

$$C(i, 2) \frac{dT(i, 2)}{dt} = Q(i, 2) - B(i, 2) + D(i, 1) - D(i, 2) \quad (20)$$

Camada de gordura 3, equação 21.

$$C(i, 3) \frac{dT(i, 3)}{dt} = Q(i, 3) - B(i, 3) + D(i, 2) - D(i, 3) \quad (21)$$

Camada de pele 4, equação 22.

$$C(i, 4) \frac{dT(i, 4)}{dt} = Q(i, 4) - B(i, 4) + D(i, 3) - Q_t(i, 4) - E(i, 4) \quad (22)$$

Sangue Central, equação 23.

$$C(65) \frac{dT(65)}{dt} = \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^4 B(i,j) \quad (23)$$

### 3.4.5 Modelo de Takada (2011)

O modelo de Takada (2011), retrata teoricamente os dados termofisiológicos para o modelo dinâmico, podendo ser facilmente adaptado para a simulação em câmara climática artificial, para ter um ambiente e os seis parâmetros ambientais monitorados ( $T_a$ ,  $H_r$ ,  $V$ ,  $T_{rm}$ ,  $clo$ ,  $Met$ ).

Entretanto, o autor procurou buscar parâmetros termofisiológicos como a temperatura da pele, temperatura interna e a taxa de sudação, tornando-se o termo constante para os indivíduos expostos nas mesmas condições ambientais.

Em seu experimento, Takada (2011), procurou preservar os dados originais de (Gagge, 1972), atribuindo dados da literatura para obter resultados da (Temperatura da pele) atribuídos pelos métodos de Hardy e DuBois. Em seu estudo, foram incorporados 56 condições ambientais e 233 indivíduos na totalidade, o autor não levou em consideração a contribuição de tremores em relação a taxa metabólica. De acordo com Takada (2011), a literatura não apresentava a temperatura da pele no estado transitório, com isso, o autor adotou um valor constante para a avaliação em questão para o terminal, foram calculados os dados de todos os sujeitos em um único conjunto de dados experimentais, sendo realizado em ambiente simulado e fechado.

Dois-Nós.

Onde

- $A$  é a área da superfície do corpo ( $m^2$ )
- $q_{cr:sk}$  é o fluxo de calor na pele ( $W/m^2$ )
- $q_{cr:am}$  é o é o fluxo de calor do ambiente
- $M$  é a taxa metabólica ( $W/m^2$ )
- $W$  é o trabalho externo ( $W/m^2$ )
- $c_{bl}$  é o calor específico do sangue ( $litro/m^2 \cdot h$ )
- $\dot{V}_{bl}$  é a taxa do fluxo sanguíneo na pele ( $litro/m^2 \cdot h$ )
- $\rho_{bl}$  é a densidade sanguínea ( $kg/m^3$ )
- $K_{min}$  é a condutividade térmica mínima do tecido da pele ( $W/ (m^2.K)$ )
- $T_{am}$  é a temperatura do ambiente ( $^{\circ}C$ )
- $P_{am}$  é a pressão de vapor do ambiente ( $mmHg$ )
- $\alpha_c$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $W/ (m^2.K)$ )
- $\alpha_r$  é o coeficiente de transferência de calor por radiação ( $W/ (m^2.K)$ )
- $\alpha'$  é o coeficiente de transferência de umidade ( $kg/ (m^2.s. mmHg)$ )
- $T_{mrt}$  é a temperatura radiante média ( $^{\circ} C$ )
- $r$  é o calor evaporativo da água ( $j/kg$ )

- $F_{cl}$  é a transferência de calor eficiente do vestuário (N.D)
- $\dot{m}_{rsw}$  é a taxa regular de transpiração ( $\text{g}/\text{m}^2.\text{h}$ )
- $C_{\alpha 1}$  é o coeficiente de razão da massa cutânea (N.D)
- $C_{\alpha 2}$ ;  $C_{\alpha 3}$  são os coeficientes de razão da massa cutânea ( $\text{litro}/\text{m}^2. \text{h}$ )
- $m_{bm}$  é a massa do corpo inteiro (média do núcleo e da pele)
- $\alpha$  é a relação de massa da pele (N.D)

Equação 24, balanço térmico no nó principal.

$$cm_{cr} \frac{dT_{cr}}{dt} = A(-q_{cr:sk} - q_{cr:am} + M - W) \quad (24)$$

Equação 25, balanço térmico para o nó da pele.

$$cm_{sk} \frac{dT_{sk}}{dt} = A(-q_{cr:sk} - q_{sk:am}) \quad (25)$$

O fluxo de calor do núcleo para a pele, o fluxo sanguíneo e a condutividade térmica do núcleo para o ambiente pela respiração, e da pele para o ambiente são trocados por convecção e radiação:

$$q_{cr:sk} = \left( c_{bl} \rho_{bl} V_{bl} \frac{1}{3600} \frac{1}{1000} + K_{min} \right) \quad (26)$$

$$q_{cr:am} = 1,4 \times 10^{-3} M (34 - T_{am}) + 0,0023 M (44 - P_{am}) \quad (27)$$

$$q_{sk:am} = \{ \alpha_c (T_{sk} - T_{am}) + \alpha_r (T_{sk} - T_{mrt}) \} F_{cl} + 0,06 . r . \alpha' . F_{cl} (P_{sk, sat} - P_{am}) \dots \\ + 0,94 . r . \dot{m}_{rsw} \frac{1}{3600} \frac{1}{1000} \quad (28)$$

A massa de cada nó é expressa como a razão de massa da pele para o corpo total:

Massa do núcleo:

$$m_{cr} = m_{bm} (1 - \alpha) \quad (29)$$

Massa da pele:

$$m_{sk} = m_{bm} \alpha \quad (30)$$



Relação de massa da pele:

$$\alpha = C_{\alpha 1} + \frac{C_{\alpha 2}}{\sqrt{V_{bl} + C_{\alpha 3}}} \quad (31)$$

Onde a razão de massa da pele para o corpo se torna uma função da taxa de fluxo sanguíneo da pele essa proporção é uma constante na edição de Gagge (1972). O autor, com base nos resultados experimentais para um grande número de indivíduos sob várias condições ambientais térmicas, avaliou a validade do modelo de dois nós para prever a Tsk em estado estacionário. A edição predominante do modelo de dois nós (edição de 1986) pode prever a temperatura da pele em estado estacionário com precisão satisfatória para uma pessoa comum.

### 3.5 Conclusões

É primordial comparar o nível de precisão desses modelos distintos, também a capacidade de se adaptar aos diferentes tipos de ambiente. Os modelos racionais complexos tiveram o melhor comportamento em função ao tempo. A satisfação térmica com o meio ambiente é um fenômeno complexo, influenciado por um grande número de fatores físicos psicológicos, e fisiológicos, dificultando a previsão de conforto na fase de projeto de construção. Logo, a avaliação do conforto térmico tem sido um tópico de pesquisa de grande interesse ao longo dos anos.

Desde o início da pesquisa sobre respostas fisiológicas do corpo humano, diferentes modelos de termorregulação humana foram desenvolvidos (Parsons, 2010). Nesta dissertação, foram analisados alguns modelos de forma analítica sobre os pontos relevantes para a proposta da modelagem apresentada, sendo esses modelos dinâmicos de forma avançada de termorregulação desenvolvidos nos últimos anos. A ênfase particular foi dada à aplicação existente dos modelos ao longo dos anos, com isso, os modelos foram-se desenvolvendo gradualmente. Todos os modelos têm a modelagem da troca de calor dentro do corpo e do corpo com o ambiente em comum. Eles diferem na geometria da modelagem do corpo humano, no número de segmentos de camadas).

Outra diferença entre os modelos está na modelagem da termorregulação. A parte ativa que determina as respostas fisiológicas do corpo humano, costuma traduzir-se por diferentes equações empíricas que correlacionam respostas fisiológicas (fatores da taxa de suor, taxas de fluxo sanguíneo), com os dados modelados pela modelação do sistema passivo (temperatura da pele e compartimentos do *core* ou núcleo), As respostas térmicas a diferentes condições ambientais variam de pessoa para pessoa, dependendo da antropometria e fisiologia da termorregulação. Para melhorar a aproximação das respostas térmicas fisiológicas ao estresse e ser capaz de simular exatamente o que ocorre no corpo humano, devem ser adequadamente compreendidas e exploradas as características individuais do ser humano.



## **PARTE 2. DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO**

O desenvolvimento e implementação do modelo matemático dinâmico baseia-se nos estudos originais de Stolwijk (1971) e A.P Gagge (Gagge, 1972), ambos pesquisadores da vertente de conforto térmico e pioneiro da modelagem para termorregulação humana. As equações que traduzem os fenômenos de transferência de calor foram desenvolvidas expondo indivíduos humanos a uma variedade de ambientes térmicos e “adaptando” modelos matemáticos aos dados obtidos, tendo em sua maioria os dados de índices para temperatura efetiva, ou fisiológica para ambientes externos.



## 4 INTRODUÇÃO METODOLÓGICA

### Objetivos Gerais

- Avaliar o conforto térmico em ambiente exterior por meios da modelação dinâmica, utilizando um modelo racional.

### Objetivos Específicos

- Implementar novas equações no modelo para ambientes transitórios, levando em conta as variáveis ambientais para ambiente;
- Dimensionar a correção do vestuário para os indivíduos em situações ambientais diversas, levando em consideração a molhagem da pele, a camada do vestuário e o tipo de isolamento para a roupa, e a taxa de tremores;
- Gerar capacidade do modelo responder a diferentes condições reais do ambiente.
- Permitir adaptação para parâmetros individuais.

### 4.1 Materiais

O modelo foi desenvolvido em programação Python, por ser uma linguagem de alto desempenho, simples, rápido e poderoso. O código “Pythônico” com diferentes campos de aplicação e resultados precisos, possuem muitos pontos fortes para o fluxo de trabalho é muito mais rápido e mais fácil de começar a usar em relação aos outros itens disponíveis. Durante a elaboração do modelo, foi utilizado a PEP8<sup>12</sup> de forma a melhorar a legibilidade do código e exibir-se coerente em todo o amplo espectro de código.

#### 4.1.1 Linguagem Python

O código Python é uma linguagem de programação aberta com diversas aplicabilidades na ciência de dados, com tipagem dinâmica e forte, foi uma linguagem projetada com uma filosofia de enfatizar a importância do esforço do programador sobre o esforço computacional. Prioriza a legibilidade do código sobre velocidade ou expressividade combinando uma sintaxe concisa e clara com os recursos avançados de sua biblioteca padrão e módulos e estruturas ativadas por terceiros. A linguagem Python também tem a vantagem de ser multiplataforma, o que significa que é compatível com diferentes sistemas operacionais, como Windows, Linux e MacOS. Essas foram as principais razões pelas quais a linguagem Python se mostrou a mais adequada para o desenvolvimento desse trabalho.

---

<sup>12</sup> <https://wiki.python.org.br/GuiaDeEstilo>

### 4.1.2 Bibliotecas Data Science para Python

O modelo foi projetado para obter resultados e dados científicos, trabalhando com equações dinâmicas em função do tempo e dados de entradas de diversas variáveis, a implementação das bibliotecas de Data Science para Python fornece uma amplitude de informação visual dos dados facilitando a análise do trabalho e programação do código. Entre os diferentes pacotes disponíveis, foram encontrados alguns que provaram ser os mais relevantes para essa abordagem de cálculo:

- **NumPy** é um dos essenciais pacotes nesse âmbito. Ele é aplicado ao processamento desenvolvidos a diversos tipos de matrizes simples ou multidimensionais.
- **SciPy** apesar de não incluir o NumPy, essa biblioteca e a compilação de algoritmos e comandos de alto nível para manuseamento e observação de dados. Este pacote introduz funções para avaliar números inteiros, resolvendo equações diferenciais.
- **Matplotlib** é uma biblioteca para criar diagramas e esquemas 2D e 3D para visualização. Pode-se criar diversos gráficos, desde histogramas e gráficos de dispersão até gráficos de coordenadas não cartesianas.
- **IPython Notebook** é um ambiente interativo computacional, você pode combinar a execução de código

## 4.2

### 4.3 IDE para Python

O Ambiente de desenvolvimento integrado do modelo, foi realizado pela IDE Spyder<sup>13</sup> para Python que é acoplado pela distribuição Anaconda<sup>14</sup>, utilizado para ciência de dados, ele integra as bibliotecas essenciais, como NumPy, SciPy, Matplotlib e IPython, além disso, pode ser estendido com plugins que oferece uma combinação exclusiva das funcionalidades avançadas de edição, análise, depuração e criação de perfil de uma ferramenta abrangente de desenvolvimento com exploração de dados, execução interativa, inspeção profunda e recursos de respostas de um pacote científico. Como, em engenharia, o Matlab é uma ferramenta popular usada com muita frequência e, sendo a interface semelhante, o Spyder se torna fácil de aprender.

---

<sup>13</sup> <https://www.spyder-ide.org/>

<sup>14</sup> <https://dadosedeciso.es.com.br/anaconda/>

Acessado em 8 de maio de 2020







## 5 MÉTODO

### 5.1 Desenvolvimento do Modelo

O presente capítulo menciona todos as perspectivas metodológicas que guiaram o progresso da dissertação, traçando alguns dos passos da modelagem que será percorrido a diante. A base do modelo foi desenvolvido com apoio dos estudos de Gagge (1972, 1986; 1973; 1977), conhecido como o *Modelo de Dois Nós*. As simulações iniciais foram de acordo com os parâmetros ambientais e fisiológicos do homem padrão apresentado no estudo (Gagge, 1972). Na prática podemos conceptualmente distinguir dois sistemas separados em termorregulação: **o sistema de controle (ou sistema ativo) e o sistema controlado (sistema passivo)**. O modelo representado por um cilindro de duas camadas: pele e núcleo, como demonstrado na Figura 5.1.

A modelação aborda a interação com ambiente incluindo; e as trocas de calor com o corpo humano, representando o fluxo térmico; a termorregulação, e representando a reação fisiológica na manutenção da temperatura, e considera o isolamento do vestuário nas trocas. Seu desenvolvimento está de acordo com a cronologia do processo de construção do modelo e inclui informações sobre as equações matemáticas empíricas que estão na base da modelação, os métodos numéricos usados para resolver as equações, e os materiais de implementação computacional, as normas (ASHRAE Handbook, 1997; ISO 7726, 1998; ISO 7730, 2005; ISO 7933, 1987; ISO 9920, 2006), foram utilizadas para dimensionar os cálculos do modelo e implementar as correções do vestuário para roupas secas e molhadas, demonstrado no fluxograma da Figura 5.3, na etapa 10 para dimensionamento do vestuário.

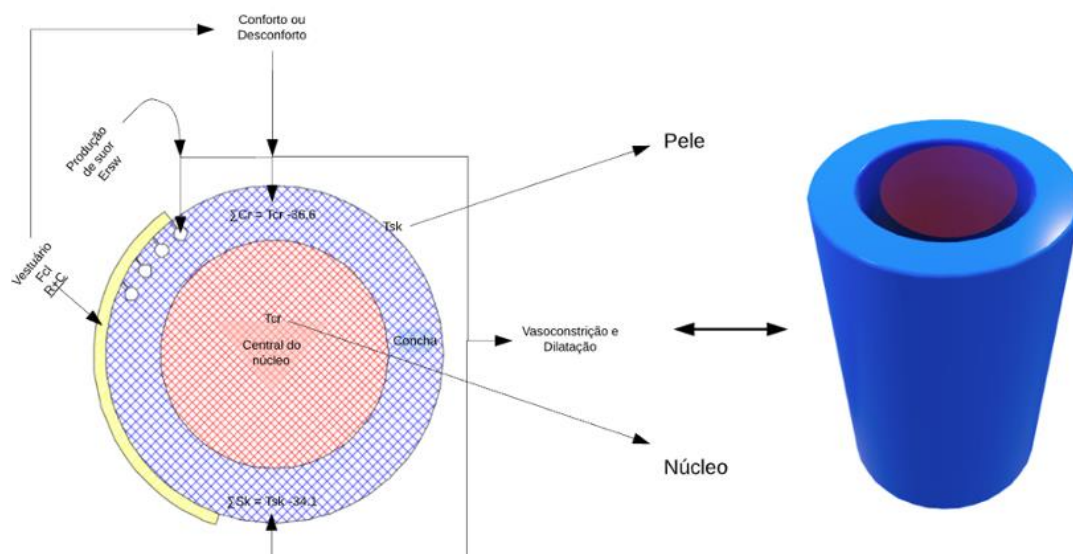


Figura 5.1 - Representação esquemática do sistema controlado do modelo de dois nós. Fonte Adaptada (Gagge, 1972)

Para testar o modelo, na primeira fase foram considerados os dados do estudo de StolWijk (1971) e os dados de saída do modelo de Gagge (1972, 1986). As condições de entrada são diretamente proporcional aos parâmetros ambientais e fisiológicos para a funcionalidade do modelo, assim como o *Homem Padrão* apresentados nos modelos dos autores, com as características: Área de DuBois de 2.0 m<sup>2</sup>; massa corporal de 81.7 kg; altura do indivíduo de 1.77 m; massa da concha do cilindro (msk) de 3.4 kg; massa do núcleo (mcr) de 78.3 kg e fluxo de sangue na pele de 6.3 l/h.m<sup>2</sup>.

O cálculo de equilíbrio térmico, assim como o dimensionamento do vestuário é desenvolvido como o sistema controlado “sistema passivo”, A transferência de calor no núcleo acontece por condução com a pele, e por convecção, com o ambiente externo devido à respiração. O resfriamento e o aquecimento ocorrem devido ao fluxo de calor transportado para do sangue, para a pele, e da pele para o ar em W/m<sup>2</sup>, podendo fornece ganho ou perda de calor para o sistema através da capacidade térmica (Gagge, 1986).

O sistema controlador do modelo “sistema ativo”, estuda as objeções regulatórias do corpo humano de vasodilatação, vasoconstrição, sudorese e tremores. Com o propósito de proporcionar a termorregulação, mantendo a temperatura contínua do núcleo do corpo, controlando a escassez de calor por evaporação (Katic et al., 2014) é visto como o sistema nervoso central que controla o sistema passivo. A descrição da recepção térmica, a relação neural e as temperaturas locais da pele são traduzidas em informações por neurônios sensíveis ao frio e ao calor (Kingma et al., 2012). Na medula espinal, as informações dos neurônios singulares são ajustadas e conduzidas ao hipotálamo. Os neurônios sensíveis ao calor no hipotálamo traduzem a temperatura central e são inibidos pelos neurônios sensíveis ao frio, enquanto os neurônios sensíveis ao calor periférico desempenham um papel excitatório. Os neurônios de controle responsáveis pelas vias de defesa do frio são inibidos pelos neurônios sensíveis ao calor no hipotálamo.

Um aspecto importante da transferência de calor por convecção é o efeito da velocidade e dos movimentos do vento nos coeficientes de transferência de calor por convecção da camada de ar superficial e da roupa (Malchaire et al., 2002). Na ISO 9920 (2006) e Parsons (2010), foram apresentadas em as seguintes equações de correção para o vestuário sendo estas deduzidas para os efeitos da velocidade efetiva do vento na camada de ar da superfície e no isolamento da roupa. Esse fator de correção é usado pelo modelo para calcular o isolamento dinâmico do vestuário quando  $I_{cl} < 0.2$  e  $< 0.6$  clo. A Figura 5.2 representa esquematicamente o modelo assim como a sua descrição.

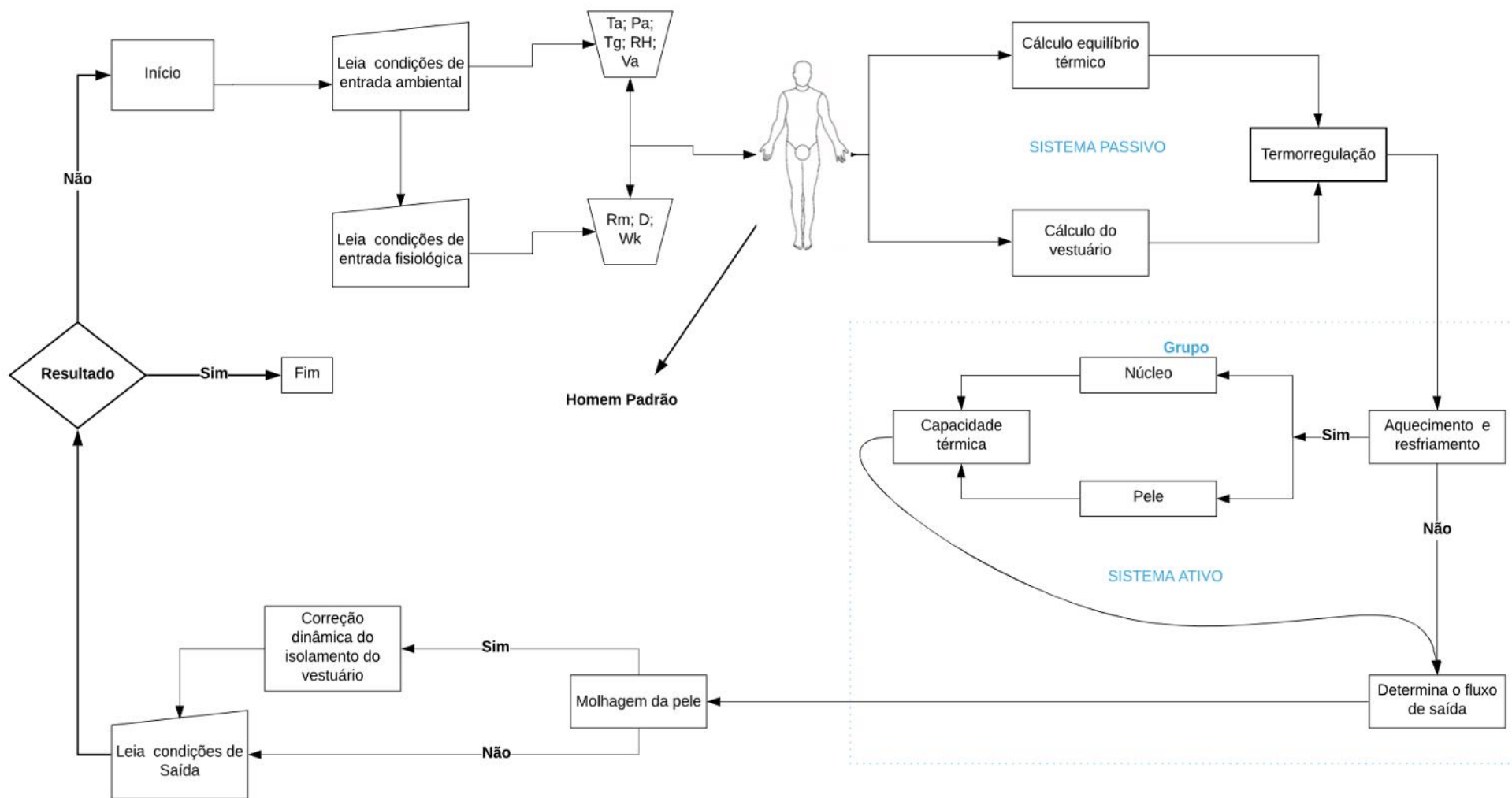


Figura 5.2 - Diagrama de fluxo do modelo de dois nós, para a simulação da termorregulação humana.

## 5.2 Implementação e Adaptação do Modelo

### 5.2.1 Modelo de 25 nós Stolwijk (1971)

Stolwijk, nos proporcionou diversos dados científicos para contribuição de normas e adaptação ao sistema termofisiológicos para o homem, apresentou em seu modelo de termorregulação, sendo, dividido em 25 compartimentos que representa as partes do corpo humano. O sistema controlado no modelo incide em seis frações, cada um com quatro conjuntos concêntricas.

Cada um dos vinte e cinco compartimentos é representado por uma equação de balanço térmico, responsável pela troca de calor condutiva com os compartimentos adjacentes, produção de calor metabólico, troca de calor por convecção com o compartimento central do sangue e perda de calor por evaporação e troca de calor com o ambiente, se o compartimento estiver em contato direto com o meio ambiente. O sistema de controle na regulação da temperatura corporal pode ser dividido em três partes distintas, entre elas, a parte que contém os mecanismos de detecção que reconhecem o estado térmico do sistema controlado. A segunda parte recebe informações sobre o estado térmico, integra-o e envia comandos efetores apropriados aos vários sistemas efetores. A terceira parte do sistema de controle recebe os comandos efetores e, se apropriado modifica-os de acordo com as condições na periferia antes de traduzir tais comandos em ação efetiva (J. A. J. Stolwijk, 1971).

Para levantamento dos dados, Stolwijk realizou diversos estudos na literatura e fundamentou seu trabalho com base em outros autores, caracterizando os indivíduos pela área da superfície corpo, volume do corpo, a circunferência da cabeça e do tronco, circunferência do braço e antebraço, da mesma forma, o comprimento da coxa da virilha ao joelho, foram necessários duas circunferências medidas para a coxa e um conjunto semelhante de medidas para as pernas, no total, foram realizados 20 medidas, sendo 10 para homens e 10 para mulheres. A velocidade do ar assumida foi de 0,1 m/s devido a convecção gravitacional de acordo com o autor, essa expressão é válida para uma faixa de 5% da temperatura ambiente de 10°C a 40 °C para uma velocidade máxima do ar de até 10 m/s (J. A. J. Stolwijk, 1971). O coeficiente de transferência ambiental combinado estimado e calculado para um homem nu, em pé em um ambiente termicamente uniforme em  $W/m^2 \cdot ^\circ C$  demonstrado na Tabela 10.1 do Anexo A.

A taxa metabólica de repouso foi presumida como 74,4  $W/m^2$  para todo o homem padrão. No estado de repouso, a perda total de calor evaporativo é de cerca de 18 Kcal/h. O fluxo sanguíneo total para a pele teve uma variação de 30 °C a 35 °C para o homem em repouso com variação de 240 ml/ mm.  $m^2$  há 110 ml/ mm.  $m^2$  proporcionalmente da condutância entre o núcleo e a pele.

A Tabela 10.2 do Anexo A , ressalta os resultados produzidos pelo modelo (J. A. J. Stolwijk, 1971), que teve como a exposição dos indivíduos para validar é reproduzir uma mudança repentina nas condições, para isso, foi simulado a resultante resposta termorregulatória dinâmica para os indivíduos. Durante o experimento da simulação, foram expostos entre temperaturas

ambientes sendo: as temperaturas do ar e a temperatura p<sup>o</sup>r da parede iguais, as velocidades do ar em condições mínimas, abaixo de 0.1 m/s. Os sujeitos passaram 30 minutos a uma temperatura termicamente neutra, seguido por 120 minutos a uma temperatura ambiente de 48 °C, e mais 60 minutos de recuperação em um ambiente de 30 °C.

### 5.2.2 Modelo de Dois Nós Gagge (1972, 1986)

Assim como no estudo de Stolwijk (1971), Gagge também realizou simulações por atividade ressaltando a sua análise para os tipos de funcionamento metabólico, a atividade (A) corresponde a tarefas cotidianas de gabinetes e afazeres de casa, sendo provavelmente 90% de nossas condições de vida, a atividade (C), representa o mesmo nível metabólico porém sem acréscimo do vestuário, de acordo com o autor a atividade (B), representa o esforço físico leve que geralmente ocorre em indústrias, padarias e cafés. Já as atividades (D), (E) e (F) representam exercícios de atividades moderadas, entretanto, a tarefa (F) representa 20% da eficiência da atividade do trabalho com 40% da capacidade máxima de oxigênio do homem, demonstrado na Tabela 10.3 do Anexo A.

O autor realizou esse experimento durante 1 hora de exposição, para qualquer combinação de temperatura ambiente ou umidade relativa do ar, os fatores iniciais para a simulação, que levou em consideração a  $T_a$  sendo variável de 10 °C a 40°C, o registro da taxa de suor regulatória a partir de 24 °C, Gagge também verificou a temperatura da pele e monitorou a molhagem da pele quando atingiu-se a 100%. Para a padronização do programa em FORTRAN, Gagge utilizou os parâmetros para entrada de Fator de convecção de 1.163 Kcal/h; Calor específico do de 1.163 Wh/1 °C; Calor latente de 0,7 Wh/g; Calor específico para o corpo de 0,97 Wh/Kh °C e a relação de Lewis de 2.2 N. D na edição 1972.

Já na Edição de Gagge (1986), se necessita a ocorrência da adição do cálculo para o tremor ser incorporado no modelo, mas não incluído no modelo original de 1972. Outro parâmetro que é importante ressaltar é a temperatura do núcleo calculada a partir da edição de 1972, são baixas para as condições de temperatura do ar devido à ausência do modelo trêmulo. A contribuição de fluxo sanguíneo da pele, calculada a partir da edição de 1986, é maior em situações de baixas temperaturas do ar e menor em condições de alta temperatura do ar devido as diferenciações nos coeficientes de vasoconstrição e vasodilatação do modelo, a proporção da massa da pele para o corpo inteiro, também só foi implementada na edição de 1986.

Para determinar e acrescentar os parâmetros de SET e ET no modelo de 1986, o autor utilizou os dados de entrada e saída publicados nos estudos de Nishi (1977), para implementação dos índices na modelagem apresentado na Tabela 10.6 do Anexo A, que relaciona os valores das principais variáveis fisiológicas na escala SET ilustrada na ASHRAE (1997), Acima da faixa de 10°C a 40 °C. Entre os valores SET de 23°C e 41°C, (SET e Regsw) são essencialmente lineares com  $T_b$  durante o equilíbrio térmico ( $S = 0$ ).

### 5.2.3 Apropriação do Modelo

A apropriação do modelo racional de termorregulação apresentado por Gagge (1972, 1986), baseia-se em um cilindro com duas camadas representativas, a temperatura interna em condições iniciais para termoneutralidade iniciou-se em 36.6 °C e 34.1 °C para a temperatura da pele. Para a modelação, foram usadas equações baseada na termofísica do ser humano, entretanto, para descrever as propriedades biofísicas da termorregulação e a fisiologia humana, o que proporcionam mudanças consequentes na temperatura central do corpo, na pele, e nas respostas cardiorrespiratórias ao longo do tempo, o modelo original apresentado no estudo de Gagge (1972), ressalta algumas variáveis incompatíveis para determinação de alguns fatores do sistema ativo da termorregulação, comprometendo os cálculos de vasoconstrição, dilatação demonstrado em (6a), (6b) e (7) do fluxograma da Figura 5.2, assim como algumas sequências de cálculos incompletos nas trocas de calor (5) para determinação de (ERES) e (DRY). O modelo torna-se incompreensível e irreproduzível a nível da modelação apresentada, o autor indicou algumas variáveis de entrada como parâmetros fixos, como por exemplo o coeficiente de convecção ( $h_c$ ), denominado no modelo como variável de entrada inicial (CTC), o coeficiente ( $h_c$ ) depende de fatores ambientais que podem ser determinados pela (ISO 7726, 1998), esse coeficiente sofre alteração devido a velocidade do ar e a emissividade do globo negro, sendo estimado de forma forçada ou natural, onde não foi levado em reflexão o tipo de convecção para precisão do modelo (1), o coeficiente de transferência por radiação ( $h_r$ ), foi arbitrado com o valor de 5.23 N.D, esse valor sofre modificações consideráveis por influência da temperatura radiante média (2) e da exposição do indivíduo a radiação solar, quando o mesmo encontra-se em ambiente ao ar livre, a não determinação da variável (CHR) no modelo de 1972, implica na etapa de cálculos para determinação explícita do ( $T_{cl}$ ) e da variável (Corrtot) para correção do vestuário, tema não abordado pelo autor no modelo de 1972, (10) e reificado na dissertação (11). Portanto buscou-se algumas alternativas na literatura para implementar e adaptar o modelo em ambiente transitório ao ar livre, o benefício desse método de modelagem é trazer respostas precisas para a perda de calor, o equilíbrio térmico, e valores da temperatura da pele e temperatura interna final para os indivíduos em avaliação, adaptado em função das características de cada indivíduo, para condições ambientais distintas (frio ou quente).

O sistema de controle para o elemento do modelo termorregulador relaciona respostas mecanicistas à temperatura corporal, incluindo transpiração, taxa evaporativa, tremores, taxa metabólica, atividade vasomotora e correção do vestuário. Uma relação interativa é matematicamente construída que pesa e influencia as respostas de temperatura. Essas respostas de temperatura (transferência de calor ou energia de rede) são baseadas em cálculos interconectados feitos dentro do “corpo inteiro” do modelo para manter um equilíbrio do fluxo térmico em relação às condições de entrada e resposta ideais de saída (12). A sensação de resfriamento e aquecimento do corpo em relação a capacidade térmica para o homem, ocorrem simultaneamente durante ao acréscimo ou decréscimo da taxa metabólica (6), o corpo fica em um estado de ‘neutralidade térmica fisiológica’, quando ocorre um decréscimo da taxa metabólico (M) o sinal representativo é negativo, a pele sente “frio”, quando ocorre o aumento da taxa metabólica o sinal é positivo, a

pele sente “calor”. Entretanto, um sinal “frio” da pele governa principalmente a “vasoconstrição” no interior da pele e reduz o fluxo sanguíneo do núcleo para a pele. O sinal de alerta da pele, desempenha um papel mais importante na regulação da temperatura corporal, regulando a transpiração do que gere a vasodilatação, já o sinal de alerta do núcleo causará dilatação no leito vascular e reproduzirá o aquecimento (6a).

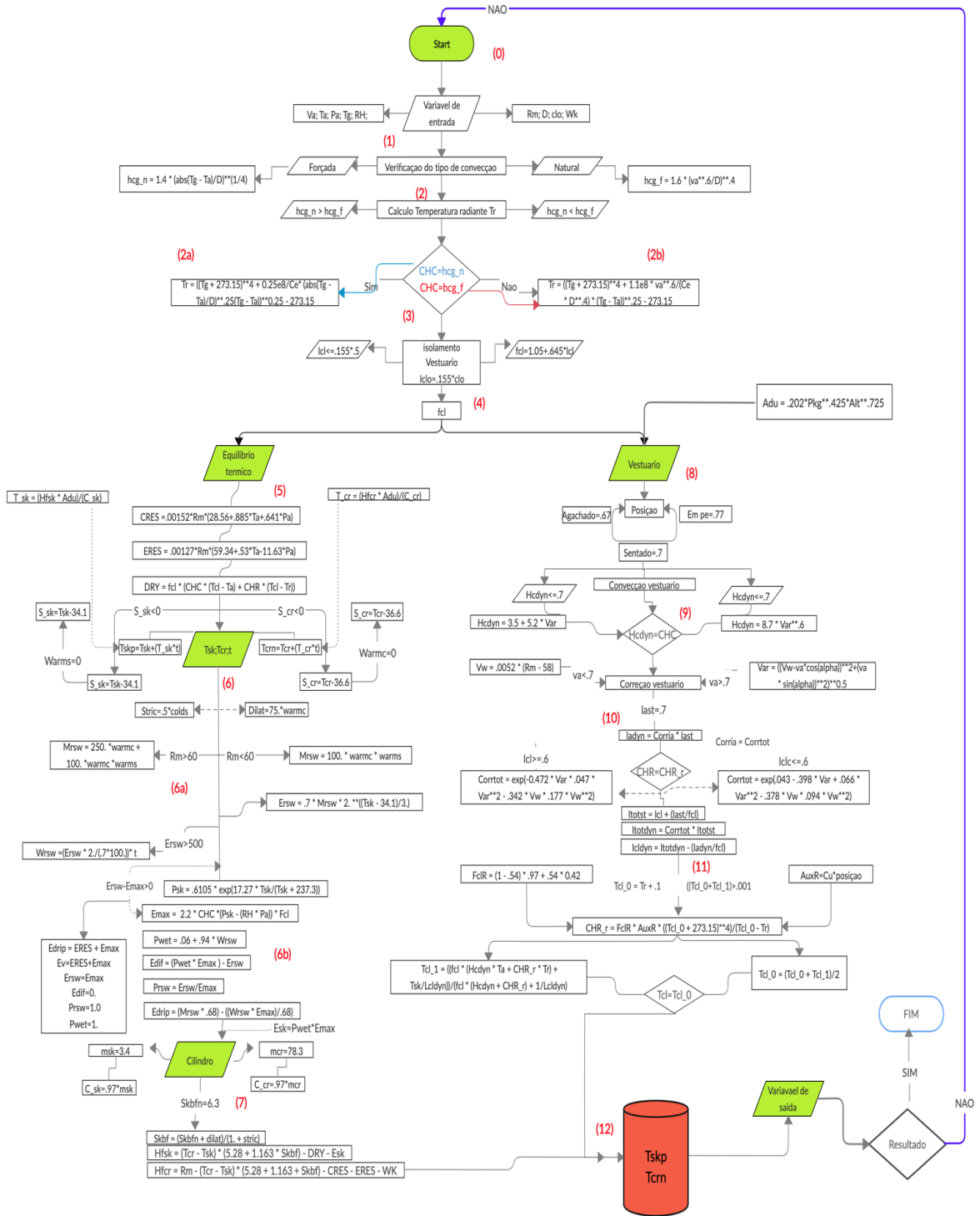


Figura 5.3 – Fluxograma de equações para adaptação da termorregulação humana, modelo de dois nós.

## 5.3 Design do Modelo

### 5.3.1 Troca de calor com o ambiente

As condições iniciais do corpo humano para o equilíbrio térmico da fisiologia, depende das variáveis de entradas para reproduzir a modelagem, que podem ser variáveis influenciadas pelo ambiente ou por indicadores fisiológicos do corpo humano, sendo elas ( $V_a$ ;  $P_a$ ;  $T_a$ ;  $T_g$ ;  $RH$ ) e ( $R_m$ ;  $D$ ;  $clo$ ;  $W_k$ ). O primeiro passo foi a verificação do tipo de convecção, sendo forçada ou natural, as equações matemática que representam essas convecções foram determinadas pela ISO 7726 (1998), e apresentada abaixo:

No caso de convecção Natural.

$$hcg = 1.4 \left( \frac{|T_g - T_a|}{D} \right)^{1/4} \quad (1)$$

Onde

- $Hcg$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção ao nível do globo, em  $W/m^2.K$ .

No caso de convecção Forçada.

$$hcg = 6.3 \left( \frac{va^{0.6}}{D^{0.4}} \right) \quad (2)$$

Onde

- $D$  é o diâmetro do globo, em (m);
- $V_a$  é a velocidade do ar no nível do globo, em (m/s).

A partir do cálculo dos coeficientes de convecções, o modelo adapta o maior valor atribuído no resultado das equações (1) e (2), conforme a orientação normativa para determinação do tipo de ambiente sendo (C) para o conforto. Para ambiente com denominação (S) de estresse, adota-se a convecção forçada diretamente (Lamberts, 2016). A radiação a que uma pessoa está sujeita em um determinado ambiente pode ser constitui por determinadas características térmicas, e, de forma direta sofrer alterações devido a sua posição ao sol e condições climáticas (Mayer & Hoppe, 1987). O método de avaliação para a ( $T_r$ ) envolve o segundo passo definido na linha de código número 10, devido a várias formas de emissão da radiação. Para a determinação da temperatura radiante foi atribuído as equações (6) e (8) da ISO 7726 (1998), para a modelagem, foi estabelecido algumas condições para as equações, de acordo com os dados de saída das convecções (1) ou (2), sendo:  $hcg_n > hcg_f$  relacionada á convecção natural e  $hcg_n < hcg_f$  para forçada, de acordo com as equações (3) e (4). A Figura 5.4, determina o passo de cálculo do código para determinação dos coeficientes de convecções e temperatura radiante ( $T_r$ ).



Temperatura Radiante para hcg\_n:

$$Tr = \sqrt[4]{Tg^4 + \frac{hcg}{\varepsilon g \sigma} (|Tg - Ta|)} \quad (3)$$

Temperatura Radiante para hcg\_f:

$$Tr = \left[ (Tg + 273)^4 + \frac{0.25 \times 10^8}{\varepsilon g} \left( \frac{|Tg - Ta|}{D} \right)^{1/4} x (Tg - Ta) \right]^{1/4} - 273 \quad (4)$$

Onde

- $\varepsilon g$  é a emissividade do globo negro, N.D;
- $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann sendo:  $5,67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>. K
- Tr é a temperatura radiante média, em kelvins;
- Tg é a temperatura do globo preto, em Kelvins.

Nota: para os cálculos do modelo, foram atribuídos nos códigos as conversões de Kelvin para Celsius nas referidas formulações.

```

1 # verificação do tipo de convecção.
2 # Natural
3 hcg_n = 1.4*(abs(Tg-Ta)/D)**(1/4)
4 # Forçada
5 hcg_f = 6.3*(va**.6/D**.4)
6
7 # Calculo da temperatura radiante média
8 if hcg_n>hcg_f:
9     CHC = hcg_n
10    Tr = ((Tg+273.15)**4+0.25e8/Ce*(abs(Tg-Ta)/D)**.25*(Tg-Ta))**.25-273.15
11 else:
12    Tr = ((Tg + 273.15)**4+1.1e8*va**.6/(Ce*D**.4)*(Tg-Ta))**.25-273.15
13    CHC = hcg_f
14 print('A temperatura radiante é de: %.2f' % Tr, '°C')
15

```

Figura 5.4 – Código para determinação da Hcg e Tr

O terceiro e o quarto passo relacionado ao fluxograma, é o cálculo do fator de isolamento térmico para a roupa (fcl), foi determinado pela ISO 7730 (2005). Esse fator relaciona a área de

vestuário e a área superficial do corpo, apresentado a relação entre a área coberta e a área superficial do corpo nu. Também considera o isolamento do vestuário e a determinação do (Icl), que tem como condições no modelo apresentado na Figura 5.5, o  $Icl = (.155 * clo)$  ressaltado no capítulo 8 da ISO 9920 (2006), que será abordado mais à frente conforme indicado a equação (5) e (6).

$$fcl = 1.00 + 1.29 Icl \quad \text{para} \quad Icl \leq 0,078 \text{ m}^2.k/W \quad (5)$$

$$fcl = 1.05 + 0.645 Icl \quad \text{para} \quad Icl \geq 0,078 \text{ m}^2.k/W \quad (6)$$

```

16 # Determinação do fcl a partir da recomendação da norma ISO 7730 |
17 float(input('Qual o valor do isolamento de conjuntos de roupas típicas "(clo)"?'))
18 print('%.1f' % clo)
19 Icl = .155 * clo #transformação de clo para m^2K/W
20 if Icl <= (.155 * .5):
21     fcl = 1. + 1.29 * Icl
22 else:
23     fcl = 1.05+.645*Icl

```

Figura 5.5 – Código para determinação do fator de eficiência térmica da roupa

### 5.3.2 Equilíbrio Térmico

A produção de calor interno do corpo é diretamente proporcional à taxa metabólica (M) menos a potência mecânica efetiva (W). Sendo compensada pelas trocas de calor no trato respiratório por convecção (Cres), representado na “linha de código 26” e evaporação (Eres), na “linha de código 29”, bem como pelas trocas de calor na pele por condução (K), convecção (C), radiação (R) e evaporação (E) (ISO 7933, 1987). De acordo com Malchaire (2001), as perdas respiratórias embora bastante limitadas a climas quentes, são da mesma magnitude que as perdas convectivas na superfície do corpo. Sendo determinado pela diferença entre as taxas evaporativa previstas nas perdas respiratórias por convecção. E durante a respiração, o corpo perde calor sensível, calor latente do trato respiratório para o ar inalado (ASHRAE Handbook, 1997). Essas equações podem ser reduzidas usando aproximações de relações empíricas para estimar os valores dos parâmetros. Sob circunstâncias normais, a taxa de ventilação pulmonar é principalmente uma função da taxa metabólica Fanger (1970), que pode ser demonstrado nas equações abaixo.

$$Cres = 0.00152 M (28.56 + 0.885 Ta + 0.641 Pa) \quad (7)$$

$$Eres = 0.00127 M (59.34 + 0.53 Ta - 11.63 Pa) \quad (8)$$

Onde

- Pa é a pressão parcial de vapor de água saturada, em Kpa;
- Ta é a temperatura do ar, em °C.

A troca de calor sensível da superfície da pele deve passar pelas roupas para o ambiente circundante ou por tecidos permeáveis, ou camada de ar entre a pele e o vestuário (Parsons, 2010). Esses caminhos são tratados em série e podem ser descritos em termos de transferência de calor da superfície da pele, através da roupa em função do (fcl), para a superfície externa da roupa e depois transmitido ao ambiente. Entretanto, as perdas de calor sensível (DRY) da superfície externa de um corpo revestido “linha de código 32”, podem ser expressas em termos de um coeficiente de transferência de calor convecção (CHC) e por radiação (CHR), demonstrado na Figura 5.6. Essa perda total de calor sensível (seco) pode ser determinada a partir da equação 9.

$$C + R = fcl [hcdyn (Tcl - Ta) + hr (Tcl - Tr)] \quad (9)$$

Onde

- Hcdyn é o coeficiente de transferência de calor convectivo dinâmico, W/m<sup>2</sup>.K;
- Tcl é a temperatura da superfície da roupa, em °C.

```

25 # fluxo de calor convectivo respiratório.
26 CRES = .00152*Rm*(28.56+.885*Ta+.641*Pa)
27 print('A perda de calor por convecção é de %.3f' % CRES)
28 # Perda de calor evaporativa pelos pulmões.
29 ERES = .00127*Rm*(59.34+.53*Ta-11.63*Pa)
30 print('A perda de calor evaporativo é de %.3f' % ERES)
31 # Perda total do calor seco.
32 DRY = fcl*(CHC*(Tcl-Ta)+CHR*(Tcl-Tr))

```

Figura 5.6 – Código fluxo de calor respiratório

### 5.3.3 Troca de Calor Entre a Pele e o Núcleo

O sexto passo da modelação é constituído pelo sistema ativo, nesse trecho do cálculo é necessário dar entrada dos dados da (Tcr) °C, (Tsk) °C, e (t) em minutos. Após o input das variáveis, a modelação processa e define o sinal para termorregulação em função do resfriamento

(colds, coldc) ou aquecimento (warms, warmc) para a pele e o núcleo, tendo como condições iniciais (10) e (11), assumindo uniformemente a temperatura  $T_{sk}$  e  $T_{cr}$ . Após a realização de alguns estudos, Gagge (1972), constatou que a temperatura inicial para o estado de termoneutralidade fisiológica iniciou-se em 34.1 °C e 36.6 °C, com exposição a um ambiente descrito por ( $T_a$ ) e ( $P_a$ ) a qualquer momento, para um esforço regulatório mínimo na manutenção da temperatura corporal ( $T_{cr}$ ), sendo por qualquer esforço vascular ou por sudorese.

$$T_{sk} = 34.1 + \int_0^t T_{sk} dt \quad (10)$$

$$T_{cr} = 36.6 + \int_0^t T_{cr} dt \quad (11)$$

Com isso, a partir das condições fisiológicas iniciais da temperatura, é possível assumir o somatório dos sinais da temperatura da pele e do núcleo central através das equações (12) e (13) representado na “linha de código 37 e 38”. Esses sinais estão ligados a vasoconstrição e a vasodilatação, e tem como respostas ao ambiente frio os tremores, e ao ambiente quente a sudorese.

A vasoconstrição está relacionada ao sinal frio da pele que teve como integração no modelo a variável ( $stric$ ), “linha de código 56”. Segundo princípios da fisiologia, sabe-se que isso ocorre porque quando há uma diminuição da temperatura ambiente, há um decréscimo da temperatura interna do corpo, e, para contrabalançar a variação da temperatura corporal, é preciso estabelecer uma diminuição na perda de calor para o ambiente externo. Esses mecanismos são processados no hipotálamo anterior, onde são feitas as integrações das informações convergentes térmicas, enquanto no hipotálamo posterior começam as respostas efetoras (Braz, 2019). Na área pré-óptica do hipotálamo permanecem neurônios sensíveis, que podem ser considerados em neurônios sensíveis ao calor e neurônios sensíveis ao frio (Dickenson, 1977). Quando o resultado das equações (12) e (13) obter o somatório do sinal (+) a pele sente calor, e quando o somatório do sinal é (-) a pele sente frio.

Verificação do sinal da pele  $S_{sk}$

$$\sum sk = T_{sk} - 34.1 \quad (12)$$

Verificação do sinal do núcleo  $S_{cr}$

$$\sum cr = Tcr - 36.6 \quad (13)$$

Em relação ao calor, o primeiro amparo autônomo é a vasodilatação (dilat), representado na “linha de código 57”, para aumentar as trocas de calor pela superfície da pele. Já a produção de suor é um ultrafiltrado do plasma e sua composição depende da magnitude da sudorese, constitui por inervação colinérgica pós-ganglionar nas terminações glandulares, sendo considerada a mais importante da composição, dependendo da intensidade da sudorese, do estado de hidratação (Braz, 2019).

A ausência ou presença de tremores, depende da produção de calor na superfície da pele (J. A. J. Stolwijk, 1971). O uso de roupas isolantes é o método comportamental para proteção do homem contra o frio, sem qualquer relação com os modelos de taxa de sudorese e fluxo sanguíneo da pele (Gagge, 1986). Esse aumento da taxa metabólica é transferido pelo organismo para gerar calor para os tecidos musculares (Takada et al., 2011). O tremor provoca a perfusão do músculo frio com sangue quente e uma queda resultante das temperaturas do núcleo, aumentando ainda mais os tremores (Jan A. J. Stolwijk & Hardy, 2011). A equação (14), demonstra o ajuste do calor metabólico devido aos tremores, com estratégia de controlar a temperatura interna do corpo e ajudar a regular as contrações na musculatura, o resfriamento do ambiente leva o hipotálamo a estimular a vasoconstrição cutânea e o aumento da taxa metabólica e produção de calor, dependendo diretamente da interação do sistema nervoso e endócrino (Moreira, 2015), a linha de código 54, ressalta o ajuste implementado na modelação para melhorar a interação do ciclo entre as medições analisadas.

$$Rm = M + 19.4 \text{ colds} * \text{coldc} \quad (14)$$

Para o núcleo, cada aumento em graus (°C), causará um aumento no fluxo sanguíneo para a pele (Skbf), de 75 litros/h.m<sup>2</sup>, sendo acima do fluxo sanguíneo natural da pele de 6.3 litros/h.m<sup>2</sup> para condições em extremo repouso, “linha de código 59”. O fluxo sanguíneo basal na neutralidade térmica pode ser reduzido para valores muito baixos através da vasoconstrição e aumentado substancialmente através da vasodilatação. Além disso, há um efeito da temperatura local que tem uma influência modificadora substancial na resistência das veias cutâneas (J. A. J. Stolwijk, 1971). O fluxo sanguíneo é modelado pela equação (15), e representado na “linha de código 60” da Figura 5.7.

$$Vbl = (6.3 + 75 \sum cr) / (1 - 0.5 \sum sk) \quad (15)$$

```

33 # Definição do sinal para vasodilatação e vasoconstrição
34 # Conversão do tempo (t) para horas, com iterações de 10s.
35 t_h = 10/60./60.
36 for i in range(10,ti*60+1,10):
37     S_cr = Tcr - 36.6 # Sinal do núcleo °C
38     S_sk = Tsk - 34.1 # Sinal da pele °C
39 # Verificação do sinal da Pele
40     if S_sk<0.:
41         colds = -S_sk
42         warms = 0.0
43     elif S_sk>=0.:
44         colds = 0.0
45         warms = S_sk
46 # Verificação do Núcleo
47     if S_cr<0.:
48         coldc = -S_cr
49         warmc = 0.0
50     elif S_cr>=0.:
51         coldc = 0.0 # Verificação |sinal de arrefecimento pelo core.
52         warmc = S_cr
53 # Ajuste da taxa metabólica devido aos tremores (Stolwijk e Hardy)
54     Rm = M + 19.4 * colds * coldc
55 # Determinação da:
56     stric=0.5*colds # Vasoconstrição
57     dilat=75.*warmc # Vasodilatação
58 # Controle do fluxo sanguíneo da pele
59     Skbfn = 6.3 # Quando S_sk e S_cr são iguais a 0
60     Skbf = (Skbfn + dilat)/(1. + stric) # litros/h.m2

```

Figura 5.7 – Código Sistema termorregulatórios ativo.

No modelo original, Gagge considerou a representação do corpo humano através de um cilindro dividindo em duas partes, sendo a pele representada por uma casca fina com a massa (msk), e o núcleo como o interior do corpo com a massa (mcr). A massa total desse “cilindro” representa o peso total do homem padrão, sendo (msk = 3.4 kg) e (mcr = 78.3 kg), a magnitude utilizado para o modelo foi a mesma de Dubois representado na equação (16) com valor de 2.0 m<sup>2</sup> para o modelo do autor, já para os cálculos apresentado no modelo em estudo nessa dissertação, os dados de entradas como o peso em Kg, e a altura em metros, são adaptados para qualquer indivíduo, demonstrados na Figura 5.8.

$$AD = 0.202m^{0.435} l^{0.725} \quad (16)$$

Onde

- AD é a área da superfície corporal, em m<sup>2</sup>;
- m é a massa corporal, em kg;
- l é a altura, em metros.

Fluxo líquido de calor da casca e dado pela equação (17), representado na “linha de código 60”.

$$Ssk = Kmin(Tcr - Tsk) + Cbl Vbl(Tcr - Tsk) - Esk \quad (18)$$

Onde

- Ssk é a taxa de armazenamento de calor na pele, em W/m<sup>2</sup>;
- Cbl é o calor específico do sangue, em W.h/kg.°C;
- Vbl é a taxa de fluxo sanguíneo na pele, em litros/h.m<sup>2</sup>;
- Kmin é a condutividade térmica mínima da pele, em W/m<sup>2</sup>.°C.

Fluxo líquido de calor do núcleo é dado pela equação (19), representado na “linha de código 62”.

$$Scr = (M - Eres - W) - Kmin(Tcr - Tsk) - Cbl Vbl(Tcr - Tsk) \quad (19)$$

Onde

- Scr é a taxa de armazenamento de calor no núcleo do corpo, em W/m<sup>2</sup>;
- M é a Produção de calor metabólico, em W/m<sup>2</sup>;
- W é a taxa de trabalho realizado, em W/m<sup>2</sup>.

```

56 # Dubois
57 Adu = .202 * Pkg**.425 * Alt**.725 m2
58 Esk = Pwet * Emax
59 # armazenamento de calor na pele
60 Hfsk = (Tcr - Tsk) * (5.28 + 1.163 * Skbf) - DRY - Esk
61 # armazenamento de calor núcleo
62 Hfcr = Rm - (Tcr - Tsk) * (5.28 + 1.163 + Skbf) - CRES - ERES - WK
63 T_sk = (Hfsk * Adu)/(C_sk)
64 # Taxa de variação de temperatura para pele
65 T_cr = (Hfcr * Adu)/(C_cr)
66 Tcrn = Tcr + (T_cr * t)
67 Tskp = Tsk + (T_sk * t)

```

Figura 5.8 – Código Determinação do fluxo sanguíneo para Tsk e Tcr.

Nessa parte da modelação, os coeficientes de transferências de calor estarão envolvidos nos termos relacionados com a troca de calor na superfície da pele e com o meio ambiente, envolvendo o aumento da taxa metabólica em relação à atividade que esta sendo desenvolvida (Gagge, 1972). As condições que o modelo estabelece para a molhagem cutânea da pele, além da definição de ( $E_{res}$ ) citado na equação (8), inclui as condições para a taxa de secreção de suor ( $M_{rsw} < 60M$ ), fazendo com que a temperatura da pele sofra mudanças localmente na produção de suor. Assim, a perda de calor evaporativo pode ser dado pelo calor da água vaporizada que se difunde através da camada da pele ( $E_{diff}$ ), e o calor do suor vaporizado necessário para a regularização da temperatura

corporal ( $E_{rsw}$ ) depende da exposição ao calor radiante e de sua variação da diminuição da  $T_{sk}$  a partir de 34.1 °C (Nishi, Y. Gagge, 1973).

Outro fator a se considerar é a perda máxima de calor evaporativo na superfície do corpo ( $E_{max}$ ), sendo uma medida direta do poder evaporativo para o ambiente, ou o suor acumulado na superfície do corpo (ASHRAE Handbook, 1997). A fração de pele húmida é a razão entre a perda de calor evaporativa real e a perda de calor evaporativa máxima possível, sendo ( $E_{max}$ ) equivalente às condições de uma pele completamente húmida com  $w = 1$  (Parsons, 2010). Logo, o fluxo máximo de calor evaporativo na interface da pele é aquele que pode ser atingido no caso hipotético de a pele estar completamente molhada (ISO 7933, 1987). Na ausência de molhagem cutânea, ou quando ( $E_{rsw} - E_{max} = 0$ ) admitisse que o valores de evaporação seja, ( $E_{rsw} = E_{max} = E_{diff} = P_{rsw} = 0$ ), conforme o passo (6b) do fluxograma na Figura 5.3.

A pressão de vapor de água saturada à temperatura da pele em Kpa, foi determinada pela (ISO 7933, 1987), representada pela equação (20).

$$P_{sk,s} = 0.6105^{17.27} \frac{T_{sk}}{T_{sk} + 273.3} \quad (20)$$

Perda máxima de calor por evaporação, em W/m<sup>2</sup> determinado por (Gagge, 1972).

$$E_{max} = k_{hc} [P_{sk,s} - \phi a P_a] F_{pcl} \quad (21)$$

Onde

- $K$  é a relação de Lewis igual a 2.2, em °C/mmHg ao nível do mar;
- $H_c$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção, em W/m<sup>2</sup>. °C;
- $P_{sk,s}$  é a pressão de vapor de água saturada à temperatura da pele, em Kpa;
- $F_{pcl}$  é o fator de eficiência da superfície da pele para a permeação da roupa para o ambiente, em N.D.

Perda total de calor por evaporação na superfície da pele é dada, em W/m<sup>2</sup> (Gagge, 1986).

$$E_{sk} = (0.06 + 0.94 W_{rsw}) E_{max} \quad (22)$$

A evaporação e molhagem cutânea são frequentemente calculados a partir da equação do balanço de calor em termos de umidificação necessária, Gagge (1986), quando  $S_{cr}$  representa um sinal frio (isto é,  $T_{cr} < 36.6$ ) e/ou quando  $S_{sk}$  representa um sinal quente (isto é,  $T_{sk} < 34.1$ ),



demonstrado na equação (14). As glândulas que produzem o suor regulador ( $M_{rsw}$ ) em g/(h)(m<sup>2</sup>) na superfície da pele, são ativadas pelo sinal central  $S_{cr}$ , e ambos pelo produto ( $S_{sk}$ ) e ( $S_{cr}$ ), ocorrendo a produção do suor, demonstrado na “linha de código 70”. A taxa de produção de suor pode ser escrita a partir das seguintes condições:

Em função da taxa metabólica,  $R_m > 60$

$$M_{rsw} = 250 \sum cr + 100 \left( \sum cr \sum sk \right) \quad (23)$$

ou

Em função da taxa metabólica,  $R_m < 60$ , na “linha de código 72”.

$$M_{rsw} = 100 + \left( \sum cr \sum sk \right) \quad (24)$$

Onde

- $R_m$  é a taxa metabólica aplicado na modelagem, em W/m<sup>2</sup>

Se há ausência da transpiração reguladora, a umidade da pele devido à difusão é de aproximadamente 0.06 para condições normais. Para valores grandes de  $E_{max}$ , ou exposições longas a baixas umidade, o valor pode cair para 0.02, uma vez que a desidratação das camadas externas da pele altera suas características difusivas (ASHRAE Handbook, 1997). Com a transpiração reguladora, o valor 0.06 se aplica apenas à parte da pele não coberta de suor sendo  $(1 - W_{rsw})$ , a perda de calor por difusão é dada pela equação (24), representado na “linha de código 79” e evaporação pela equação (25), na “linha de código 74” da Figura 5.9.

$$Edif = (1 - W_{rsw}) 0.06 E_{max} \quad (24)$$

$$E_{rsw} = 0.7 M_{rsw} [2(T_{sk} - 34.1)/3] \quad (25)$$

Onde

- 0,7 é o calor latente do suor, em W.h/g.

As equações de estado que esboçam as trocas de energia e as temperaturas do modelo em função do núcleo e da casca a qualquer momento, são dadas pelas Eqs. (10), (11), (12), (15) e (18). A partir das condições iniciais que descrevem a neutralidade térmica, é possível integrar as alterações na temperatura da pele e do núcleo e no suor causado pelo sistema de controle Eqs. (13), (14), (19), (21), (22) e (25) e prever todos os fatores fisiológicos de energia e temperatura após qualquer período de exposição a qualquer novo ambiente descrito por temperatura e umidade.

Dentro da condição apresentada no modelo, se  $E_{rsw} > 500$ , o valor de ( $W_{rsw}$ ) passa a ser atribuído de acordo com a equação (26), representado na “linha de código 76”.

$$W_{rsw} = E_{rsw} 2 / (0.7 * 100.) t \quad (26)$$

Onde

- $t$  é o tempo, em minutos.

```

68 # sistema de controle da sudção regulatória
69   if Rm < 60.:# at rest
70     MrsW = 100. * warmc * warms
71   else:
72     MrsW = 250. *warmc + 100. *warmc *warms
73 # efeito de Bullard Van Beaumont, modificado por Stolwijk
74   Ersw = .7 * MrsW * 2. **((Tsk - 34.1)/3.)
75   if Ersw > 500:
76     WrsW = (Ersw * 2./(.7*100.))* t
77     Psk = .6105 * exp(17.27 * Tsk/(Tsk + 237.3))
78     Emax = 2.2 * CHC * (Psk - (RH * Pa)) * Fcl
79     Pdif = (1. - WrsW) * .06
80     Prsw = Ersw/Emax
81     Pwet = .06 + .94 * WrsW
82     Edif = (Pwet * Emax) - Ersw
83     Edrip = (MrsW * .68) - ((WrsW * Emax)/.68)
84     Ev = ERES + Ersw +Edif
85   if Ersw-Emax >0.:
86     Edrip = ERES + Emax
87     Ev=ERES+Emax
88     Ersw=Emax
89     Edif=0.
90     Prsw=1.0
91     Pwet=1.
92   else:
93     Emax = 0.
94     Pwet = 0.

```

Figura 5.9 – Código Controle regulatório de sudção e evaporação.

### 5.3.4 Modelação do Isolamento do Vestuário

No oitavo passo da modelação, a fração da superfície da pele envolvida na troca de calor por radiação,  $A_r/AD_u$  em relação a área superficial da pele, é igual a 0.67 para um sujeito agachado, 0.70 para um sujeito sentado e 0.77 para um sujeito em pé, pois as características do estado em que o indivíduo encontra-se, altera a forma no dimensionamento do isolamento do vestuário conforme determinação da ISO 9920 (2006), em função da posição da angulação do sujeito em analogia com velocidade de caminhada, e o grau em função da direção do vento pode ser demonstrado nas equações (27) e (28). Quando a pessoa caminha de frente para o vento, a velocidade relativa do ar para a pessoa é simplesmente a soma das velocidades de caminhada e de ar. Com o vento atrás, a velocidade relativa do ar é o valor absoluto da diferença entre as velocidades de caminhada e de vento. Para todos os outros ângulos ( $0^\circ$  e  $90^\circ$ ), a velocidade relativa do ar pode ser calculada como demonstrado nas “linhas de código 97, 98, e 99”, da Figura 5.10.

Para velocidade do vento onde  $v_a < 0.7$  m/s.

$$v_w = 0.0052 (M - 58) \quad (27)$$

Para velocidade do vento onde  $v_a > 0.7$  m/s.

$$var = \sqrt{[v_w - v_a \cos(\alpha)]^2 + [v_a \sin(\alpha)]^2} \quad (28)$$

Onde

- $v_a$  é a velocidade absoluta da velocidade do vento, em m/s;
- $v_w$  é a velocidade de caminhada, em m/s;
- $\alpha$  é o ângulo entre a velocidade de passada e a velocidade do vento, em graus em ambas as direções.

A perda de calor por convecção é uma parte relevante da perda de calor do corpo humano, particularmente em climas equilibrados. Um aspecto importante da transferência de calor por convecção é influência da velocidade e dos movimentos do vento nos coeficientes de transferência de calor por convecção da camada de ar da superfície e da roupa (Malchaire et al., 2002). Com base no isolamento do vestuário, é necessário calcular um novo fator de convecção dinâmica. Essa troca dinâmica de calor por convecção ( $h_{cdyn}$ ), pode ser estimada como o maior valor de:

Convecção dinâmica para o vestuário,  $h_{cdyn} < 0.7$

$$h_{cdyn} = 3.5 + 5.2 var \quad (29)$$

ou

Convecção dinâmica para o vestuário,  $h_{cdyn} > 0.7$

$$h_{cdyn} = 8.7 var^{0.6} \quad (30)$$

### 5.3.5 Correção do Isolamento do Vestuário

As correções do vestuário não foram atribuídas nos modelos apresentados por Gagge (1972, 1986), todavia, as roupas desempenham um papel importante na termorregulação comportamental dos seres humanos. Para modelar as roupas com mais detalhes e adaptar o modelo, o isolamento intrínseco da roupa  $I_{cl}$ , o fator de área da roupa  $f_{cl}$  apresentado nas equações (5) e (6) e o índice à resistência evaporativa dinâmica da roupa  $R_{tdyn}$ , é fortemente influenciado pela permeabilidade

à pressão de vapor do material, que pode ser definida pelo índice de permeabilidade à umidade estática definida no modelo como (0.38) com auxílio a ISO 7933 (1987).

Esse índice não reflete as reais propriedades isolantes das roupas, mas fornecem características de uma camada uniforme (imaginária) de roupas que cobre todo o corpo (Fiala, 1998). Como equações de previsão demonstrada entre as “linhas de código 122 à 151”, serão aplicadas para incluir padrões em roupas de proteção para ajudar o usuário a determinar ou valorizar o isolamento da roupa na vida real em função da correção do isolamento (Havenith & Nilsson, 2004).

Dessa maneira, buscou-se incorporar o efeito do vento e movimentos no isolamento das roupas. No entanto, o (Fcl) apenas incorpora os efeitos do vento na camada superficial do ar ( $h_c + h_r$ ) e não na camada interior da roupa. O objetivo era adicionar os efeitos da velocidade efetiva do ar no isolamento da roupa (Icl) e implementar suas correções conforme as “linhas de código 126, 129, 131, 134, 136, 138 e 140”. Segundo a ISO 9920 (2006), Malchaire (2001), e Parsons (2010), diversas equações de correção foram fundamentadas em experimentações humanas e medições em manequins, os dados empíricos de dois laboratórios foram reunidos e analisados juntos. De acordo com Parsons (2003), as seguintes equações foram desenvolvidas para prever os efeitos da velocidade efetiva do vento na camada de ar da superfície e no isolamento da roupa:

$$CORRIa = EXP^{(0.047 var^2 - var + 0.117 vw^2 - 0.378 vw)} \quad (31)$$

$$CORRIT = EXP^{(0.066 var^2 - 0.398 var + 0.094 vw^2 - 0.378 vw)} \quad (32)$$

Onde

- $var$  é a velocidade relativa do ar ( $< 3$  m/s) e a velocidade de caminhada  $Vw$  ( $< 1,2$  m/s)

Se o movimento não consistisse em caminhar, seria utilizado uma alternativa para o cálculo da velocidade do ar. Este, é incorporado para simular os efeitos do movimento do ar conforme a equação (27). Isso substitui  $var$  nas equações e  $vw$  é definido como 0. O novo modelo de “tensão de calor prevista” exige o isolamento estático de roupas como uma variável de entrada. No modelo, o isolamento da roupa é tratado da seguinte maneira:

- Com base nos valores da velocidade relativa do vento e na intensidade de trabalho fornecida pelo usuário, são calculados os fatores de redução do isolamento da camada de ar superficial e da roupa (CORRIa e CORRIT );
- Para indivíduo nus,  $CORR_{tot} = CORRIa$

- Quando  $I_{cl} > 0.6 \text{ clo}$   $CORR_{tot} = CORRI_a$

Para  $0.2 < I_{cl} < 0.6 \text{ clo}$ .

$$CORR_{tot} = (0.6 - I_{cl}) CORRI_a + I_{cl} CORRI_t \quad (33)$$

Esse fator de correção é usado pelo modelo para calcular o isolamento dinâmico da roupa  $I_{totdyn}$ :

$$IT_{din} = CORR_{tot} \times IT_{static} \quad (34)$$

Esses valores corrigidos para o isolamento total são usados para calcular a perda de calor por convecção do sujeito. Durante a exposição ao calor, a perda de calor do corpo humano depende fortemente da perda de calor por evaporação da manutenção do equilíbrio térmico, que por si só é uma função das características da roupa. Entretanto, quando há roupas refletivas estão sendo usadas, deve ser corrigida por um fator  $F_{cl,R}$  ISO 7933 (1987), dado através da equação (34), representado pela “linha de código 117” da Figura 5.10.

$$F_{cl,R} = (1 - A_p)0,97 + A_p \times F_r \quad (35)$$

Onde

- $A_p$  é a fração da superfície do corpo coberta pela roupa refletiva, N.D;
- $F_r$  é emissividade do corpo reflexivo da roupa, N.D.

A troca de calor radiativo,  $hr$ , pode ser estimada usando a equação (35).

$$hr = 5.67 \times 10^{-8} \varepsilon \frac{A_r}{ADu} [(T_{cl} + 273)^4 - \frac{(T_r + 273)^4}{T_{cl} - T_r}] \quad (36)$$

Onde

- $\frac{A_r}{ADu}$  é a Fração da superfície da pele envolvida nas trocas por radiação, igual a 0,67 para pessoas agachadas, 0,70 para pessoas sentadas e 0,77 para pessoas em pé;
- $\varepsilon$  é a emissividade da pele, igual a 0,97;
- $T_{cl}$  é a temperatura na superfície da roupa, em °C.

A temperatura superficial das roupas ( $T_{cl}$ ) é proporcionada através da equação (36), resolvida por interação, começando com  $t_{cl} = 0,0$  e avaliando repetidamente novos valores para  $h_r$  e  $T_{cl}$ , conforme a “linha de código 145 e 146”, até que a diferença entre dois valores consecutivos de  $T_{cl}$  seja  $<$  que 0,01 determinado no modelo, “linha de código 148”.

$$T_{cl} = 35.7 - 0.028 (M - W) - I_{cl} \{3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] + \dots f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a)\} \quad (37)$$

```

96 # Convecção Dinâmica Vestuário
97 Vw = .0052 * (Rm - 58)
98 alpha = 0 #angulo entre a velocidade de marcha e o ar.
99 Var = ((Vw - va * cos(alpha))**2 + (va * sin(alpha))**2)**0.5
100 if Var <= (0.7):
101     Hcdyn = 3.5 + 5.2 * Var
102 else:
103     Hcdyn = 8.7 * Var**.6
104 if CHC > Hcdyn:
105     Hcdyn = CHC
106 int(input('Digite a posição que você está: 1 agachado, 2 sentado ou 3 em pé'))
107 if posicao == 1:
108     posicao = .67
109 elif posicao == 2:
110     posicao = .70
111 elif posicao == 3:
112     posicao = .77
113 AuxR = Cu * posicao
114 FclR = 2
115 int(input('Usa algum tipo de roupa térmica ou refletiva de calor?, 1 para sim, 2 para não:'))
116 if FclR == 1:
117     FclR = (1 - .54) * .97 + .54 * 0.42 # Ap = .54 Fr = 0,42 ISO 9920
118 elif FclR == 2:
119     FclR = 0
120

```

Figura 5.10 – Código atribuição do posicionamento para determinação do tipo de convecção para o vestuário.

```

122 # Determinação do isolamento dinâmico para a característica do vestuário
123 Iast = .7 # determinação da ISO 9920 \\clo
124 if Icl <= .6:
125 # Correção do Vestuário ISO 7933 - ISO 9920 \\ m².K/W
126 Corrtot = np.exp(.043 - .398 * Var + .066 * Var**2 - .378 * Vw * .094 * Vw**2)
127 else:
128 Icl >= .6
129 Corrtot = np.exp(-0.472 * Var * .047 * Var**2 - .342 * Vw * .177 * Vw**2)
130 if clo <= 0.:
131 Corria = Corrtot
132 else:
133 clo > 0.
134 Corria = np.exp(.047 * Var**2 - .472 * Var + .117 * Vw**2 - .378 * Vw)
135 if Icl > .6:
136 Corr_IT = Corrtot
137 else:
138 Corr_IT = 1.044 * np.exp(.066 * Var**2 - .398 * Var + .094 * Vw**2 - Vw)
139 if Icl < .2 and clo < .6:
140 Corrtot = (.6 - Icl) * Corria + Icl * Corr_IT
141 Iadyn = Corria * Iast
142 Itotst = Icl + (Iast/fcl)
143 Itotdyn = Corrtot * Itotst
144 Lcldyn = Itotdyn - (Iadyn/fcl)
145 CHR_r = FclR * AuxR * ((Tcl_0 + 273.15)**4)/(Tcl_0 - Tr)
146 Tcl_1 = (fcl * (Hcdyn * Ta + CHR_r * Tr) + Tsk/Lcldyn)/(fcl*(Hcdyn + CHR_r) + 1/Lcldyn)
147
148 while abs(Tcl_0 - Tcl_1) > .001:
149 CHR = FclR * AuxR * ((Tcl_0 + 273.15)**4)/(Tcl_0 - Tr)
150 Tcl_0 = (Tcl_0 + Tcl_1)/2
151 Tcl=Tcl_0

```

Figura 5.11 – Código adaptação de Isolamento dinâmico para o vestuário.

### 5.3.6 Cálculo da Temperatura Efetiva (ET\*)

A temperatura efetiva  $ET^*$  é provavelmente o índice ambiental mais comum e possui a maior variedade de aplicações. Ele combina temperatura e umidade em um único índice, portanto, dois ambientes com o mesmo  $ET^*$  devem evocar a mesma resposta térmica, mesmo que tenham temperaturas e umidade diferentes e as mesmas velocidades do ar. A  $ET^*$ , é definida como a temperatura do ar ( $T_a$ ) da condição de referência de três parâmetros ( $T_r$ ,  $T_a$  e  $P_a$ ) em um único índice (Nishi & Gagge, 1977). A umidade da pele  $Edif$ , e o índice de pressão na superfície da pele  $Pssk$ , “linha de código 5”, e devem ser especificados e constantes para uma determinada linha de temperatura efetiva. Como a inclinação de uma linha  $ET^*$  constante depende da umidade da pele e da permeabilidade à umidade da roupa, podendo depender da roupa da pessoa e de sua atividade (ASHRAE Handbook, 1997), causando o mesmo retorno do modelo que a condição real. Para aplicar esta definição, a condição de referência e a resposta do modelo devem ser identificadas (Fiala, P. Bröde, 2009).

O deslocamento para a temperatura do ar ( $T_a$ ) é encontrado comparando a resposta real do modelo com a resposta nas condições de referência, pode-se deduzir da definição que  $ET^*$  é igual à temperatura do ar em condições de referência, com isso, executar explicitamente essas comparações, a resposta do modelo dinâmico deve ser condensada em uma representação

unidimensional, que pode ser denominada como índice de resposta térmica (Nishi & Gagge, 1977). A nova temperatura efetiva  $ET^*$ , apresentado de acordo com a equação (38), é baseada no balanço energético humano e no modelo de dois nós Gagge (1972), em que a temperatura radiante média igual à temperatura do ar e uma umidade relativa constante de 50% que resulta na mesma perda total de calor da pele (Esk) que no ambiente real (Honjo, 2009), demonstrado na “linha de código 10 da Figura 5.12”.

$$ET = T_o + win LR (Pa - 0.5 PET, s) \quad (38)$$

Onde

- $PET^*, s$  é a Pressão de vapor saturado a  $ET^*$ , em kPa;
- $T_o$  é a temperatura operativa, em °C;
- $Win$  é o índice de permeabilidade, N.D;
- $LR$  é a Avaliação da transferência de calor por evaporação na superfície da pele, em %.

$LR$  é referido como a “razão de Lewis” e, em condições internas típicas, é igual a aproximadamente 16,5 °C/kPa. A relação de Lewis se aplica aos coeficientes de convecção de superfície. Os coeficientes de transferência de calor que incluem os efeitos das camadas de isolamento e/ou radiação, e também pode ser definido na equação (39), como a capacidade de fluxo de calor evaporativa real entre a pele e o ambiente (ASHRAE Handbook, 1997). Calculada na “linha de código 7”.

$$LR = \frac{\left(\frac{D}{K}\right)^{0.67}}{(\rho Cp)^{0.33}} \quad (39)$$

Onde

- $D$  é a proporção de todas as propriedades convectivas da nova difusividade de massa, N.D;
- $K$  é a maior condutividade térmica,  $W/m^2.K$ ;
- $\rho$  é a densidade mais baixa, em  $Kg/m^3$ ;
- $Cp$  é o calor específico mais alto, em  $cal/Kg\ ^\circ C$ .



```

1 # Cálculo temperatura efetiva ET*
2 To = Ta+Tr/h
3 fcle = Fcl
4 Cloe = clo
5 Pssk = .6105 * np.exp(17.27 * Tsk/(Tsk + 237.3))
6 # Avaliação da transferência de calor por evaporação na superfície da pele
7 lr = 15.1512*((Tsk+273.15)/273.15)
8 fpcl = 1./(1.+(.155/Icl)*CHC*Cloe)
9 # Cálculo da perda de calor na pele HSK
10 Hsk = CHC*fcle*(Tsk-To)+Pwet*lr*CHC*fpcl*(Pssk-Pa)
11 ET =Tsk-Hsk/(h*fcle)
12 svp_ET = .6105 * np.exp(17.27 * ET/(ET + 237.3))
13 err_ET = Hsk-h*fcle*(Tsk-ET)-Pwet*lr*CHC*fpcl*(Pssk-svp_ET)/2
14
15 while (err_ET> -0.01 and err_ET < 0.01):
16     svp_ET = .6105 * np.exp(17.27 * ET/(ET + 237.3))
17 # Aproximação baixa para ET*, equação de equilíbrio resolvida por iteração.
18     err_ET = Hsk-h*fcle*(Tsk-ET)-Pwet*lr*CHC*fpcl*(Pssk-svp_ET)/2
19     ET = ET+ 0.1

```

Figura 5.12 – Código determinação da temperatura efetiva ET\*

### 5.3.7 Cálculo da Nova Temperatura Efetiva Padrão (SET\*)

De acordo com (Gagge, 1986) e a implementação da índice ET \*, surgiu o novo padrão de temperatura efetiva (SET \*), que é usado habitualmente como índice de conforto interno e externo (Watanabe et al., 2014). Os referidos autores compararam os vários índices de conforto térmico, e concluíram que o SET \* é mais adequado na avaliação do conforto ao ar livre. De acordo com Pickup (2000) o índice SET \* pode ser usado como um índice para o ambiente externo.

Para adaptar o SET \* a situações externas, é necessário delinear o ambiente radiante ao ar livre em termos de temperatura radiante média. A carga de calor recebida pelo corpo humano em pleno sol pode ser idêntico ou superior à taxa metabólica de repouso (Nielsen, 1990). Quando a radiação atinge com o corpo vestido, parte é absorvida, parte é reflexionada e parte é transportada para a camada da pele. A radiação absorvida pela camada de vestuário aumenta a temperatura de roupa (Lotens & Pieters, 1995). A radiação de ondas longas refletida pela camada de roupas é direcionada para o ambiente externo e a transmitida atravessa o vestuário e passa para a superfície da pele.

A radiação que atinge a camada da pele pode ser refletida ou absorvida. A roupa reduz a quantidade de transferência de calor radiante entre o corpo e o ambiente, com roupas de alto isolamento, proporcionando a maior resistência. Em condições de vento, a pele absorve menos radiação solar devido à aceleração da eliminação do calor da camada interior de roupa por convecção, como resultado do reduzido isolamento da camada de ar (Pickup & Dear, 2000).

De acordo com Nishi (1977), as variáveis para a escala SET \* na faixa de 10 °C a 40 °C, entre os valores SET \* de 23 °C a 41 °C, SET \* e REGSW são essencialmente lineares com Tb durante o equilíbrio térmico (S = 0), e apresentado na equação (35).

$$SET = 34.95 Tb - 1247.6 \quad (40)$$

Abaixo de 23 °C, a relação (SET \* -Tb) depende cada vez mais do tempo de exposição e o equilíbrio térmico se torna menos provável. Para uma exposição de 1 h.

$$SET = 23.0 - 6.13 (36.4 - Tb)^{0.7} \quad (41)$$

Acima de 41 °C, a regulação por evaporação começa a cair, após uma exposição de 1 h e dada pela equação (37).

$$SET = 41.0 + 5.58 (Tb - 36.9)^{0.87} \quad (42)$$

Onde

- Tb é a temperatura média do corpo, em °C.

Para uma temperatura SET \* abaixo de 18 °C quando (Tsk e Tcr) estão abaixo de 34,1 e 36,6, respectivamente, os tremores podem ocorrer e são proporcionais ao fator 19 (Tsk - 34,1) (Tcr - 36,6). As prováveis escalas sensoriais e fisiológicas, associadas a SET\* ou ET \* nas condições do nível do mar, são dadas para a atividade (1,1met) e 0,6 clo. Analiticamente, o valor de SET é, por definição, a solução para SET \* na seguinte equação do balanço térmico (37).

$$SET = Hsk - h's(Tsk - SET) - w h'es (Pssk - 0.5 Ps, set) \quad (43)$$

Onde

- h's e h'es são os coeficientes evaporativo efetivo, N.D.

```

22 # Cálculo da SET* - Temperatura efetiva padrão
23 # padronização do ambiente
24 chrs = CHR
25 # Coeficiente de transf. de convecção padrão (caminhando levemente/ar parado)
26 act =174.6 # \\ w/m2
27 chcs = 5.66*(act/58.2-.85)**.39
28 # Relação MET-CLOS padrão fornece SET * = 24 °C quando PMV = 0
29 rn = Rm - WK
30 clos = 1.3264/(rn/58.15+.7383)-.0953
31 kclos = .25
32 facls = 1.+kclos*clos
33 ctcs = CHR+chcs
34 cloes = clos-(facls-1.)/(.155*facls*ctcs)
35 fcles = 1./(1+.155*ctcs*cloes)
36 fpcls = 1./(1+(.155/.45)*chcs*cloes)
37
38 SET = Tsk-Hsk/ctcs*fcles
39 svp_SET = .6105 * np.exp(17.27 * SET/(SET + 237.3))
40 err_SET = Hsk-ctcs*fcles*(Tsk-SET)-Pwet*lr*chcs*fpcls*Pssk-.5*svp_SET
41 while (err_SET > -0.001 and err_SET < 0.00):
42     svp_SET = .6105 * np.exp(17.27 * SET/(SET + 237.3))
43     err_SET = Hsk-ctcs*fcles*(Tsk-SET)-Pwet*lr*chcs*fpcls*Pssk-.5*svp_SET
44     SET = SET+ 0.1
45
46 return [SET, ET, Tskp, Tcrn]
47

```

Figura 5.13 – Código Determinação da Temperatura efetiva padrão SET\*



### **PARTE 3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Na fase de testes e apropriação do modelo apresentado nessa dissertação, procurou-se entender o comportamento e as respostas fisiológicas do homem, como já dito anteriormente, os dados utilizados por Gagge (1972, 1986) e StolWijk (1971), serviram como parâmetros de fiabilidade para a modelagem da termorregulação. Os parâmetros de entrada para os testes serviram de base para uma suposta análise em situação real cotidiana e simulada, que será discutida mais a frente.



## 5.4 Resultados e Discussões

Os resultados apresentados possuem algumas características familiares com ambos os modelos dos autores, pois partem do homem padrão com 87 Kg e 1,77 metros de altura, apesar da modelagem se adaptar a qualquer sujeito individual, na fase de teste, procurou-se preservar os dados de entradas originais de Gagge e StolWijk como a taxa metabólica em situação de repouso, a velocidade do vento com variação de 0,0 m/s a 1,5 m/s, a umidade relativa ótima de 50%, as variações da temperatura do ar, temperatura do globo e a temperatura radiante, que tiveram uma variação de 15 °C a 40 °C, equiparada indiretamente com a variação da temperatura do ambiente para as devidas condições climáticas, além dos dados fisiológicos para a temperatura da pele e a temperatura interna do corpo.

Inicialmente a taxa metabólica utilizada corresponde a uma atividade em repouso, com o valor fixado de 58,2 W/m<sup>2</sup>, a temperatura do ar utilizada corresponde ao clima do sudeste do Brasil com variação da velocidade do vento entre 0,5 m/s à 1,30 m/s ao decorrer do tempo, a área é considerada como clima tropical e/ou semiárido em determinadas regiões com diversas altitudes. Para essa análise foi utilizada a Tabela 11.1 do Anexo B, com o intuito de representar o modelo em situação dinâmica real. Foi atribuída na modelagem conforme a “linha de código 106” a posição do indivíduo, que poderia ter a atribuição do valor de entrada no modelo como agachado (1), sentado (2) ou em pé (3). Além da consideração da velocidade de marcha e tipo de vestuário, com por exemplo a utilização de roupas térmica ou refletivas de calor, atribuído como o valor de entrada para o dimensionamento, o valor (1) foi atribuído para a utilização desse tipo de roupa, e (2) para a não utilização. Para a análise inicial da modelagem aplicou-se posição (3), com o valor atribuído igual a 0,77 conforme a instrução da ISO 9920 (2006), que representa a fração da superfície da pele envolvida na troca de calor por radiação.

Objetivando o comportamento do modelo original e relacionando com os dados de entrada medido pela estação microclimática em ambiente exterior, o modelo comportou-se de forma dinâmica e com respostas diretas como os modelos original de Gagge (1972, 1986), até aproximadamente 300 minutos de medição. De acordo com a Figura 5.14, os resultados apresentados no período de 600 minutos, correspondem a uma medição com leitura dos dados a cada 5 minutos em ambiente exterior, as linhas superiores e inferiores aos picos dos gráficos em vermelho, representam os limites máximo e mínimo para a temperatura média da pele em todos os pontos na superfície cutânea.

Os índices de saída da modelagem analisados correspondem a temperatura média do corpo (T<sub>cr</sub>), a Temperatura média da Pele (T<sub>sk</sub>), a Temperatura Efetiva (ET), e a Temperatura Efetiva Padrão (SET). As trocas de calor com ambiente influenciam diretamente o comportamento do modelo em questão, pois o balanço térmico é afetado com os parâmetros ambientais apresentados em ambientes exterior e transitórios, principalmente pela ação da velocidade do vento (V<sub>a</sub>), a Radiação Solar Global (GR) e a interferência com a temperatura do ar, pois agrava a molhagem

cutânea do indivíduo em ambientes quentes, apesar do modelo ter um bom comportamento da (Tcr, SET e ET) durante todo o período de medição.

De acordo com as análises demonstradas nos pontos de 300 minutos e ao final da medição aos 550 minutos, o valor da Tsk ultrapassa o valor estabelecido pela norma em picos, e logo em seguida restabelece para uma possível tentativa de readaptação da temperatura e equilíbrio térmico, o modelo foi programado para realizar pequenos passos de cálculos para corrigir a dissipação de calor. O maior pico do gráfico chega a uma temperatura média da pele de 58,34 °C e logo reduz para um valor dentro do padrão estabelecido chegando a 32,55 °C para a Tsk, que de acordo com a ISO 9886 (1987), em ambientes considerados quentes, a Tsk pode-se chegar até a temperatura máxima local de 43 °C. Isso ocorre pela integração numérica entre a Tsk e a Tcr, ou seja, a cada 1,0 °C de subida no gradiente da temperatura, multiplicado diretamente por um intervalo de tempo muito grande, a Tsk é somada no maior pico e com uma tentativa de arrefecimento desse ponto, podendo ser ligado diretamente a molhagem cutânea.

A temperatura Efetiva ET\*, se conservou dentro dos parâmetros estabelecidos, acompanhando a temperatura e a umidade relativa do ar com o valor médio de 54,53 %, o baixo nível de produção de suor regulatório interfere também nos picos, pois esta ligado diretamente ao nível de umidade na pele Ediff, e ao nível de pressão exercida sobre a pele Pssk. É notável a variação dos índices ET\* sobre a temperatura da pele, isso ocorre porque o modelo busca uma forma de armazenar os resultados estabelecidos nos passos de cálculos anteriores e instituídos com os ciclo de cálculos local, principalmente nos intervalos onde há um superaquecimento identificado no instante da análise do modelo sobre a influência do clima, as variáveis ambientais como a velocidade do vento (Va), algumas alterações climatéricas por conta de possíveis intempéries, como por exemplo, no ciclo anterior o modelo captou como dados de entrada de (Va), um valor de 1,3 m/s, e durante a captação real para a geração do resultado no período de 5 minutos, foi analisado com um valor de entrada de 4,5 m/s, e no ciclo posterior um dado de entrada de 0,3 m/s, durante a próxima interação de ciclo de cálculo na medição.

Assim, vale para a mesma análise da SET\*, principalmente para analisar o conforto térmico em situações exteriores que interligam a temperatura radiante média, a carga térmica solar recebida e a atividade realizada. A interferência do vestuário e o calor absorvido pelo corpo através da camada da pele, e a absorção do calor que é transmitido pela radiação solar sobre o vestuário com uma alta capacidade térmica da roupa auxiliando no conforto térmico para o indivíduo, portanto, o comportamento da SET\* dentro das características em análise, a temperatura efetiva padrão de acordo com Gagge (1967), equivale a temperatura do ar em condição de referência para o indivíduo, que reporta o equilíbrio térmico dentro da temperatura estabelecida e o tipo de sinal que foi atribuído entre a Tsk e Tcr durante o armazenamento da variável, para determinação do ciclo que abrange o recebimento ou a transferência de calor para o ambiente de forma constante e satisfatória, reportando a mesma fração de suor regulatório para pele em função das condições do ambiente.



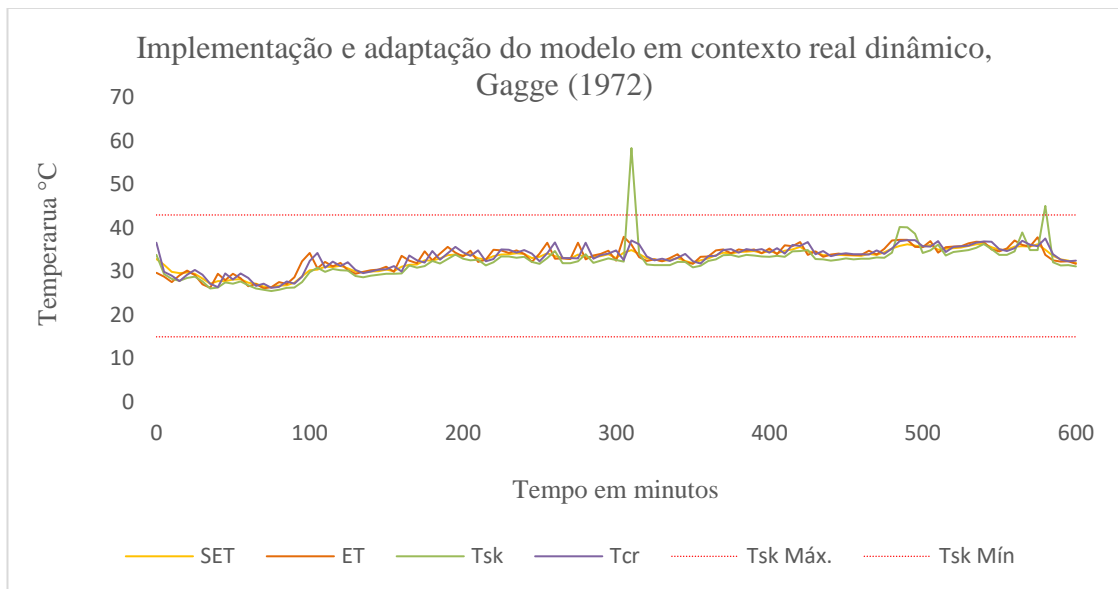


Figura 5.14 Adaptação do modelo com os dados de entradas iniciais dos autores.

#### 5.4.1 Ambiente Quente

Quando se trata de ambientes quentes, a sudorese máxima, costuma ser demasiadamente grande, principalmente a indivíduos expostos a radiação solar. Para testar o modelo a essa situação, foi acrescentado nos passos de cálculos uma nova interação para a perda evaporativa máxima na superfície da pele ( $E_{rsw}$ ), onde essa, relaciona o aquecimento ou arrefecimento da  $T_{sk}$  em função da  $T_{cr}$ , pois o valor do sinal da pele ( $S_{sk}$ ), é fixado com uma temperatura inicial de  $34,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , e a diferença entre a temperatura medida no intervalo dos picos produz uma taxa de secreção de suor ( $M_{rsw}$ ), conforme a equação (12), e a molhagem da pele devido ao suor regulatório ( $W_{rsw}$ ), que é acrescido pelo o aumento da taxa metabólica em função das atividades realizadas para o armazenamento total de calor na pele ( $S_{sk}$ ), sendo descrito pela equação (18). A Figura 5.15, representa uma atividade moderada leve, com  $80\text{ W/m}^2$ , o isolamento térmico utilizado foi de  $0,6\text{ clo}$  e os parâmetros ambientais foram os mesmos utilizados para a análise da Figura 5.14, o comportamento do modelo a essa situação manteve-se apto dentro dos limites padrões, onde levados em consideração a  $T_{sk}$  e a  $T_{cr}$  com o valor mínimo de  $36,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , podendo chegar com um acréscimo de  $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  a cada uma hora de exposição, ou o na totalidade máxima de  $38,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , conforme a instrução da ISO 9886 (1987). Nessa fase, Gagge (1986) implementou no modelo original um ajuste para corrigir a perda de calor metabólico conforme a equação (14), apesar desse ajuste ter uma finalidade melhor a vasoconstrição e ambientes mais frescos por conta da produção involuntária de tremores realizado pelo corpo humano, e a capacidade de se termorregular naturalmente, com uma tentativa de melhorar o comportamento do modelo, foi implementado no código uma redução da interação do tempo a cada 10 s, que por decisão do ciclo local, determinar o sinal da pele e do núcleo ( $S_{sk}$  e  $S_{cr}$ ), fazendo com que haja uma resposta mais rápida de recuperação no pico que pode ir ao infinito em forma de *Loop*, principalmente nos pontos de elevações mais altos dos picos à aproximadamente 300 minutos, 500 minutos e 600 minutos de

medição, fazendo com que a sudação máxima iguale a capacidade máxima de absorção de calor e depois dessa compensação é passado para a interação seguinte com um ótimo comportamento.

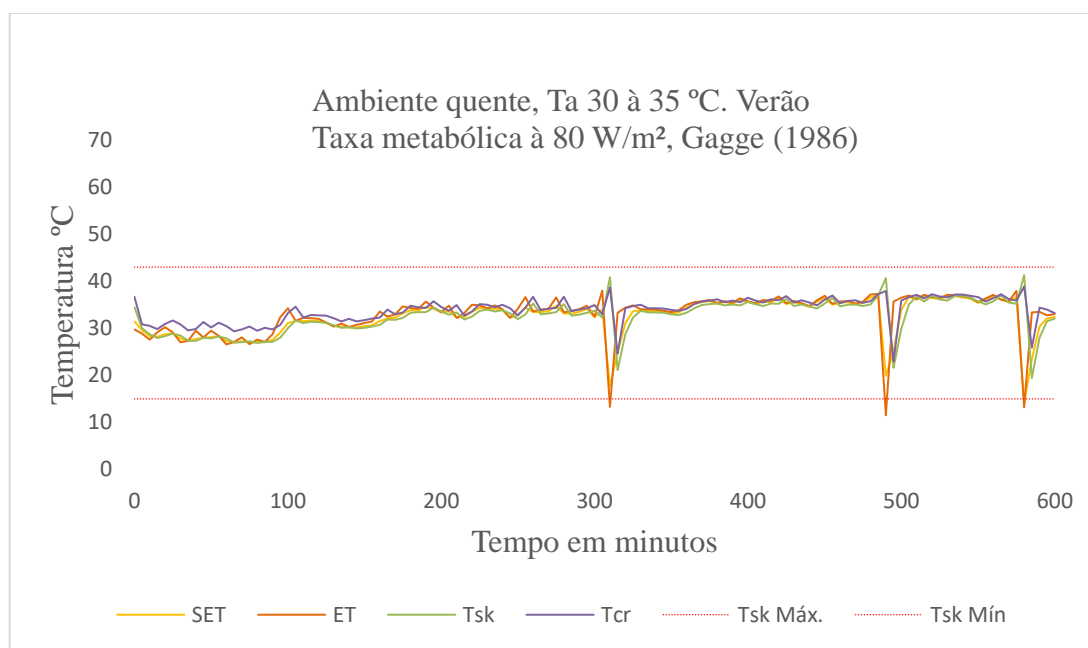


Figura 5.15 Verificação do Modelo para ambientes quentes

Entretanto, a  $ET^*$  apesar de se comportar de forma significativa em relação as variáveis em análises ( $T_{cr}$ ,  $T_{sk}$  e  $SET^*$ ), teve um declive considerável em três picos, sendo o primeiro pico durante o instante de 310 minutos, chegando a um valor mínimo de temperatura efetiva de 13,32 °C e um valor máximo de  $T_{sk}$  de 40,85 °C, no segundo pico aproximadamente aos 490 minutos tendo um valor mínimo de 15,0 °C e sua máxima em relação a  $T_{sk}$  de 37,85 °C, e no terceiro pico à 580 minutos manteve-se igual ao segundo pico, como já mencionado na apresentação da figura 5.14, o aumento prolongado da exposição do indivíduo em situações dinâmicas, mais o acréscimo da utilização do vestuário para ajudar a regularização da temperatura da pele ou por motivo de aquecimento local durante o estante dos picos, levando a ocorre um regulação da evaporação cutânea, como a  $ET^*$  é fundamentada e baseada pelo balanço térmico em situação de referência da temperatura do ar e é dependente da umidade da pele e da permeabilidade da roupa, fazendo com que os três picos elevasse aos extremos e dentro do mesmo clico de 5 minutos regressasse com um diferencial de temperatura em relação a  $T_{sk}$  de  $\pm 16,0$  °C.

A sudação máxima produzida em ambientes quentes, quando atinge o valor limite metabólico estipulado pelo tipo de vestuário em função do alto isolamento nominal do vestuário  $I_{cl}$ , e a transferência do suor regulatório do corpo para a pele, se faz com que a roupa fique molhada, permitindo o agravamento do arrefecimento da pele produzido por uma taxa de suor. O isolamento muda com as questões das correções do vestuário, pois depende diretamente do tipo de atividade que o sujeito está realizando. A velocidade do vento em relação ao ângulo, que pode ser 0° à 90°, ou seja, na vertical ou horizontal, a velocidade de passada, o espaço entre a camada da pele e o vestuário, e o fator de redução para a troca de calor por radiação no uso da roupa.

A Figura 5.16, transcreve o comportamento do modelo em relação ao vestuário e o ajuste da taxa metabólica, a Tsk\_1 e Tcr\_1 descreve a análise do indivíduo com a correção do vestuário e ajuste metabólico, já a análise Tsk e Tcr foram realizadas sem a correção do vestuário e sem o ajuste da taxa metabólica. Apesar da atividade realizada e o isolamento do vestuário não serem tão altos, o que se pode observar em comparação das análises da temperatura média da pele Tsk\_1 e Tsk a 580 minutos, são as discrepâncias dos picos no mesmo instantes, pois há um superaquecimento que eleva a temperatura nas alturas.

O isolamento do vestuário integra o tempo de resposta do modelo, pela capacidade de corrigir os índices dinâmicos em relação a troca de calor por convecção forçada, podendo ajudar na dissipação de calor ou agravamento por conta da alta produção de suor regulatório, pois além de ajustar a correção da interação de resposta do modelo, de alguma forma ajudou na recuperação da temperatura da pele e ajustou a oscilação, dando tempo para o modelo compensar o ciclo de arrefecimento, outros autores realizam a integração de cálculo com passos reduzidos, isso favorece a integração do passo de cálculo, melhorando o mecanismo de decisão que gera as variações representadas no gráfico, porém limita o comportamento e análise da termorregulação em um espaço de tempo reduzido geralmente em uma hora, com dados médios e valores padronizados que de alguma forma representa valores de pequenas alterações representáveis.

Já o comportamento da temperatura interna do corpo Tcr\_1 e Tcr se manteve dentro dos padrões estabelecidos pela norma, sofrendo algumas alterações em picos, principalmente nos 320 minutos e 490 minutos. A temperatura interna do corpo assim como o armazenamento de calor no núcleo do corpo Hfcr, precisam manter-se constantemente alinhado com o fluxo sanguíneo Cbl, a diferença entre a Tcr e Tsk deve-se à perda de calor evaporativo pela respiração Eres.

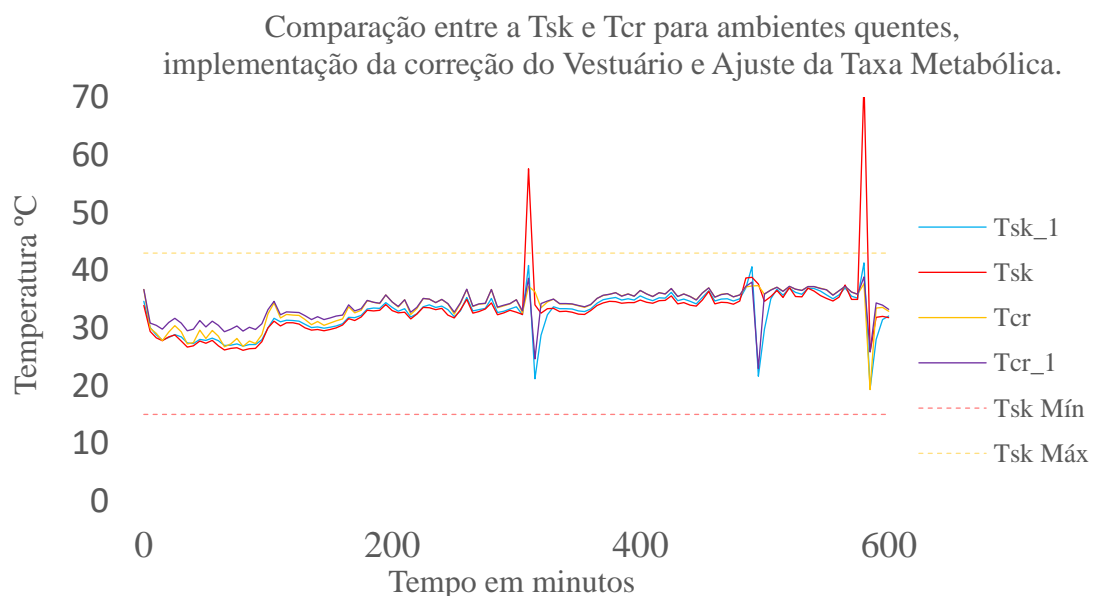


Figura 5.16 Comparação do modelo em ambientes quente, com implementação da correção do vestuário

### 5.4.2 Ambiente Frio

Visando estabelecer um ajuste para modelo Gagge (1986), implementou a taxa de tremores em sua modelação, diferente do que ocorre em ambientes quentes, pois o surgimento de tremores pode ocorrer devido a molhagem cutânea, em ambientes frios, o corpo reduz a perda de calor para o ambiente, e, aumentando a produção de calor interno através de reações exotérmicas que corresponde ao metabolismo energético, transformando uma totalidade energética para o núcleo do corpo, sendo transferido sob a forma de fluxo de calor para o músculo através da produção de tremores involuntários.

Como se pode ver na Figura 5.17, o modelo teve um ótimo comportamento para os parâmetros ambientais apresentados, tanto a Tsk como a Tcr se manteve dentro dos limites estabelecidos, entre o instante inicial 0 até 120 minutos, a Tsk teve um acréscimo de aproximadamente 1,5 °C a cada 20 minutos de exposição, chegando a 28,0 °C no marco de 200 minutos de medição, depois disso, houve uma variação da temperatura da pele de  $\pm 2,0$  °C até 400 minutos, tendo novamente um decréscimo da Tsk. Isso ocorre porque o valor se ajusta aos acontecimentos, devido aos passos de cálculos demasiadamente grandes e a correção gerada pela termorregulação, gerando um atraso na resposta devido aos intervalos de cálculos e a devidas condições expostas que são detectadas, causando uma correção superior ao necessário. Ou, alguns dos ciclos de interação do modelo em função das condições de decisões das estruturas lógicas e condicionais que determinam a resposta necessária aos valores de temperatura apresentada a um valor de cálculo ou decisão desajustado, de qualquer forma, para perceber exatamente o que ocorre, é preciso realizar testes sistemáticos aos diferentes valores de entradas como se uma análise de sensibilidade se tratasse. Como por exemplo: realizar testes de diferentes tipos de taxas metabólicas, verificando se o comportamento das curvas Tsk e Tcr sofrem variações de acordo com as taxas entradas. Outro fator, é que com o aumento da temperatura interna e a diferença da temperatura da pele, o corpo diminui a condutância fisiológica e reduz o fluxo sanguíneo para a pele. Já para a Tcr, os valores apresentando tiveram uma oscilação de 31 °C  $\pm$  2 °C, sendo esses valores extremamente importantes, pois tanto a atividade executada e o isolamento do vestuário aplicado para essas condições, manteve o indivíduo em homeostase, com suas variáveis fisiológicas ideais. As demais variáveis como ET\* e SET\* tiveram um comportamento extremamente aceitável dentro das condições apresentados de Temperatura do ar, umidade relativa do ar, e ausência de suor regulatório no executar da atividade ou tarefa, pois já são esperados esse comportamento, pois são dimensionadas a partir dos valores modelados.

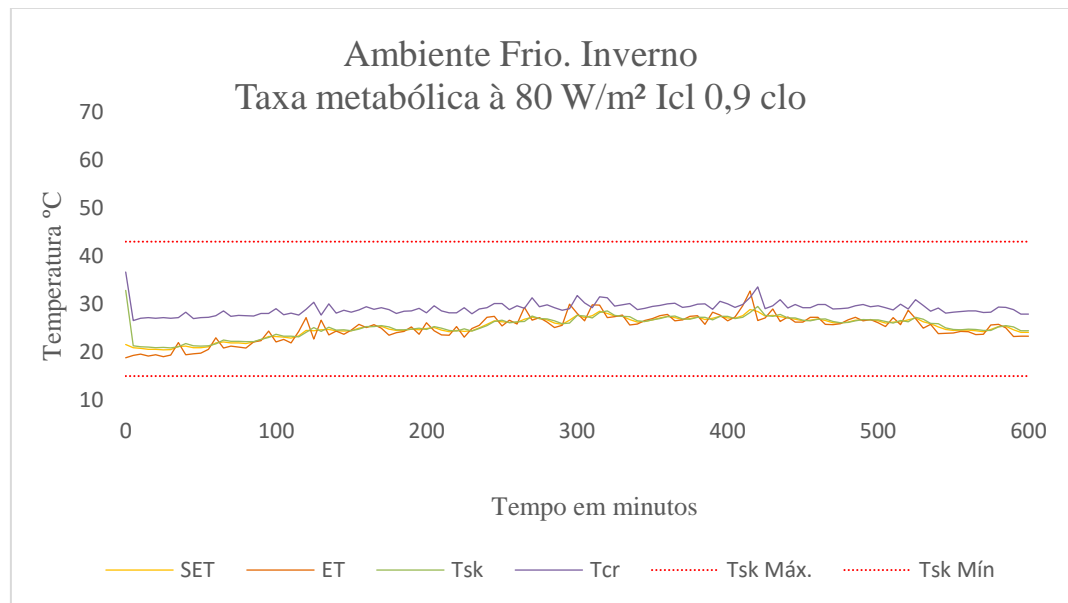


Figura 5.17 Comportamento do modelo para ambientes frio no sudeste do Brasil para atividade moderada leve

A figura 5.18 representa o comportamento do modelo por um atividade muito pesada, caracterizando o contexto laboral de indústrias extrativas e transformadoras, pesca profissional, construção civil e o setor da agricultura por exemplo, tendo como suas tarefas: as escavações, os transportes manuais de cargas, a utilização de ferramentas manuais como: machados, rompedores, serras, lixas e utensílios para cortes.

Apesar do modelo manter uma padronização nos picos iniciais, e se conservar nos limites máximo e mínimo estabelecidos pelos normativos, observa-se que há um aumento significativo da  $T_{cr}$  e da  $T_{sk}$  dentro das condições iniciais de temperatura. A variação da  $T_{cr}$  iniciou em  $36,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , e logo depois de aproximadamente 2 horas de exposição, a  $T_{cr}$  chegou a  $38,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . O modelo, com tentativa de readaptação da temperatura interna do corpo e da temperatura pele, tentar reajusta novamente o equilíbrio térmico ao gradiente de temperatura, porém o isolamento térmico utilizado é superior ao recomendado, pois torna o valor de  $I_{cl}$  equiparado a taxa metabólica, fazendo com que haja um aumento da taxa de suor por um superaquecimento da  $T_{sk}$ . O mesmo se aplica para a  $SET$  e  $ET^*$ , devido ao aumento da taxa metabólica e o superaquecimento em relação ao isolamento do vestuário, apesar do indivíduo estar em ambientes considerado frio para a região em estudo, o excesso do isolamento mais o acréscimo da taxa e suor e a pressão exercida sobre a pele  $P_{sk}$ , fizeram com que aumentasse os picos, na tentativa de regularização dos picos e estabilização da temperatura da pele e Temperatura interna, o ciclo de cálculo gera oscilações bastantes grandes em função das temperaturas de fronteiras estabelecidas como padronização.

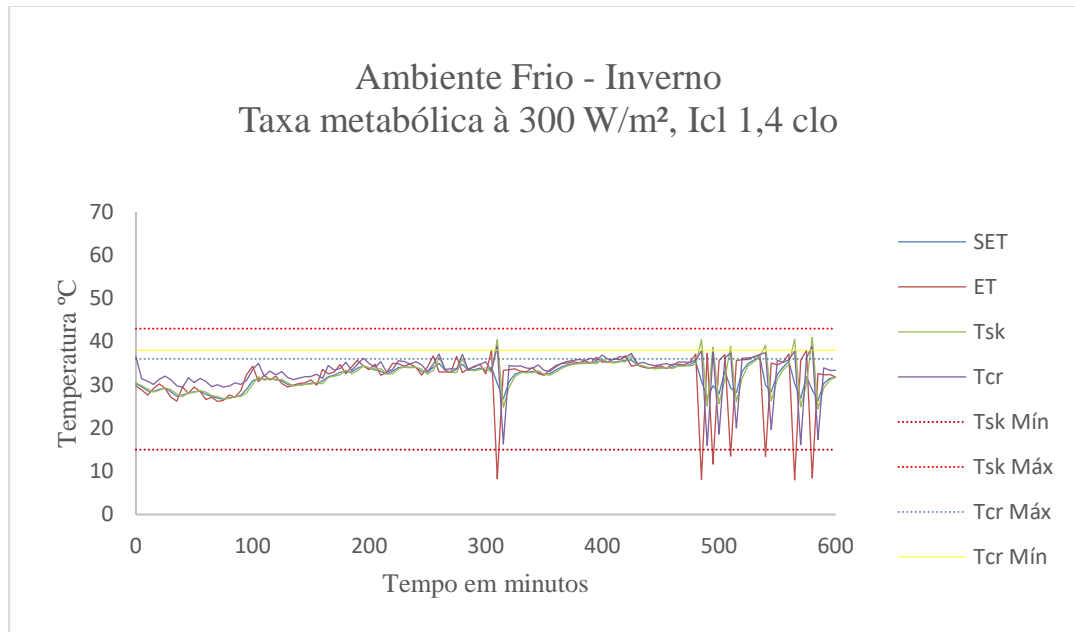


Figura 5.18 Comportamento do modelo para ambientes frios no sudeste do Brasil para atividade intensa

### 5.4.3 Ambiente Termoneutral

Ambiente neutro é aquele onde a troca de calor é equilibrada, sem perda ou ganho de calor por convecção, radiação ou condução, onde o indivíduo não sinta necessidade de combater o calor ou frio, mantendo os seus parâmetros fisiológicos em equilíbrio, determinando a sua sensação térmica em neutralidade térmica sem apresentar desconfortos, e com aceitabilidade do ambiente buscando a satisfação térmica tendo em conta as características:

- Sem perda ou ganho de calor;
- Ausência de arrepios;
- Débito de sudorese ótima;
- Temperatura média da pele ótima (em função do metabolismo);
- Pele seca (molhagem inferior a 60%);
- Ausência de secura das mucosas.

(Miguel, 2014)

#### 5.4.4 Ambiente termoneutral por simulação em câmara climática

Esta análise baseou-se no comportamento do modelo de forma comparativa, com as seguintes condições de simulação: umidade relativa média de 52,80 %, Temperatura de globo de 25,82 °C, temperatura média do ar de 25,48 °C, Velocidade média do vento de 0,14 m/s, temperatura radiante média de 26,33 °C e pressão de vapor do ar de 1000,40 hpa, entre os valores estimados nas análises anteriores para ambientes externos, os resultados coletados foram obtidos entre os estudantes da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto FEUP e analisados em simulação na câmara climática (Fitoclima 25000EC20), no laboratório do PROA no mês de março de 2019, com o intuito de simular um ambiente termoneutral que equiparasse a primavera da região sudeste do Brasil.

A figura 5.19 demonstra o comportamento do modelo em simulação neutral, de acordo com as variáveis apresentadas na Tabela 9.1 do Apêndice C, a atividade realizada durante a análise foi o levantamento e o deslocamento de caixas de 7,5 kg, com uma velocidade de passada de aproximadamente 3 m/s, caracterizando uma taxa metabólica de 80 W/m<sup>2</sup>, foram avaliados 3 indivíduos ao decorrer do dia, totalizando os 90 minutos de medição, no início da avaliação, os índices (SET\*, ET\*, Tsk e Tcr) tiveram um comportamento relativo aos parâmetros normativos, entretanto, aos 38 minutos de medição a temperatura efetiva ET\* teve um pico de 37,42 °C e no mesmo ciclo de interação, entre uma resposta e a outra, uma queda brusca no gradiente de temperatura para 1,15 °C, e aos 40 minutos regressou para 32,11 °C, já no segundo pico aos 50 minutos a ET\* chegou a 39,21 °C com uma oscilação senoidal da temperatura de  $\pm 5,0$  °C até fixa em 31,55 °C completando os 60 minutos de medição, aos 55 minutos a temperatura da ET\* recebe um pico de 37,11°C, decresce a um valor negativo de -0,19 °C e continua o ciclo oscilatório até os 90 minutos.

Além da ET\*, a Tsk e Tcr também sofrem alterações nos mesmos picos relativo aos da ET\*, referente a Tsk, apesar dos picos permanecerem dentro dos limites máximo e mínimo estabelecido pela ISO 9886 (1987), teve uma influência direta aos picos da ET\* e Tcr, fazendo que haja um aumento da temperatura cutânea e um superaquecimento local durante o ciclo de interação que é transferido para o núcleo do corpo. Diferentemente do ambiente externo, as variáveis climáticas em simulação permanecem constantes, ou são planejadas para sofrerem determinadas variações no decorrer do tempo, alterando não só os resultados da medição, como limitando as medições para o determinado tipo de ambiente homogêneo, o tipo de convecção, sendo forçada ou natural, além da falta de interação com as trocas de calor por radiação e a ausência de radiação difusa influenciam no comportamento do modelo. Outro fator que podem influenciar os picos, são as condições da eficiência térmica da roupa  $F_{cl}$ , que porventura é afetada pela capacidade de absorção e transferência de calor, a diferença entre a temperatura da média da pele e a perda de calor evaporativo pela pele, que é acrescido pelo coeficiente combinado ( $h_r + h_c$ ) e o tipo de atividade a ser realizada com o acúmulo de suor regulatório.

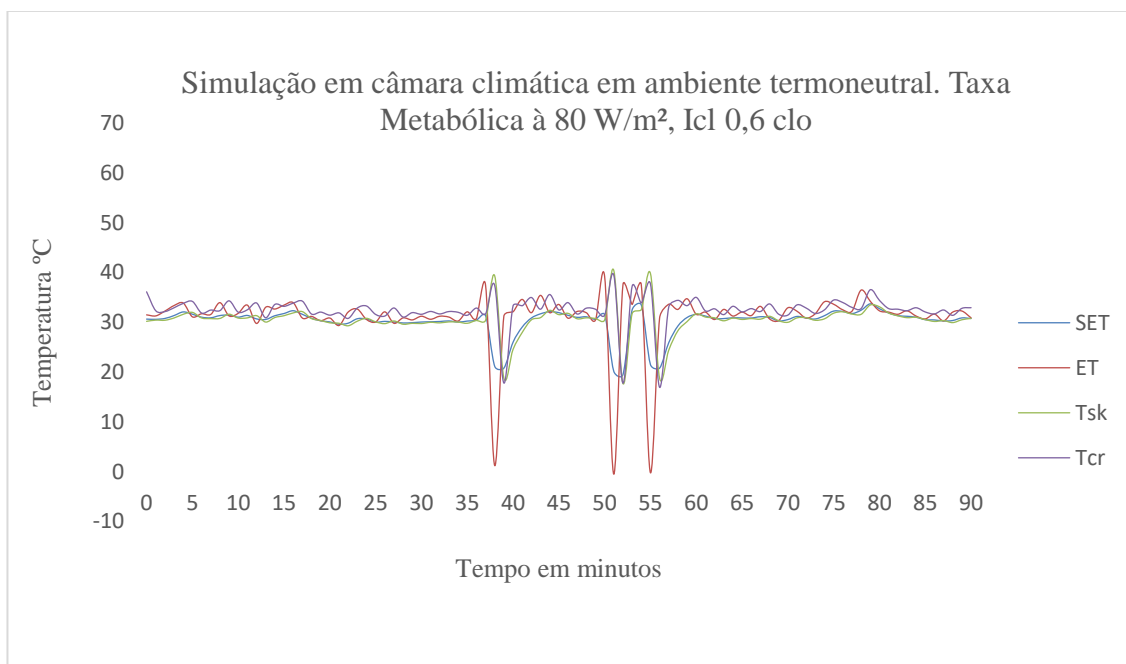


Figura 5.19 Comportamento do modelo para ambientes simulado termoneutral para atividades leves

Após as análises anteriores referentes as Figura 5.15 para uma avaliação em ambiente exterior, e Figura 5.19 para uma avaliação em ambiente interno simulado, foram realizadas comparações entre as variáveis ambientais e parâmetros fisiológicos nas mesmas condições.

É possível perceber que apesar das mesma condições climáticas, o modelo teve um comportamento diferente para ambas as situações, pois retrata uma capacidade maior de se “auto-recuperar” em ambientes externos do que no ambiente interno simulado, isso ocorre porque o modelo possui uma capacidade de resposta em função do tempo, tornando-o dinâmico e racional, pois as variações decorrente de um ambiente ao ar livre que favorece a resposta e integração do ciclo para uma melhor objeção, no entanto, no ambiente interno, mesmo sendo simulado como um ambiente externo e transitório, não é capaz de reproduzir as mesmas condições, principalmente voltadas a trocas de calor por radiação e baixa incidência da difusão solar direta, além de possuir uma umidade ótima e velocidade do vento controlada.

Para representar a Figura 5.20, o índice (a) representa uma medição dos parâmetros ET\* e Tsk para o ambiente interno simulado na câmara climática, já o índice (b) representam as mesmas variáveis ao ar livre, ambos com as mesmas condições fisiológicas e ambientais. Após a análise e verificação dos gráficos (a) e (b), de forma comparativa, é notório a diferença em seu comportamento, pois a figura (a), apresentam alguns picos no início da medição aos 35 minutos, com uma queda da Tsk no mesmo instante, e novamente remete á pico aos 50 minutos com as mesmas características para Tsk, ao contrário da figura (b), os picos são remetidos ao final da medição, dando início aos 60 minutos e sofrendo uma queda da Tsk dentro dos limites aceitável a 15 °C, ressaltando aos 65 minutos que chega a 13 °C para a Tsk, apesar da oscilação em ambos as avaliações, a figura (b) obteve um melhor resultado para as condições descritas, pois teve uma



melhor capacidade de se manter dentro dos limites aceitáveis, mesmo o indivíduo mantendo uma atividade sedentária com baixa taxa de suor regulatório.

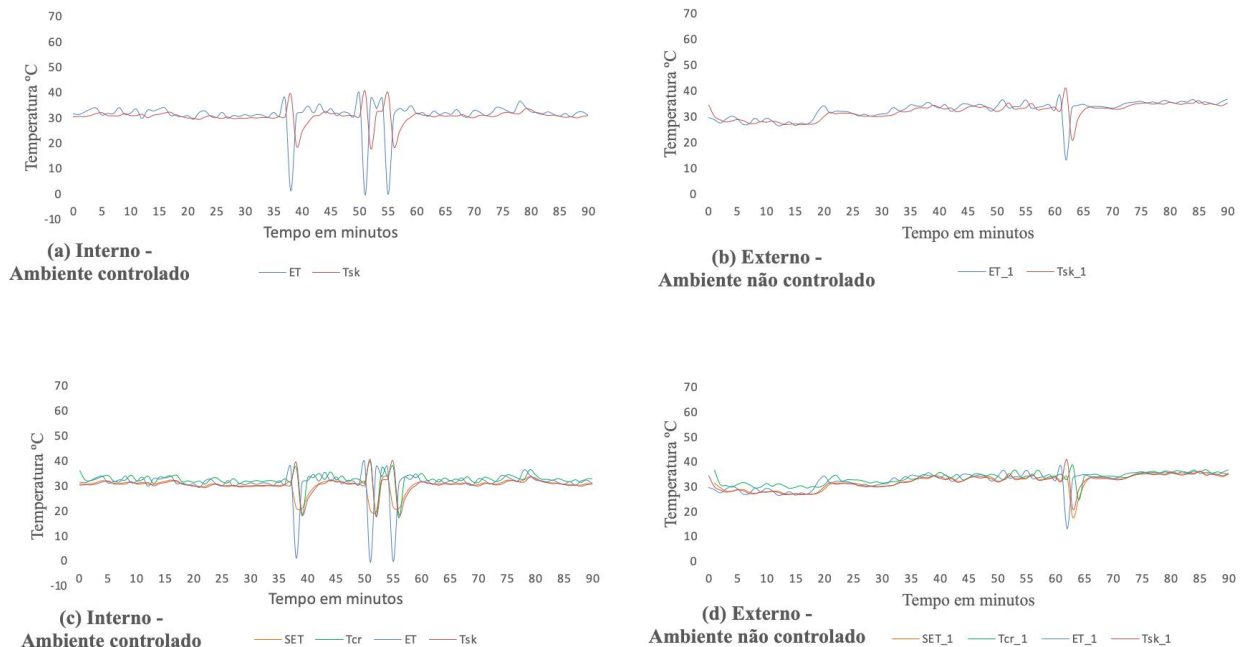


Figura 5.20 Comparação do modelo entre o ambiente simulado e um ambiente ao ar livre

Ao contrário quando se está exposto a um ambiente coberto e fechado, conservando de forma controlada os índices ambientais, a radiação solar direta não incide na pele, prejudicando não só a troca de calor, mas também o balanço térmico de forma significativa,

Ao analisarmos o índice (c) e (d) referente aos dados do ambiente externo, demonstrado na Figura 5.20 que representam os parâmetros SET\* e Tcr para um ambiente simulado e ao ar livre. O gráfico (c), da mesma forma que o gráfico (a), sofreram alterações nos mesmos instantes da medição, apesar de possuírem valores de picos menores e de baixa relevância, ou seja, menos intensos, representam uma demanda da capacidade térmica do corpo armazenar calor interno, ao contrário do gráfico (d), que apresenta um sinuosidade diferente da demonstrado em (c), tendo um comportamento aceitável durante a metade da medição aos 35 minutos, sendo influenciado pela velocidade do vento que incide sobre a pele, principalmente por ações em forma de rajadas momentâneas que eleva a velocidade do vento a 4,50 m/s no momento da interação do ciclo de cálculo, aumentando a troca de calor por convecção, agravando a percepção térmica e gerando um maior desconforto, tanto para o resfriamento da pele momentaneamente, que representa a baixa do pico da SET\*, e, quanto ao longo da medição, levando uma baixa da velocidade do vento no passo seguinte de cálculo a 1,30 m/s.

Ao contrário do gráfico (c), mesmo não tendo uma alta variação da velocidade do vento, teve mais elevações dos picos referente a SET\* e Tcr do que as variáveis do gráfico (d), como

mencionado anteriormente, por se tratar de um ambiente controlado, a ausência de radiação solar direta, já o vestuário com acúmulo de suor e baixa capacidade de evaporação da pele faz com que há um aumento da temperatura interna central, elevando o pico a acima do valor estabelecido sem que ocorre um direcionamento a nível de estresse térmico.

#### 5.4.5 Simulação do Ambiente Termoneutral para um indivíduo despido

A capacidade de manter a temperatura corporal relativamente constante dentro de um valor limite de gasto de energia é gerida por um processo de combustão orgânica denominado metabolismo, sendo garantida pela termorregulação, que depende da atividade realizada para um valor de produção de calor ou dissipação. Essa taxa metabólica basal é a quantidade calórica ou energética utilizada pelo corpo, durante o trabalho sedentário ou em repouso (Malchaire, 2017).

A Figura 5.21 demonstra o comportamento do modelo para um indivíduo nu, com o isolamento térmico igual a 0 clo, o valor da taxa metabólica basal de 58,2 W/m (1met), quando as perdas de calor chegam a valores inferiores indispensáveis para uma manutenção da temperatura central do corpo constante, o corpo humano ativa os mecanismos de termorregulação, que ajusta as condições de troca de calor intensas entre o organismo e o ambiente.

O gráfico teve uma conduta satisfatória para as condições ambientais simuladas, apesar de apresentar uma leve taxa de sudação, que representam os picos oscilatórios da Tsk e Tcr, tendo um valor de extrema oscilação no final da medição para SET\* e Tsk como o aumento da temperatura da pele por conta dos ciclos interativos que realizam as correções, ou pelos passos de cálculos na programação. A falta de vestuário, além de aumentar o ganho de calor por radiação, e expor ao indivíduo em situações de maiores convecções, que nem sempre caracteriza o que realmente o indivíduo está sentindo, alterando totalmente a sensação térmica.

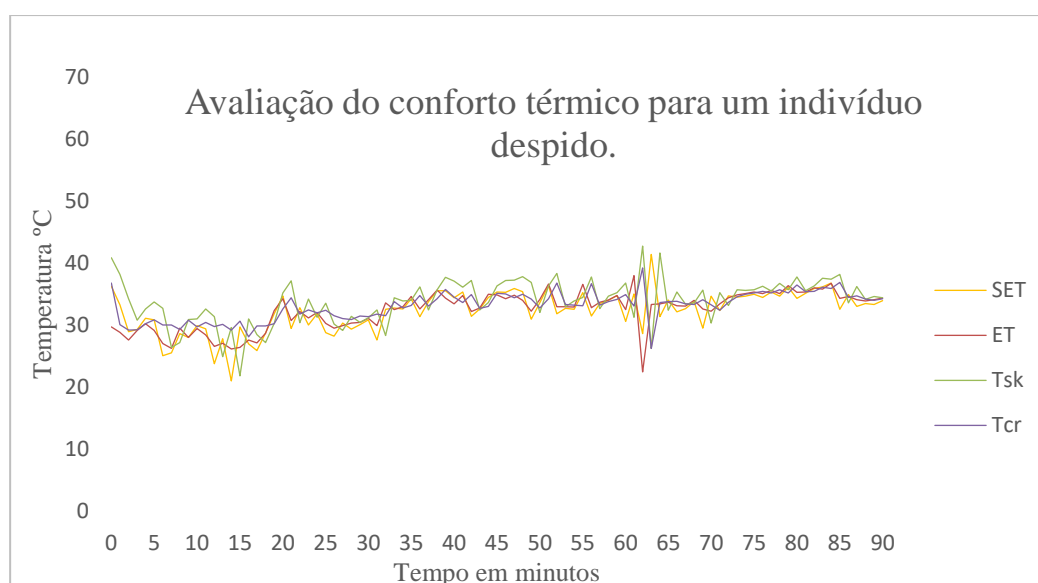


Figura 5.21 Verificação do modelo para um indivíduo despido.

### 5.4.6 Sensação térmica e Preferência Térmica dos usuários para um ambiente simulado

O questionário aplicado nesse estudo foi baseado na norma ISO 10551 (2007), que inclui perguntas sobre dados da sensação térmica, preferências térmicas individuais de conforto ou/ desconforto térmico de cada usuário, e a relação de aceitabilidade do movimento do ar. Sobre a questão do conforto térmico, os indivíduos podiam escolher respostas como aceitável, inaceitável, confortável, desconfortável, agradável, desagradável e além de opção de respostas abertas, outras questões levantadas na coleta de dados era se os usuários sentiam alguns efeitos psicofisiológicos durante a análise, como: náuseas, calafrios, arrefecimento das extremidades do corpo (nariz, orelha e ponta dos dedos), ressecamento das mucosas, ardências dos olhos entre outros sintomas anormais, todos os usuários dormiram mais de 8 horas de sono, não efetuaram atividades físicas nas últimas 24h e sentiam-se descansados no momento da avaliação, os dados da temperatura da pele e temperatura interna foi adquirido através do modelo produzido nessa dissertação.

Os questionários foram criados pelo Google questionário e enviados para os usuários via e-mail em 4 etapas, ambos com 7 perguntas: o primeiro questionário o usuário recebia logo na entrada da câmara climática, o segundo após os 30 minutos de simulação, o terceiro questionário aos 60 minutos de exposição e o último questionário com 90 minutos, que repetia as mesmas perguntas do primeiro questionário. A avaliação foi realizada conforme instrução da ISO 7730 (2005), os dados iniciais da estação microclimática, foram tratados e corrigidos utilizando-se uma macro de aplicação em Excel desenvolvida por Guedes (2010), os valores recomendados para proporcionar um ambiente termoneutral com bem estar térmico global a 90 % conforme a ISO 7730 (2005). A Figura 5.22 demonstra a etapas de medição para obter os resultados dos indivíduos em análise.

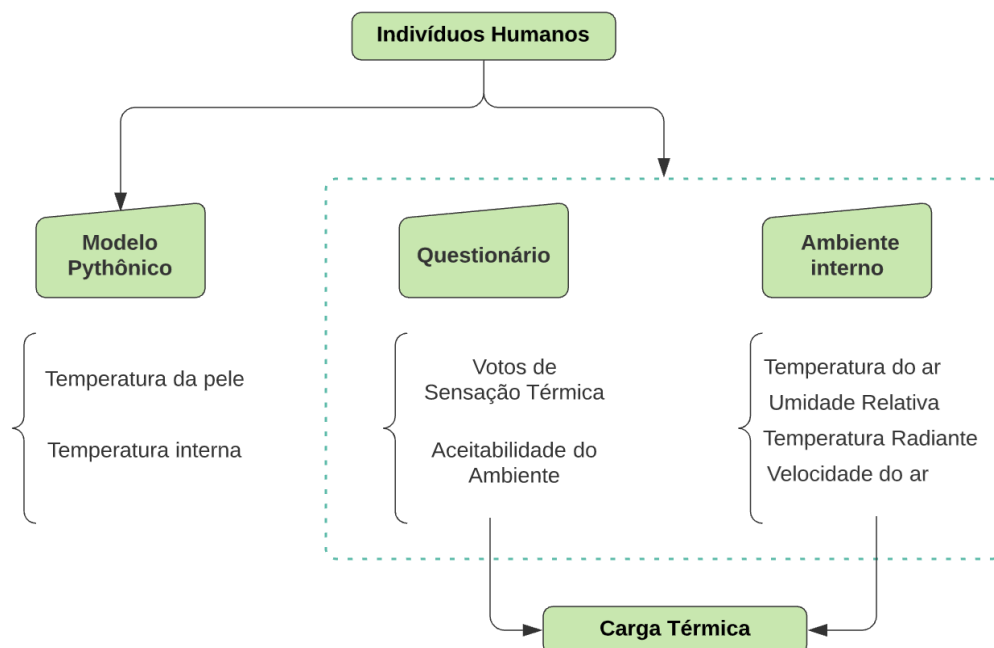


Figura 5.22 Etapas e planejamento das medições

A Figura 5.23 demonstra os valores médios da temperatura da pele Tsk e temperatura interna Tcr dos 3 indivíduos em análise, com intervalos das medições de 30', 60' e 90' e a percentagem dos votos em relação a sensação térmica e as repostas dos questionários aplicados durante a medição, e avaliada com auxílio da escala sétima de Fanger (1970), onde (-3 muito frio, -2 frio, -1 pouco frio, 0 neutro, +1 pouco calor, +2 calor, +3 muito calor).

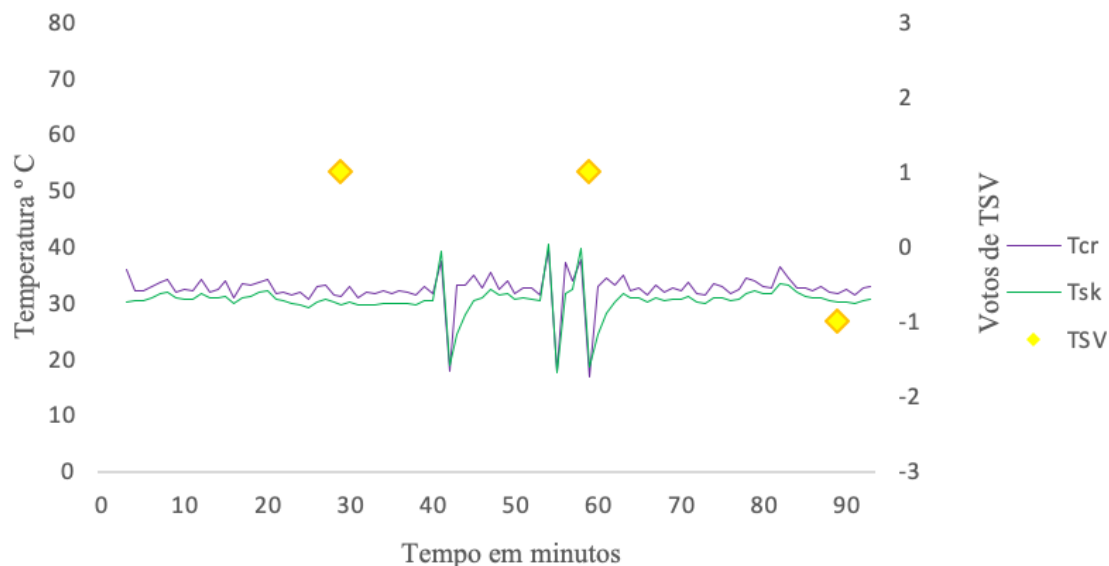


Figura 5.23 Votos de Sensação Térmica dos Indivíduos.

#### 5.4.7 Indivíduo 1

O indivíduo 1, com 56 anos de idade, do sexo masculino, possui 1,79 metros de altura, a taxa metabólica igual a 1,1 (met), com 0,5 clo de isolamento do vestuário. Durante toda a análise considerou-se o ambiente confortável e aceitável, mas que preferia o ambiente mais quente, nos 60 minutos de medição, sentiu o ambiente mais frio porém aceitável, apresentou um pouco de sonolência e efeitos psicofisiológicos ao decorrer dos 60 minutos como ardência dos olhos, de acordo com a Figura 5.24, os dados da temperatura interna, tiveram uma oscilação entre o início dos 40 minutos e ao final dos 60 minutos, no final da medição após o último questionário, o indivíduo 1 considerou a temperatura adequada e o ambiente confortável.

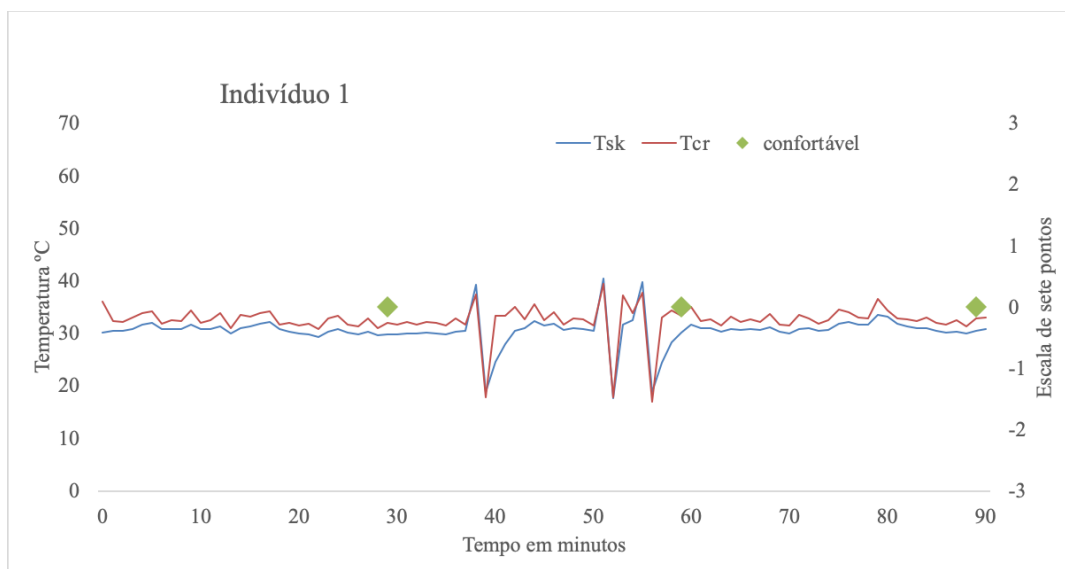


Figura 5.24 Análise da Sensação Térmica do Indivíduo 1

### 5.4.8 Indivíduo 2

O indivíduo 2, com 46 anos de idade, do sexo masculino, possui 1,82 metros de altura, a taxa metabólica igual a 1,1 (met), com 0,5 clo de isolamento do vestuário. No início da análise, considerou o ambiente confortável e geralmente aceitável, mas preferia o ambiente mais quente. No início dos 40 minutos considerou o ambiente  $\pm$  confortável e julgou a temperatura do ambiente como 20 °C. No início dos 60 minutos, o indivíduo 2 considerou o ambiente como desconfortável e começou a apresentar efeitos psicofisiológicos como formigamento nas extremidades dos dedos e mãos frias, nariz ressecado e julgou a temperatura do ambiente como inadequada, conforme a figura 5.25.

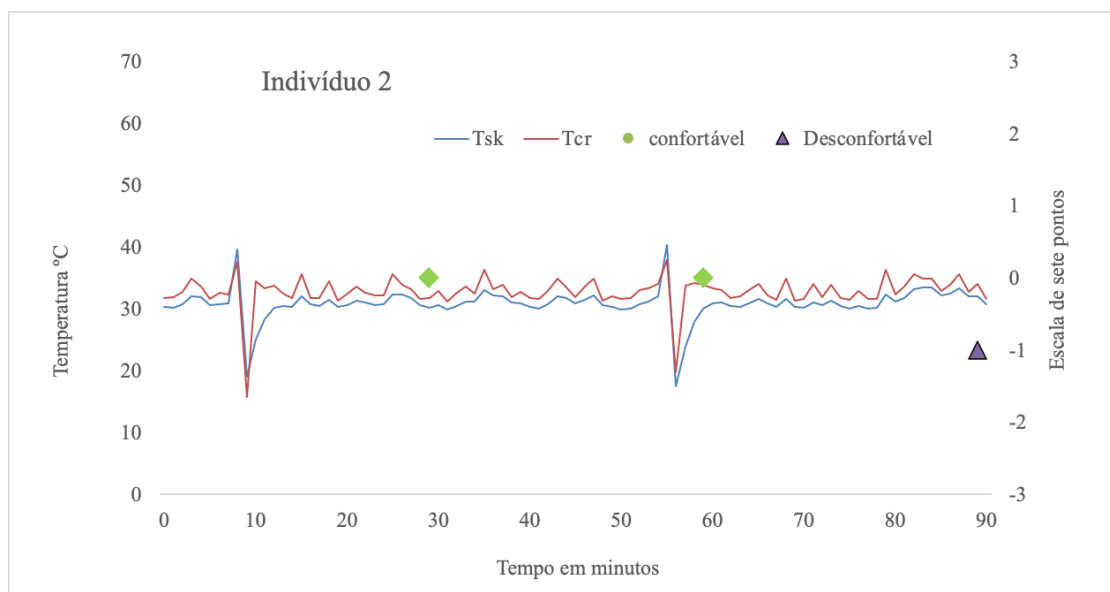


Figura 5.25 Análise da Sensação Térmica do Indivíduo 2

### 5.4.9 Indivíduo 3

O indivíduo 3, com 39 anos de idade, do sexo feminino, possui 1,68 metros de altura, a taxa metabólica igual a 1,2 (met), com 0,6 clo de isolamento do vestuário. No início da análise, considerou o ambiente confortável e aceitável, mas preferia o ambiente mais frio. No início dos 40 minutos até o final da medição considerou o ambiente desconfortável e inaceitável. Apresentou efeitos psicofisiológicos de arrefecimento na extremidade do nariz e relatou desconforto local. A análise da sensação térmica do indivíduo 3 esta representada na Figura 5.26.

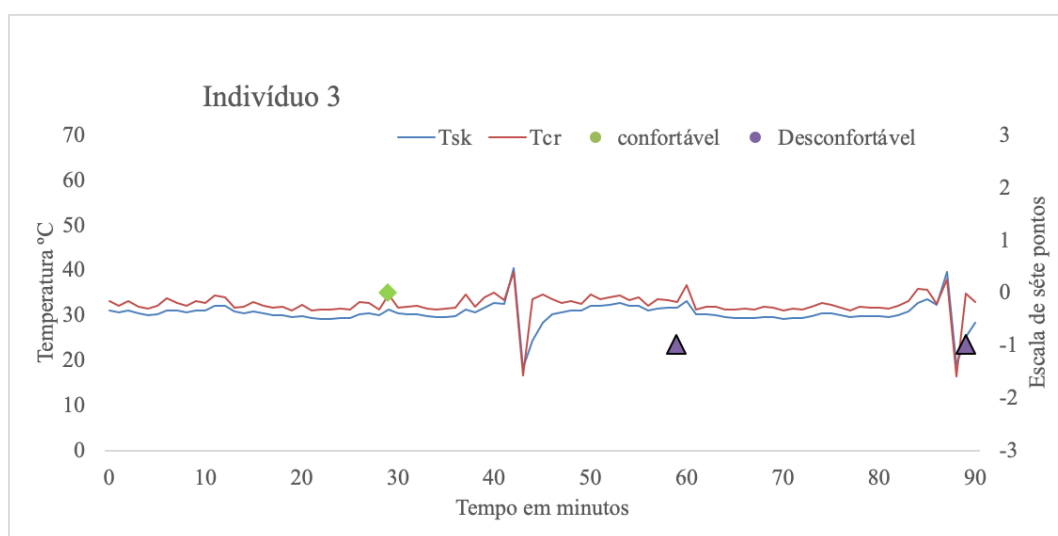


Figura 5.26 Análise da Sensação Térmica do Indivíduo 3

Na maioria dos votos em relação a aceitabilidade do ambiente, nos primeiros 30 minutos de análise todos os indivíduos classificaram o ambiente como termoneutral e aceitável, nos 60 minutos de medição, com 67,70% dos votos, preferiam o ambiente mais quente e classificaram como  $\pm$  aceitável, e 33,34% dos votos preferiam o ambiente mais frio, e classificaram como inaceitável. Com isso, pode se afirma que 66,70% dos votos dos indivíduos encontravam-se satisfeitos com o ambiente térmico e 33,34% dos votos, classificaram o ambiente térmico como insatisfeito.

No decorrer das análises, alguns indivíduos responderam nos questionários que sentiram alguns desconfortos em relação a umidade do ar que teve como valor médio 52,80%, que tiveram como efeitos psicofisiológicos ardência nos olhos, ressecamento das mucosas, principalmente no nariz e garganta. Outra questão levantada durante o questionário era em relação a temperatura do ambiente, era questionando qual seria a temperatura naquele exato momento, que teve valor médio de 25,48 °C durante os 90 minutos. A percepção térmica de cada indivíduo depende dos parâmetros fisiológicos de cada um, os resultados apresentados nos gráficos comprova a resposta do modelo em relação a sensação térmica dos indivíduos, pois não há grande alteração em relação a Tsk e Tcr, apesar de alguns indivíduos considerarem o ambiente inaceitável e que comprovem ou explique essa sensação de conforto ou desconforto para cada sujeito pode ter sido levado em

relação a posição do assento no ambiente, por estar próximo as paredes onde pode ocorrer desconforto local por assimetria radiante, assim como relatou o indivíduo 3.

Observado nos gráficos anteriores, em relação a temperatura da pele, não houve mudanças drásticas a nível da temperatura ambiente, que não se dar por conta da função de termorregulação natural do homem, tirando aos picos já mencionado no capítulo anterior sobre a Tsk e Tcr. A medida que os indivíduos se expõem mais tempo no ambiente, a sua função metabólica aumenta, mudando a sensação térmica de neutro para frio, levemente frio ou quente e levemente quente, como descreveram os indivíduos e detetando a capacidade de resposta do modelo.





## 6 CONCLUSÕES LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

### 6.1 Conclusões

Este estudo teve como base a necessidade de avaliar o comportamento de um modelo racional aplicado a vertente do conforto térmico para ambientes ao ar livre, devido a ausência de pesquisas publicadas com a vertente tratada nesse trabalho, um dos objetivos principais era avaliar os indivíduos em ambientes de regime transitórios e estacionários, por meio de um modelo matemático capaz de transcrever os fatores fisiológicos e as respostas transpassada pela termorregulação humana, acrescentar melhorias de conforto térmico para uma estimativa dos sujeitos no âmbito ocupacional e buscar uma implementação de um modelo de fácil aplicação que transmita um desempenho satisfatório e que tenha como previsões de respostas rápidas e dinâmicas para diversos tipos de ambientes, sem limitações da medição em relação ao tempo, e previsões minuciosas, levando em ponderação as variações incontroláveis do ambiente, que são proporcionadas por intemperismos climáticos, Outra questão levantada no desenvolvimento do modelo foi a atualização do modelo de dois, através de implementação de novas normas e formulações que se adequam ao ambiente externo.

Com a dificuldade de analisar o ambiente ao ar livre, muitas pesquisas são voltadas para esse tipo de ambiente com técnicas *indoor*, que desconsideram as variações que essas variáveis ambientais ( $V_a$ ,  $T_a$ , RH, e  $P_{atm}$ ) sofrem, além de não ter um resultado fidedigno dos coeficientes de convecção e radiação, a uma grande carência em relação aos estudos de modelagem para ambientes transitórios.

A ISO 7933 (1987), foi o normativo base para implementação do sistema Passivo e ativo, pois auxiliou na adaptação das equações de troca de calor e entendimento do sistema de termorregulação do corpo humano, principalmente quando se trata das taxas evaporativas.

Levando em consideração aos artigos originais de Gagge (1972) e StolWijk (1971), as informações muita das vezes difíceis de interpretar e voltadas para ambientes estacionários, com parâmetros simulados em laboratórios com taxas iniciais fixas para a capacidade térmica da pele e o fluxo sanguíneo para um indivíduo padrão, são fatores que por ventura dificultou a análise dos dados e inviabilizou de forma indireta a interpretação e a abordagem do modelo, sendo demasiadamente muita das vezes incoerente com a resposta do modelo original.

No que se considera a implementação e adaptação da correção do vestuário com base no Modelo de Dois Nós de Gagge (1986), para indivíduos em situações ambientais diversas, foram fundamentados com deliberação da ISO 9920 (2006) e com auxílio dos índices apresentado por Parsons (2003), e um artigo de revisão apresentado por Malchaire (2001), apresentaram os seguintes resultados em função do vestuário|:

- Ambiente quente – apresentaram ótimos resultados para o equilíbrio térmico durante grande parte da exposição, mostrando um aumento da  $T_{cr}$  e  $T_{sk}$  quando mantida uma atividade metabólica acima dos  $300 \text{ W/m}^2$ , tornando o vestuário impermeável;

- Ambiente frio – Manteve-se dentro dos padrões estabelecidos pela ISO 9886 (1987) durante toda a exposição para uma temperatura acima dos 17 °C, sem apresentação de perda de calor para o meio externo, faixa limitada de aplicabilidade para ambiente com temperatura menor que 10 °C, e previsão menos precisas da T<sub>cr</sub> em ambiente para esse tipo de ambiente, sendo baseados em dados limitados;
- Ambiente termoneutral - Apesar da atividade realizada ser sedentária, e com poucos movimentos, apresentou um melhor resultado para ambiente exterior com baixa taxa de exsudação da pele para o meio exterior, e uma oscilação da temperatura interna central com grande aumento dos picos para a T<sub>sk</sub> para um ambiente exterior simulado.

Com este trabalho, foi possível perceber a dinâmica voltada ao comportamento do modelo com características diversificadas de alta adaptação a diferentes condições reais, pois não retrata como apenas uma ferramenta de avaliação para o conforto térmico, mas como um índice de medição ao ar livre, que foi proposta pelo autor Gagge e Nishi (1977), como a SET\* e ET\* por exemplo, que tem uma diversificação diferente dos índices apresentados por Fanger (1970,1973) como o PMV e PPD, apesar do modelo empírico do autor possuir 1 nó, ainda é muito utilizado pelos pesquisadores para a vertente do conforto térmico interno.

## 6.2 Perspetivas Futuras

### 6.2.1 Dificuldades

Como já mencionado, as principais dificuldades ao decorrer do trabalho se deram por conta de questões normativas, com o intuito de reportar uma modelagem matemática para os tempos de hoje, e reprogramar o Modelo de Dois Nós (TNM), para uma linguagem de programação mais atualizada e de fácil entendimento, se perderam informações ou deduções dos passos de cálculos que não foram apresentadas no modelo original ou de alguma forma foram omitidas.

O intuito inicial sempre foi trazer o modelo programado de TNM na versão de 1971, entretanto, a omissão de alguns parâmetros no modelo original de Gagge, nos direcionou para outros estudos do autor, como por exemplo o estudo de Nishi (1977), até chegar na versão de TNM de 1986 que teve a última atualização por Gagge e Nishi, com a correção do ajuste metabólico produzido pelos tremores, que fez o modelo ser mais direto e dedutivo nas respostas fisiológicas a ponto de ser aplicado em diversos tipos de ambiente, principalmente em ambientes frios ou quentes que capaz de responder a uma grande taxa de suor regulatório por conta da atividade a ser realizada.

Mais um ponto a se considerar foi a determinação do sinal da pele e do núcleo, assim como a troca de calor entre a pele e o núcleo, certamente foram os passos de cálculos com maiores dificuldades de modelagem, isso implicou diretamente no comportamento do modelo em função do tipo de ambiente, pois o sinal atribuído para os ciclos de cálculos determinam se o corpo sofre vasoconstrição ou vasodilatação, como as temperaturas de se iniciam a 34.1 para a T<sub>sk</sub> e 36.6 para

a  $T_{cr}$  para termoneutralidade fisiológica, dando origem as limitações que são reproduzidas no modelo programado nessa Dissertação.

Em relação aos ciclos condicionais e integração com as novas formulações integrada ao modelo presente nessa dissertação, fez com que haja uma oscilação nos gráficos em relação as variáveis em estudo ( $T_{cr}$ ,  $T_{sk}$ ,  $SET^*$  e  $ET^*$ ), essa compilação entre os ciclos e as adaptações do modelo para o ambiente externo também foi alvo de dificuldade, pois foi preciso elaborar equações com base no modelo original de Gagge de 1971 e buscar informações fidedignas com auxílio de outras normas.

## 6.2.2 Principais Limitações do Modelo

- Não suportável em ambientes abaixo dos 10 °C;
- A programação só está preparada para um valor inicial de  $T_{sk}$  e  $T_{cr}$ ;
- Melhor funcionamento em ambientes heterogêneos, não há necessidade de trabalhar com valores médio, por isso, para ambientes homogêneos os resultados produzidos apresentam muitas oscilações na  $T_{sk}$  que de alguma forma alteram a  $ET^*$  e  $SET^*$ ;
- Não apresenta resultados válidos para atividades pesadas acima de 350 W/m<sup>2</sup>, por conta da interação realizada a cada ciclo de cálculo;
- Apesar da implementação da correção do vestuário, o modelo não suporta o excesso de camadas para um isolamento dinâmico, sendo deduzido apenas para o isolamento estático;

## 6.2.3 Trabalhos Futuros

A grande versatilidade dos modelos de termorregulação do corpo humano aplicado a ambientes ao ar livre se dar por conta das variáveis em análise  $ET^*$  e  $SET^*$ , a dificuldade de correlacionar a sensação térmica dos indivíduos em ambiente não simulado, faz com que haja pouca demanda de estudos nessa vertente do conforto térmico, nesse contexto, a aplicação dos dados da  $ET^*$  e  $SET^*$  com valores de  $PET^*$  de forma que efetua-se uma análise descritiva e quantitativa com as variáveis produzida no modelo.

Outro contexto, é simular um ambiente não homogêneo transitório para uma quantidade maior de indivíduos e equiparar com os dados reais produzidos pelo modelo ,correlacionando com os dados reais dos autores, utilizando bancos de dados com trabalhos já validados, um maneira interessante de visualizar a performance do modelo é enquadra a programação com o `Pack comf` ou `SET_calculation.R` disponível no RStudio em linguagem de programação R.

Aplicar um estudo mais aprofundado para o isolamento dinâmico do vestuário, e melhorar a percepção do modelo em relação às roupas refletivas e térmicas, principalmente a ambiente frios abaixo de 10 °C, ou até mesmo implementando a roupa molhadas, com a combinação das variáveis referente a temperatura do ar e a velocidade do ar, relacionando as perdas de calor e a

funcionalidade do tipo de vestuário. Verificar a capacidade do modelo em situações de estresse térmico (frio e quente). Gerir uma aplicação *mobile/desktop* para análise do conforto térmico dinâmico.

Não tão menos importante, melhorar a integração dos cálculos e reduzir o tempo de resposta para a autocorreção do passo de cálculo seguinte, isso com certeza seria um dos pontos mais criterioso para um melhor resultado no desempenho e resposta do modelo. As condicionais e interação nas decisões entre os ciclos e as estruturas de repetição “*for, if, else, elif e while*” precisam ser mais estruturadas, de forma que geram menos ciclo repetitivos, como explicado anteriormente no capítulo 5, a forma que essas condicionantes estão programada permitem que o modelo se readapta sempre ao ciclo de cálculo seguinte, que é muito bom, porém ao mesmo tempo faz com que entrem em ciclo local sendo necessário reestruturar a programação, com capacidade de respostas para desmitificar o intervalo de tempo demasiadamente grande em relação ao gradiente de temperatura, diminuindo os picos gerados, principalmente para a temperatura da pele e temperatura interna (  $T_{sk}$  e  $T_{cr}$ ).

Incorporar uma nova variável na modelagem para verificar o comportamento do modelo em função do gênero dos indivíduos sem generalizar ao homem padrão de forma em obter resposta ideais.

Verificar a taxa de sudorese em função do isolamento do vestuário levando em consideração a variável clo.

---

## 7 REFERÊNCIAS

- ASHRAE 55. (2013). *ASHRAE Standart 55 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* (Vol. 55, pp. 1–10). Vol. 55, pp. 1–10.
- ASHRAE Handbook. (1997). ASHRAE Handbook HVAC. In *ASHRAE Handbook*. Retrieved from <https://archive.org/details/ASHRAEHANDBOOK1997/page/n53/mode/2up>
- Becker, S., Potchter, O., & Yaakov, Y. (2003). Calculated and observed human thermal sensation in an extremely hot and dry climate. *Energy and Buildings*, 35(8), 747–756. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00228-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00228-1)
- Blazeyczyk, K.; Tokura, A. . (1997). Solar radiation and thermal physiology in man. *Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of Millennium*, 99, 9–39.
- Braz, J. R. C. (2019). Fisiologia da termorregulação normal. *Revista Neurociências*, 13, 12–17. <https://doi.org/10.34024/rnc.2005.v13.8799>
- Bröde, P., Krüger, E. L., Rossi, F. A., & Fiala, D. (2012). Predicting urban outdoor thermal comfort by the Universal Thermal Climate Index UTCI-a case study in Southern Brazil. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 471–480. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0452-3>
- Cavalcanti, H. (2017). *Ambiente térmico como instrumento de gestão na construção em altura*. Universidade do Porto - FEUP.
- Cheng, V., Ng, E., Chan, C., & Givoni, B. (2011). Outdoor thermal comfort study in a sub-tropical climate: a longitudinal study based in Hong Kong. *International Journal of Biometeorology*, 56(1), 43–56. <https://doi.org/10.1007/s00484-010-0396-z>
- Clark, R. P. (1973). A review of: “ The Stress of Hot Environments ” (Monographs of Die Physiological Society, No. 29.) By D. MCK. KERSLAKE. (London: Cambridge University Press, 1972.) [Pp. x + 316.] £6.00. *Ergonomics*, 16(2), 245–246. <https://doi.org/10.1080/00140137308928413>
- Crawshaw, L. I., Nadel, E. R., Stolwijk, J. A. J., & Stamford, B. A. (1975). Effect of local cooling on sweating rate and cold sensation. *Pflogers Archiv European Journal of Physiology*, 354(1), 19–27. <https://doi.org/10.1007/BF00584500>
- Dickenson, A. H. (1977). Specific responses of rat raphé neurones to skin temperature. *The Journal of Physiology*, 273(1), 277–293. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1977.sp012094>
- Duarte, L. A. (2019). *Determinação de gasto energético por actigrafia em contexto ocupacional*. 1 DVD (229 p.)-1 DVD (229 p.). Retrieved from <https://hdl.handle.net/10216/123596>
- Enescu, D. (2019). Models and indicators to assess thermal sensation under steady-state and transient conditions. *Energies*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/en12050841>
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*. Retrieved from <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19722700268>
- Fanger, P. O. (1973, October 1). Assessment of man’s thermal comfort in practice. *British Journal of Industrial Medicine*, Vol. 30, pp. 313–324. <https://doi.org/10.1136/oem.30.4.313>
- Faustini, F. (2017). *Conforto térmico e tempo de permanência em espaços abertos de lazer: Influência de diferentes níveis de sombreamento / (Universidade estadual Paulista; Vol. 12)*. Retrieved from [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/157133/faustini\\_fb\\_me\\_bauru.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/157133/faustini_fb_me_bauru.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

- 
- Fiala, Kevin J. Lomas, and M. S. (1999). Modeling in Physiology - A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system DUSAN. *Journal of Applied Physiology*, 82, 2045–2053. Retrieved from <https://www.physiology.org/doi/full/10.1152/jappl.1999.87.5.1957>
- Fiala, P. Bröde, D. (2009). Environmental ergonomics XIII. In *Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Ergonomics* (Proceeding). Boston, USA.
- Fiala, D. (1998). Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort (Vol. 45). Retrieved from <https://www.dora.dmu.ac.uk/xmlui/handle/2086/4129>
- Fiala, D. (2012). UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 429–441. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0424-7>
- Fiala, D., Lomas, K. J., & Stohrer, M. (2001). Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *International Journal of Biometeorology*, 45(3), 143–159. <https://doi.org/10.1007/s004840100099>
- Fiala, D., Lomas, K., & Stohrer, M. (2003). *First principles modeling of thermal sensation responses in steady-state and transient conditions*.
- Gagge, A. P. (1972). An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory. *Hokkaido University*, 2192. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2115/37901>
- Gagge, A. P. (1986). A standard predictive Index of human response to thermal environment. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, (92(2B)), 709–731. Retrieved from [https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase\\_2522.pdf](https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_2522.pdf) <http://oceanrep.geomar.de/42985/>
- Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J., & Hardy, J. D. (1967). Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environmental Research*, 1(1), 1–20. [https://doi.org/10.1016/0013-9351\(67\)90002-3](https://doi.org/10.1016/0013-9351(67)90002-3)
- Givoni, B., Noguchi, M., Saaroni, H., Pochter, O., Yaacov, Y., Feller, N., & Becker, S. (2003). Outdoor comfort research issues. *Energy and Buildings*, 35(1), 77–86. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00082-8)
- Guedes, J. C. (2010). *Análise da qualidade do ambiente ocupacional nos gabinetes da FEUP*. Retrieved from <https://www.sposho.pt/sho2020-pt>
- Guedes, J. C. (2016). *Mathematical Modelling of Human Thermoregulation in Hot Environments* (University of Porto). Retrieved from [https://sigarra.up.pt/feup/pt/pub\\_geral.pub\\_view?pi\\_pub\\_base\\_id=37751](https://sigarra.up.pt/feup/pt/pub_geral.pub_view?pi_pub_base_id=37751)
- Havenith, G., & Nilsson, H. O. (2004). Correction of clothing insulation for movement and wind effects, a meta-analysis. *European Journal of Applied Physiology*, 92(6), 636–640. <https://doi.org/10.1007/s00421-004-1113-6>
- Hirashima, S. Q. da S., & Assis, E. S. de. (2017). Percepção sonora e conforto acústico em espaços urbanos do município de Belo Horizonte, MG. *Ambiente Construído*, 17(1), 7–22. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000100120>
- Hirashima, S. Q. da S., Assis, E. S. de, & Nikolopoulou, M. (2016). Daytime thermal comfort in urban spaces: A field study in Brazil. *Building and Environment*, 107, 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.006>
-

- Holopainen, R. (2012). *A human thermal model for improved thermal comfort*. Retrieved from <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>
- Honjo, T. (2009). *Thermal Comfort in Outdoor Environment*. 43–47.
- Isawa, K., & Shukuya, M. (2016). Sensitivity Numerical Analysis of Human Body Exergy Balance under an Unsteady-State Thermal Environment—Behavioral Adaptation Induced by Undesirable Cold Storage by Building Envelope in Winter. *Health*, 08(08), 737–748. <https://doi.org/10.4236/health.2016.88077>
- ISO 11079 Standard, I. (2007). Ergonomics of the thermal environment – Determination and interpretation of cold stress when using required clothing insulation (IREQ) and local cooling effects. *Euro Code SS-EN-1191-2*, (138227).
- ISO 7726, I. (1998). ISO 7726 - Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities *Ergonomie. Ergonomics*, 1998.
- ISO 7730, I. (2005, August). ISO 7730 - International standard - Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 25, pp. 605–615. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.11.005>
- ISO 7933, I. (1987). *ISO 7933 - Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain Ergonomie*. 1987.
- ISO 9886 International Standard. (1987). *ISO 9886 - Ergonomics evaluation of thermal strain by physiological measurements*. 1987.
- ISO 9920, I. (2006). ISO 9920 - Ergonomics of the thermal environment – estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble. *International Standards Organisation*, 3(1), 107. <https://doi.org/10.1086/261805>
- Jendritzky, G., & de Dear, R. (2009). Adaptation and Thermal Environment. In *Biometeorology for Adaptation to Climate Variability and Change* (pp. 9–32). [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8921-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8921-3_2)
- Katavoutas, G., Flocas, H. A., & Matzarakis, A. (2014). Dynamic modeling of human thermal comfort after the transition from an indoor to an outdoor hot environment. *International Journal of Biometeorology*, 59(2), 205–216. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0836-2>
- Katic, K., Zeiler, W., & Boxem, G. (2014). Thermophysiological models: A first comparison. *Fifth German-Austrian IBPSA Conference, At RWTH Aachen University, Aachen, Germany*, 595–602. Retrieved from [http://www.ibpsa.org/proceedings/bausimPapers/2014/p1209\\_final.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/bausimPapers/2014/p1209_final.pdf)
- Kaynakli, O., & Kilic, M. (2005). Investigation of indoor thermal comfort under transient conditions. *Building and Environment*, 40(2), 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.05.010>
- Kingma, B. R. M., Frijns, A. J. H., & Saris, W. H. (2012). Mathematical modeling of human thermoregulation: A neurophysiological approach to vasoconstriction. *Studies in Computational Intelligence*, 399, 307–316. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-27534-0\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27534-0_20)
- Lai, D., Zhou, X., & Chen, Q. (2017). Modelling dynamic thermal sensation of human subjects in outdoor environments. *Energy and Buildings*, 149, 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.028>
- Lamberts, R. (2016). Conforto e stress térmico. *Laboratório de Eficiência Energética*, p. 144.

- 
- Lau, K. K. L., Shi, Y., & Ng, E. Y. Y. (2019). Dynamic response of pedestrian thermal comfort under outdoor transient conditions. *International Journal of Biometeorology*. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01712-2>
- Lotens, W. A., & Pieters, A. M. J. (1995). Transfer of radiative heat through clothing ensembles. *Ergonomics*, 38(6), 1132–1155. <https://doi.org/10.1080/00140139508925178>
- Lundgren-Kownacki, K., Martínez, N., Johansson, B., Psikuta, A., Annaheim, S., & Kuklane, K. (2017). Human responses in heat – comparison of the Predicted Heat Strain and the Fiala multi-node model for a case of intermittent work. *Journal of Thermal Biology*, 70, 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.05.006>
- Malchaire, J. (2001). Development and validation of the predicted heat strain model. *The Annals of Occupational Hygiene*, 45(2), 123–135. [https://doi.org/10.1016/S0003-4878\(00\)00030-2](https://doi.org/10.1016/S0003-4878(00)00030-2)
- Malchaire, J. (2017). Evaluation of the metabolic rate based on the recording of the heart rate. *INDUSTRIAL HEALTH*, 55(3), 219–232. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2016-0177>
- Malchaire, J., Kampmann, B., Mehnert, P., Gebhardt, H., Piette, A., Havenith, G., ... Griefahn, B. (2002). Assessment of the risk of heat disorders encountered during work in hot conditions. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 75(3), 153–162. <https://doi.org/10.1007/s004200100287>
- Malchaire, J., Piette, A., Kampmann, B., Mehnert, P., Gebhardt, H., Havenith, G., ... Griefahn, B. (2001). Development and validation of the predicted heat strain model. *Annals of Occupational Hygiene*, 45(2), 123–135. [https://doi.org/10.1016/S0003-4878\(00\)00030-2](https://doi.org/10.1016/S0003-4878(00)00030-2)
- Mayer, H., & Hoppe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 38(1), 43–49. <https://doi.org/10.1007/BF00866252>
- McIntyre, D. A. (1980). Indoor climate / by D.A. McIntyre | National Library of Australia. Retrieved May 8, 2020, from Architectural science series website: <https://catalogue.nla.gov.au/Record/2932172/Details?>
- Miguel, A. S. S. . (2014). *Manual de higiene e segurança do trabalho* (13ª; P. Editora, Ed.). <https://doi.org/1>
- Moreira, C. (2015). Termorregulação. *Revista de Ciência Elementar*, 3(3). <https://doi.org/10.24927/rce2015.156>
- Mouratidis, M. (2009). *University of Thessaly School of Engineering Simulation of the human passive thermoregulation* (University of Thessaly). Retrieved from <http://194.177.202.67/bitstream/handle/11615/50095/19267.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Nadel, E. R., Mitchell, J. W., & Stolwijk, J. A. J. (1973). Differential thermal sensitivity in the human skin. *Pflügers Archiv: European Journal of Physiology*, 340(1), 71–76. <https://doi.org/10.1007/BF00592198>
- Nielsen, B. (1990). Solar heat load: heat balance during exercise in clothed subjects. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 60(6), 452–456. <https://doi.org/10.1007/BF00705036>
- Nishi, Y. Gagge, A. . (1973). *Moisture Permeation of Clothing : A Factor Governing Thermal Equilibrium and Comfort*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2115/37925>
- Nishi, Y., & Gagge, A. P. (1977). Effective temperature scale useful for hypo and hyperbaric environments. *Aviation Space and Environmental Medicine*, Vol. 48, pp. 97–107. <https://doi.org/10.1097/00006534-197801000-00129>
- Palella, B. I. (2017). On the Evolution of Thermoregulation Models. *Ergonomics International*
-



- Journal*, 1(3), 1–14. <https://doi.org/10.23880/eoij-16000118>
- Parsons, K. C. (2003). *Engineering issues in turbine machinery, power plant and renewables* (Maney, Ed.). Londres: 2003.
- Parsons, K. C. (2010). Human thermal environments. In *Human Thermal Environments* (2<sup>a</sup>). [https://doi.org/10.4324/9780203302620\\_chapter\\_8](https://doi.org/10.4324/9780203302620_chapter_8)
- Pennes, H. (1948). Applied physiology. *Journal Applied Physiology*, 17, 1865–1871. [https://doi.org/10.5005/jp/books/12678\\_10](https://doi.org/10.5005/jp/books/12678_10)
- Pickup, J., & Dear, R. D. (2000). an Outdoor Thermal Comfort Index (Out-Set\*) -Part I –the Model and Its Assumptions. *15th ICB & ICUC*, (6), 1–7. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/268983313>
- Potter, A. W., Looney, D. P., Santee, W. R., Gonzalez, J. A., Welles, A. P., Srinivasan, S., ... Xu, X. (2020). Validation of new method for predicting human skin temperatures during cold exposure: The Cold Weather Ensemble Decision Aid (CoWEDA). *Informatics in Medicine Unlocked*, 18, 100301. <https://doi.org/10.1016/j.imu.2020.100301>
- Robalo, A., & Sousa, C. (2008). *Avaliação da Incerteza na Determinação dos Índices de Conforto Térmico PMV e PPD*.
- Stolwijk, J. A. J. (1971). A mathematical model of physiological temperature regulation in man. *Stolwijk*, (Nasa CR-1855), 82. Retrieved from [http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19710023925\\_1971023925.pdf](http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19710023925_1971023925.pdf)
- Stolwijk, Jan A. J., & Hardy, J. D. (2011). Control of Body Temperature. In *Comprehensive Physiology* (pp. 45–68). <https://doi.org/10.1002/cphy.cp090104>
- Takada, S., Sakiyama, T., & Matsushita, T. (2011). Validity of the two-node model for predicting steady-state skin temperature. *Building and Environment*, 46(3), 597–604. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.09.008>
- Tanabe, S., & Kobayashi, K. (2002). Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD). *Energy and Buildings*, 34(6), 637–646. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00014-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00014-2)
- Vanos, J. K., Warland, J. S., Kenny, N. A., & Gillespie, T. J. (2010). Modelling skin temperature of a human exercising in an outdoor environment. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 129, 125–135. <https://doi.org/10.2495/SC100121>
- Vinet, L., & Zhedanov, A. (2010). A “missing” family of classical orthogonal polynomials. *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 15(1), 103–120. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>
- Watanabe, S., Nagano, K., Ishii, J., & Horikoshi, T. (2014). Evaluation of outdoor thermal comfort in sunlight, building shade, and pergola shade during summer in a humid subtropical region. *Building and Environment*, 82, 556–565. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.10.002>
- Wissler, E. H. (1964). A mathematical model of the human thermal system. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, 26(2), 147–166. <https://doi.org/10.1007/BF02476835>



## APÊNDICES A

### Programação em Python do Sistema Passivo e Ativo.

Operador Algébrico	Nome das variáveis	Unidade	Operador Python
S	Armazenamento total de calor no corpo	W/m <sup>2</sup>	S
Ssk	Armazenamento de calor na concha e na pele	W/m <sup>2</sup>	Hfsk
Scr	Armazenamento de calor do núcleo do corpo	W/m <sup>2</sup>	Hfcr
M	Produção de calor metabólico	W/m <sup>2</sup>	Rm
E	Perda total de calor por evaporação	W/m <sup>2</sup>	Ev
Eres	Perda de calor pela respiração (vapor)	W/m <sup>2</sup>	ERES
Esk	Perda total de calor por evaporação pela pele	W/m <sup>2</sup>	ESK
Ediff	Perda de vapor na pele por difusão	W/m <sup>2</sup>	Edif
Ersw	Perda por evaporação pela pele (transpiração)	W/m <sup>2</sup>	Ersw
Emax	Perda evaporativa máx. da superfície da pele	W/m <sup>2</sup>	Emax
w	Molhagem total da pele	N.D	Pwet
wrsw	Molhagem devido ao suor regulatório	N.D	Prsw
wdiff	Molhagem da pele por difusão	N.D	Pdif
W	Taxa de trabalho realizado	W/m <sup>2</sup>	W
m	Eficiência Mecânica (W/M)	N.D	WK
R+C	Perda total de calor seco	W/m <sup>2</sup>	DRY
Ta	Temperatura do ar ou Temp. do bulbo seco	°C	Ta
Twet	Temperatura do termômetro de globo	°C	Tg
Φa	Umidade relativa como uma fração	N.D	RH
Tsk	Temperatura da pele e concha	°C	Tsk
Tcr	Temperatura do corpo do núcleo	°C	Tcr
Psk	Pressão de vapor saturada na Tsk	Pa	Pssk
Pdew	Pressão de vapor saturada na Tdew	Pa	Psk
ΦaPa	Pressão de vapor no ambiente	Pa	Pa
hr	Coefficiente linear de trocar por radiação	W/m <sup>2</sup> .°C	CHR
hr	Coefficiente de trocar por radiação para roupa	W/m <sup>2</sup> .°C	CHR_r
hc	Coefficiente de transferência calor /convecção	W/m <sup>2</sup> .°C	CHC
hc	Tipo de convecção natural	W/m <sup>2</sup> .°C	chc_n
hc	Tipo de convecção forçada	W/m <sup>2</sup> .°C	chc_f
hcdyn	Coeffic. de convecção dinâmica	W/m <sup>2</sup> .°C	Hcdyn
Icl	Isolamento de roupa	clo	Clo
h	Coefficiente de transfer. de calor combinado	W/m <sup>2</sup>	h
Fcl	Fator de eficiência térmica para a roupa	N.D	fcl
Fpcl	Fator para a roupa	N.D	Fcl
Vbl	Taxa de fluxo de sangue para a pele	l/h.m <sup>2</sup>	Skbf
Kmin	Condutância térmica mínima da pele	W/m <sup>2</sup> .°C	K

<i>Operador</i>	<i>Nome das variáveis</i>	<i>Unidade</i>	<i>Operador Python</i>
<i>Algébrico</i>			
<i>c'sk</i>	<i>Capacidade térmica da concha e da pele</i>	<i>W.h/°C</i>	<i>C_sk</i>
<i>c'cr</i>	<i>Capacidade térmica do núcleo e do corpo</i>	<i>W.h/°C</i>	<i>C_cr</i>
<i>t</i>	<i>Tempo</i>	<i>s</i>	<i>t</i>
<i>DTsk</i>	<i>mudança incremental em Tsk</i>	<i>°C</i>	<i>Hfsk</i>
<i>DTcr</i>	<i>mudança incremental em Tcr</i>	<i>°C</i>	<i>Hfcr</i>
<i>Ssk</i>	<i>Sinal da pele</i>		<i>S_sk</i>
<i>(+)</i>	<i>Quando quente positivo</i>	<i>°C</i>	<i>warms</i>
<i>(-)</i>	<i>Quando frio negativo</i>	<i>°C</i>	<i>colds</i>
<i>Scr</i>	<i>Sinal do Núcleo</i>		<i>S_cr</i>
<i>(+)</i>	<i>Sinal do quente Núcleo</i>	<i>°C</i>	<i>warmc</i>
<i>(-)</i>	<i>Sinal do frio Núcleo</i>	<i>°C</i>	<i>coldc</i>
<i>Ersw</i>	<i>Taxa de secreção de suor</i>	<i>g/h.m<sup>2</sup></i>	<i>Mrsw</i>
<i>Tex</i>	<i>Temperatura do ar expirado</i>	<i>°C</i>	<i>Texp</i>
<i>Vw</i>	<i>Velocidade de caminhada</i>	<i>m/s</i>	<i>vw</i>
<i>Var</i>	<i>Velocidade relativa do vento</i>	<i>m/s</i>	<i>var</i>
<i>Aux,R</i>	<i>Constante universal com a posição do individuo</i>	<i>N.D</i>	<i>AuxR</i>
<i>Fcl,R</i>	<i>Fator de redução para a troca de calor por radiação devido ao uso de roupas.</i>	<i>N.D</i>	<i>FclR</i>
<i>Tcl</i>	<i>Temperatura na superfície da roupa</i>	<i>°C</i>	<i>(Tcl)(Tcl_0)(Tcl_1)</i>
<i>Trm</i>	<i>Temperatura radiante média</i>	<i>°C</i>	<i>Tr</i>
<i>Corr,tor</i>	<i>Correção do isolamento dinâmico da roupa</i>	<i>N.D</i>	<i>Corrtot</i>
<i>Ia,st</i>	<i>Isolamento térmico limite da camada de roupa</i>	<i>W/m<sup>2</sup>.°C</i>	<i>Iast</i>
<i>Corr,Ia</i>	<i>Correção do isolamento dinâmico térmico seco total dinâmico a 0 clo</i>	<i>N.D</i>	<i>Corria</i>
<i>Ia,dyn</i>	<i>Isolamento térmico de camada limite dinâmica</i>	<i>W/m<sup>2</sup>.°C</i>	<i>Iadyn</i>
<i>Itot,st</i>	<i>Isolamento total estático para roupas</i>	<i>W/m<sup>2</sup>.°C</i>	<i>Itotst</i>
<i>Itot,dyn</i>	<i>Isolamento térmico de camada limite dinâmica</i>	<i>W/m<sup>2</sup>.°C</i>	<i>Itotdyn</i>
<i>Icl,dyn</i>	<i>isolamento dinâmico de roupas</i>	<i>W/m<sup>2</sup>.°C</i>	<i>Icldyn</i>
<i>ADu</i>	<i>Área de superfície corporal DuBois</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	
<i>Tskp</i>	<i>Taxa de variação da temp. da (casca)</i>	<i>°C</i>	<i>T_sk</i>

*Calor específico do sangue, 1,163 W.h/Kg °C*

*Condutância da pele na ausência do fluxo sanguíneo, 5,28 W/m<sup>2</sup>*

*Temperatura da pele em estado termoneutral, 34,1 °C*

*Temperatura do núcleo em estado termoneutral, 36,6 °C*

*Massa da concha do cilindro, 3.4 Kg*

*Massa do núcleo 78.3 Kg*

*Calor específico do corpo, 0,97 W.h/Kg.°C*

*Transfêrencia de calor latente, 0,7 W.h/g*

---

## Programação em Python da ET\* e SET\*.

<i>Operador</i>	<i>Nome das variáveis</i>	<i>Unidade</i>	<i>Operador Python</i>
<i>Algébrico</i>			
<i>fcl</i>	<i>Fator de eficiência térmica para a roupa</i>	<i>N.D</i>	<i>fcle/facfs/fcles/fpcls</i>
<i>To</i>	<i>Temperatura operativa</i>	<i>°C</i>	<i>to</i>
<i>Icl</i>	<i>Isolamento do vestuário</i>	<i>clo</i>	<i>Cloe/clos/kclos</i>
<i>Pss,k</i>	<i>Pressão de vapor saturada na Tsk</i>	<i>Pa</i>	<i>Pssk</i>
<i>LR</i>	<i>Razão de Lewis</i>	<i>°C/KPa</i>	<i>Ir</i>
<i>Fpcl</i>	<i>Fator para a roupa</i>	<i>N.D</i>	<i>fpcl</i>
<i>Hsk</i>	<i>Perda de calor por evaporação pela pele</i>	<i>W/m<sup>2</sup></i>	<i>Hsk</i>
<i>ET*</i>	<i>Temperatura efetiva</i>	<i>°C</i>	<i>ET</i>
<i>Pss,ET*</i>	<i>Pressão de vapor saturada pela ET*</i>	<i>°C/Pa</i>	<i>Svp_ET</i>
<i>hr</i>	<i>Coefficiente de trocar por radiação para roupa</i>	<i>W/m<sup>2</sup>.°C</i>	<i>chrs</i>
<i>ACT</i>	<i>Taxa metabólica em função da atividade realizada</i>	<i>W/m<sup>2</sup></i>	<i>act</i>
<i>Rm</i>	<i>Taxa metabólica</i>	<i>W/m<sup>2</sup></i>	<i>M</i>
<i>hc</i>	<i>Coefficiente de trocar por convecção para roupa</i>	<i>W/m<sup>2</sup>.°C</i>	<i>chcs</i>
<i>h</i>	<i>Coefficiente de trocar de calor combinado</i>	<i>W/m<sup>2</sup>.°C</i>	<i>ctcs</i>
<i>W</i>	<i>Trabalho realizado</i>	<i>W/m<sup>2</sup></i>	<i>Wk</i>
<i>Tsk</i>	<i>Temperatura média da pele</i>	<i>°C</i>	<i>Tsk</i>
<i>SET*</i>	<i>Temperatura efetiva padrão</i>	<i>°C</i>	<i>SET</i>

```

"""
Created on Thu Apr 22 00:48:04 2020

@author: Borges, C.R.Júnior.

"""
from math import cos, sin
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from pandas import ExcelWriter
import numpy as np

# Condições iniciais do corpo humano para o equilíbrio térmico da fisiologia

def gagge_2node(M, WK, clo, Ta, Tg, va, Pa, RH, Tsk, Tcr, t, Alt, Pkg):
    Cu = 5.67e-8 # Constante universal
    Ce = .95 # coeficiente de emissividade globo 15mm
    D = 0.15 #metros
    ti=t # horas
    t=ti/60.# minuto

    # verificação do tipo de convecção.
    # Natural
    hcg_n = 1.4 * (abs(Tg - Ta)/D)**(1/4)
    # Forçada
    hcg_f = 6.3 * (va**.6/D**.4)

    # Calculo da temperatura radiante média // equação 6 da ISO 7726
    adaptação eq.15
    if hcg_n > hcg_f:
        CHC = hcg_n
        Tr = ((Tg + 273.15)**4 + 0.25e8/Ce* (abs(Tg - Ta)/D)**.25
              * (Tg - Ta)**0.25 - 273.15
    else:
        Tr = ((Tg + 273.15)**4 + 1.1e8 * va**.6/(Ce * D**.4) * (Tg - Ta)**.25
              - 273.15 # equação 8 da 7726 adapt.15
        CHC = hcg_f

    Icl = .155 * clo # transformação de clo para m^2K/W

    # Determinação do fcl a partir da recomendação da norma ISO
    7730 if Icl <= (.155 * .5):

        fcl = 1. + 1.29 * Icl
    else:
        # Determinação do clothing factor area - cde acordo com
        Icl fcl = 1.05 + .645 * Icl

    # Trocas de calor por convecção respiratória e evaporação
    # Convecção Dinâmica do Vestuário
    Vw = .0052 * (M - 58)

    # O ângulo entre a velocidade de marcha e o ar=0° se ambos na mesma direção
    alpha = 0 # 0° ou 90°
    Var = ((Vw - va * cos(alpha))**2 + (va *
    sin(alpha))**2)**0.5 if Var <=0.7:# m/s
        Hcdyn = 3.5 + 5.2 *
    Var else:

```

```

    Hcdyn = 8.7 * Var**.6
    if CHC > Hcdyn:
        Hcdyn = CHC

    posicao = 3
# ISO 9920 calculo para
    Ar/ADU if posicao == 1:
        posicao = .67
    elif posicao == 2:
        posicao = .70
    elif posicao ==
    3: posicao == .77
    AuxR = Cu *
    posicao FclR = 2

# Possui roupa térmica ou refletiva de calor? (1) para sim, (2) para
não:) if FclR == 1:
    FclR = (1 - .54) * .97 + .54 * 0.42 # Ap = .54 Fr = 0,42 ISO
9920 elif FclR == 2:
    FclR = 0
    Tc1_0 = Tr + .1

# Tc1 e coeficiente de radiação
# Determinação do isolamento dinâmico para a característica do vestuário

Iast = .7 # determinação da ISO 9920 \\clo
    if Icl <= .6:
        Corrtot = np.exp(.043 - .398 * Var + .066 * Var**2 - .378
        * Vw * .094 * Vw**2)
    else:
        Icl >= .6
        Corrtot = np.exp(-0.472 * Var * .047 * Var**2 - .342 * Vw *
        .177 * Vw**2)
    if clo <= 0.:
        Corria = Corrtot
    else:
        clo > 0.
        Corria = np.exp(.047 * Var**2 - .472 * Var + .117 * Vw**2 - .378 * Vw)
    if Icl > .6:
        Corr_IT = Corrtot
    else:
        Corr_IT = 1.044 * np.exp(.066 * Var**2 - .398 * Var + .094
        * Vw**2 - Vw)
    if Icl < .2 and clo < .6:
        Corrtot = (.6 - Icl) * Corria + Icl * Corr_IT
    Iadyn = Corria * Iast
    Itotst = Icl + (Iast/fcl)
    Itotdyn = Corrtot * Itotst
    Lcldyn = Itotdyn - (Iadyn/fcl)
    CHR_r = FclR * AuxR * ((Tc1_0 + 273.15)**4)/(Tc1_0 - Tr)
    Tc1_1 = (fcl * (Hcdyn * Ta + CHR_r * Tr) +
        Tsk/Lcldyn)/(fcl* (Hcdyn + CHR_r) + 1/Lcldyn)
    while abs(Tc1_0 - Tc1_1) > .001:
        CHR = FclR * AuxR * ((Tc1_0 + 273.15)**4)/(Tc1_0 - Tr)
        Tc1_0 = (Tc1_0 + Tc1_1)/2
        Tc1=Tc1_0

# Coeficiente de transferência calor combinado
W/m².°C h = CHC + CHR
    Fcl = (1/(1 + .155 * fcl * h * clo ))

```

```

CRES = .00152*M*(28.56+.885*Ta+.641*Pa) #ASHRAE HandBook 1997 eq 26 cap 8.4

# Calculo da perda de calor evaporativa pelos pulmões ->

ERES ERES = .00127*M*(59.34+.53*Ta-11.63*Pa)

# Troca de calor seco //# ISO 7933 eq A.19 em W/m2
DRY = fcl * (CHC * (Tcl - Ta) + CHR * (Tcl - Tr))

# Fluxo líquido de calor da (casca) pele para o núcleo.
# Resfriamento e aquecimento do núcleo e pele
Adu = .202 * Pkg**.425 * Alt**.725 # m2 \\ DuBois

# Cilindro
msk = 3.4 # massa da concha Kg
mcr = 78.3 # massa do núcleo kg
C_cr = .97 * mcr # c'cr \\ Capacidade térmica total do núcleo W.h/C
C_sk = .97 * msk # C'sk \\ Capacidade térmica total da pele W.h/C

#####

# Conversão do tempo t para horas iterações de
10s t_h = 10/60./60.
# Sistema de termoregulação
# definição do sinal para vasodilatação e
vasoconstrição for i in range(10,ti*60+1,10):
    S_cr = Tcr - 36.6 # \\ SINAL DO NUCLEO °C
    S_sk = Tsk - 34.1 # \\ SINAL DA PELE °C

# Verificação do sinal da Pele
if S_sk<0.:
    colds = -S_sk
    warms = 0.0
elif S_sk>=0.:
    colds = 0.0
    warms = S_sk

# Verificação do sinal do
Núcleo if S_cr<0.:
    coldc = -S_cr
    warmc = 0.0
elif S_cr>=0.:
    coldc = 0.0
    warmc = S_cr

# Ajustamento do calor metabólico devido ao tremor (Stolwijk e
Hardy) Rm = M + 19.4 * colds * coldc

# Programação de factores 0.5 - cold(frio) e 0.75-
warm(quente) #determinar a vasoconstrição e vasodilatação.
stric=0.5*colds
dilat=75.*warmc

# Controlo do fluxo sanguíneo da pele
Skbfn = 6.3 # quando S_sk e S_cr são iguais a 0
Skbf = (Skbfn + dilat)/(1. + stric) #\\ Litros/h.m2

# Sistema de controlo da sudção regulatória
if Rm < 60.:# at rest
    Mrs = 100. * warmc * warms
else:
    Mrs = 250. *warmc + 100. *warmc *warms #\\ g/h.m2

```



```

# Efeito de Bullard Van Beaumont, modificado por Stolwijk
Ersw = .7 * Mrsww * 2. **((Tsk - 34.1)/3.)# W/m2

# (t) tem de ser visto como o passo de cálculo tão pequeno quanto
possível if Ersw > 500:
    Wrsww =(Ersw * 2./(.7*100.))* t_h
    Psk = .6105 * np.exp(17.27 * Tsk/(Tsk + 237.3)) # \\ Bar
    Emax = 2.2 * CHC *(Psk - (RH * Pa)) * Fcl #CoeFLewis = 2.2,\\W/m2
    Pdif = (1. - Wrsww) * .06
    Prsw = Ersw/Emax
    Pwet = .06 + .94 * Wrsww # \\ N.D Edif
    = (Pwet * Emax ) - Ersw #\\ W/m2
    Edrip = (Mrsww * .68) - ((Wrsww * Emax)/.68) # \\
gramas/m2.h Ev = ERES + Ersw +Edif # \\ W/m2

    if Ersw-Emax >0.:
        Edrip = ERES + Emax
        Ev = ERES+Emax
        Ersw = Emax
        Edif = 0.
        Prsw = 1.0
        Pwet = 1.
    else:
        Emax = 0.
        Pwet = 0.

Esk = Pwet * Emax # \\E W/M2
Hfsk = (Tcr - Tsk) * (5.28 + 1.163 * Skbf) - DRY - Esk #\\ W/m2
Hfcr = Rm - (Tcr - Tsk) * (5.28 + 1.163 + Skbf) - CRES - ERES - WK # W/m2

# Cálculo central do Núcleo e Pele

T_sk = (Hfsk * Adu)/(C_sk) #\\ C/h
T_cr = (Hfcr * Adu)/(C_cr) #\\C/h
Tcrn = Tcr + (T_cr * t_h)
Tskp = Tsk + (T_sk * t_h)
Tcr = Tcrn
Tsk = Tskp
#####
Calculo temperatura efetiva ET

To = Ta+Tr/h
fcle = Fcl
Cloe = clo
Pssk = .6105 * np.exp(17.27 * Tsk/(Tsk + 237.3))

# Avaliação da transferência de calor por evaporação na superfície da
pele lr = 15.1512*((Tsk+273.15)/273.15)
fpc1 = 1./(1.+(.155/Ic1)*CHC*Cloe)
Hsk = CHC*fcle*(Tsk-To)+Pwet*lr*CHC*fpc1*(Pssk-
Pa) ET =Tsk-Hsk/(h*fcle)
svp_ET = .6105 * np.exp(17.27 * ET/(ET + 237.3))
err_ET = Hsk-h*fcle*(Tsk-ET)-Pwet*lr*CHC*fpc1*(Pssk-
svp_ET)/2 while (err_ET> -0.01 and err_ET < 0.01):
    svp_ET = .6105 * np.exp(17.27 * ET/(ET + 237.3))
# Aproximação baixa para ET* Temperatura equivalente resolvida por iteração
err_ET = Hsk-h*fcle*(Tsk-ET)-Pwet*lr*CHC*fpc1*(Pssk-
svp_ET)/2 ET = ET+ 0.1
#####

```

```

# Calculo da SET* - Temperatura efetiva padrão
# Padronização do ambiente
chrs = CHR

# Coef. Transferência de conv. padrão (caminhando levemente/ar
parado) act = Rm # w/m2
chcs = 5.66*(act/58.2-.85)**.39
#relação MET-CLOS padrão fornece SET * = 24 C quando PMV =
0 rn = Rm - WK
clos = 1.3264/(rn/58.15+.7383)-.0953
kclos = .25
facls = 1.+kclos*clos
ctcs = CHR+chcs
cloes = clos-(facls-1)/(.155*facls*ctcs)
fcles = 1./(1+.155*ctcs*cloes)
fpcls = 1./(1+(.155/.45)*chcs*cloes)
SET = Tsk-Hsk/ctcs*fcles
svp_SET = .6105 * np.exp(17.27 * SET/(SET + 237.3))
err_SET = Hsk-ctcs*fcles*(Tsk-SET)-Pwet*lr*chcs*fpcls*Pssk-.5*svp_SET
while (err_SET > -0.001 and err_SET < 0.00): #testa outras formas de fazer a condiç
ão.
    svp_SET = .6105 * np.exp(17.27 * SET/(SET + 237.3))
# Aproximação baixa para SET* resolvida por iteração
err_SET = Hsk-ctcs*fcles*(Tsk-SET)-Pwet*lr*chcs*fpcls*Pssk-
.5*svp_SET SET = SET+ 0.1

return [SET, ET, Tskp, Tcrn]
#####

#“ATENÇÃO” o programa só está preparado para 1 valor inicial de Tsk e Tcr.
#Sequência de importação de dados
excel_file = 'Dados_de_entrada.xlsx'
data_sheet1 = pd.read_excel(excel_file, sheet_name= 0)
data = data_sheet1.to_numpy()
clo = 0.6
Pa = 1.0009 #\ 1 atm padrão nivel padrão
Alt= 1.77 #\ metros
Pkg= 87.#\ massa
Tsk = 28.1 # Tsk = 34.1 fronteira inicial -
Tcr = 36.0# Tcr = 36.6 for thermoneutral start
t = 5 # t é o valor inicial para o passo de cálculo com interação para 5 min.
M = 80. #//W/m2
Ta = data[:,1]
Tg = data[:,0]
va = data[:,2]
RH = data[:,4]
""" Ciclo iterativo de cálculo com exportação de dados
"""
Indexes = [['SET', 'ET', 'Tsk', 'Tcr']] # variáveis de saída do banco de dados

for i in range(len(Ta)):
    Indexes.append(gagge_2node(M, 0, clo, Ta[i], Tg[i], va[i], Pa,
    RH[i], Tsk, Tcr, t, Alt, Pkg))
    Tsk = Indexes[i+1][0]
    Tcr = Indexes[i+1][1]
Indexes = pd.DataFrame(Indexes)
# Data write in Excel File - To test
with ExcelWriter('Resultados_importados.xlsx') as writer:
    Indexes.to_excel(writer, sheet_name='Sheet1')

```

## 8 APÊNDICES B

Tabela 8.1 – Essenciais características obtidas das publicações elegíveis

Ano	País	Autor	Título	Objetivo	Estado	Metodologia	Resultados
2019	Romênia	Enescu, Diana	Modelos e indicadores para avaliar a sensação térmica em condições de estado estacionário e transitório	A avaliação da sensação térmica, abordar o conforto térmico e estabelecer os critérios utilizados em ambientes internos e externos.	Ambiente estacionário e transitório	Revisão dos modelos racionais e discursões	Levantamento e comparação dos modelos racionais
2019	Os países baixos	Roelofsen, Paul	Uma comparação da sensação térmica dinâmica entre o modelo de Stolwijk (FPC) de Fiala	Comparação de modelos termofisiológicos, apresentado por Stolwijk e Fiala. Aumentando variáveis na Tsk e uso de vestuário.	Ambiente homogêneo, heterogêneo e transitório	Modelagem matemática Fiala e Stolwijk	Reprodução do modelo.
2019	China	Ka-Lun Lau. et.al	Resposta dinâmica do conforto térmico de pedestres em condições externas transitórias	Compreensão do conforto térmico dinâmico usando um levantamento longitudinal que foi realizado para obter informações sobre a sensação térmica.	Ambiente estacionário e transitório	Coletas de dados por uma estação meteorológica portátil e sondas ambientais (Ta, Tr, Hr, Ha, v).	Medição da PET e do TSV por percepção térmica através de votos.
2017	USA e China	Lai, Dayi. et.al	Modelagem da sensação térmica dinâmica de seres humanos em ambientes externos	Monitorar a Tsk dos sujeitos, registrar suas sensações através de parâmetros ambientais ao ar livre.	Transitório	Coletar dados por meio de testes com seres humanos em espaços ao ar livre.	Reprodução do modelo e validação.
2016	Os países baixos	Catarina, Katic	Modelos termofisiológicos e suas aplicações: uma revisão	Realizar uma revisão dos modelos termofisiológicos existentes para todo o corpo.	Estacionário e transitório	Revisão dos modelos racionais e discursões	Comparação
2014	Os Países Baixos	Katic. et.al	Modelos termofisiológicos: uma primeira comparação	Explicar como os modelos foram usados para avaliar a sensação térmica em estado estacionário	Estacionário e transitório	Revisão dos modelos racionais e discursões	Comparação
2014	Grécia		Modelagem dinâmica do conforto térmico humano após a transição de um ambiente quente	Investigar o processo de adaptação térmica dinâmica de um indivíduo humano, após sua transição de um clima interno			Observou a Tsk do indivíduo em função do tempo, em 3 cenários

Ano	País	Autor	Título	Objetivo	Estado	Metodologia	Resultados
		Katavoutas, G.	para um ambiente quente ao ar livre	típico para um ambiente quente ao ar livre.	Ambiente Transitório	Modelo dinâmico de dois nós (IMEM)	diferentes por simulação em câmara microclimática.
2012	Brasil	Bröde, P.	Prevedendo o conforto térmico urbano ao ar livre pelo Universal Thermal Climate Index UTCI - um estudo de caso no sul do Brasil	Aplicação dos modelos gerais de aditivos para estudar o impacto da temperatura, umidade e do vento, pelo desenvolvido Universal Thermal Climate Index (UTCI)	Estacionário e transitório	Modelo dinâmico (UTCI)	Observações de 944 homens e 710 mulheres com idades entre 13 e 91 anos. Analisamos ainda os votos de sensação térmica em comparação com as previsões de UTCI.
2012	Alemanha	Fiala, D.	Modelo de múltiplos nós UTCI-Fiala de transferência de calor humano e regulação de temperatura.	O modelo foi usado para prever a temperatura humana e respostas regulatórias para combinações das condições climáticas predominantes no exterior	Estacionário e transitório	Modelo dinâmico (UTCI)	O sistema termorregulatório foi analisado por meio de regressão, por dados obtidos de ensaios fisiológicos que cobrem estresse frio e outros.
2011	Reino Unido	Cheng, Vicky. et .al	Estudo do conforto térmico ao ar livre em um clima subtropical: um estudo longitudinal baseado em Hong Kong	Condições de vento e radiação solar na sensação térmica. Ele examina o uso (PMV) no contexto externo e ilustra o uso de um índice térmico alternativo (PET)	Transitório	Estação meteorológica portátil e sondas ambientais (Ta, Tr, Hr, Ha, v), considerando a radiação solar	Comparação dos TSV em diferentes indivíduos.
2010	Canada	Vanos, J.K	Modelagem da temperatura da pele de um ser humano se exercitando em um ambiente externo	Melhorar a precisão das previsões da temperatura média da pele (Tsk) em modelos de conforto térmico humano, especificamente o modelo externo COMFA	Ambiente transitório	Modelo dinâmico (COMFA)	Análise em 12 indivíduos durante 30 minutos de ativ. física em estado estacionário, em 2 ocasiões separadas. Com variáveis psicológicas e fisiológicas .
2005	Turquia	Kaynakli, O.	Investigação do conforto térmico interno em condições transitórias	Neste estudo, um modelo matemático de interação térmica entre o corpo humano e o meio ambiente foi estabelecido e o efeito da roupa e da velocidade do ar foi examinado em condições transitórias	Ambiente Transitório	Modelo dinâmico Gagge (Two-Node)	Determinar a transferência de calor e massa entre o corpo e o ambiente e também o CT. Durante o período de 1 h, fpor perda de calor (E, R, C).
2003	USA	Givoni, B.	Questões de pesquisas de conforto ao ar livre	Discute questões metodológicas e realiza problemas na pesquisa de conforto térmico ao ar livre,	Ambiente	Modelo de sensação térmica	Verificaram a sensação térmica durante 5 h, na sombra e no sol e traçaram dados

Ano	País	Autor	Título	Objetivo	Estado	Metodologia	Resultados
				efeitos relativos da Ta, RG e Va, e sensação térmica.	Transitório		fisiológicos em relação a Temperatura do ar
2002	Japão	Tanabe, S.	Avaliação do conforto térmico usando termorregulação combinada de vários nós e (CFD)	Desenvolvido com base no modelo de Stolwijk. O modelo possui 16 segmentos corporais correspondentes ao manequim térmico, composto por 4 camadas.	Ambiente Estacionário e transitório	Modelo dinâmico (65MN)	Foi estabelecida a técnica para avaliar o condorto térmico por análise combinada abrangente com 65MN, modelo de radiação e CFD. Aplicado em carros.
2001	Reino Unido	Fiala, D.	Previsão por computador de respostas termorregulatórias e de temperatura humanas a uma ampla gama de condições ambientais	Manequim térmico, cada um composto por quatro camadas para núcleo, músculo, gordura e pele.	Ambiente Estacionário e transitório	Modelo dinâmico (UTCI)	Análise de regressão revelou que a Tsk da cabeça afeta as respostas regulatórias de maneira não linear. A taxa de alteração da Tsk ponderada pelo sinal de erro de Tsk.
1997	Polônia	Blazejczyk, K.	Radiação solar e fisiologia térmica no homem	Apresentar resultados de estudos experimentais que tratam da influência da RG na fisiologia térmica do homem ao ar livre.	Ambiente Transitório	Observação imediata da resposta da temperatura da pele	A maior absorção de radiação solar no homem foi observada em Kglob de cerca de 700 W m <sup>-2</sup> , o que está associado à geometria solar.
1972	USA	Gagge, A.P	Uma escala de temperatura efetiva baseada em um modelo simples de resposta regulatória fisiológica humana	Desenvolver uma escala de temperatura ambiental com base em nosso conhecimento atual da fisiologia da regulação do calor ao conforto térmico, sensação de temperatura e saúde.	Ambiente estacionário e transitório	Modelo dinâmico o (Two-Node)	Como índice numérico, a escala de temperatura será definida em termos de Tg, e RH normal e será comparável às Ta naturais, que geralmente são experimentadas em climas temperados.
1971	USA	Stolwijk, J.	Modelo matemático de regulação fisiológica da temperatura no homem	Apresentado para a regulação fisiológica da temperatura corporal do homem. Cada nó possui a produção metabólica de calor apropriada, troca de calor convectiva com os compartimentos centrais do sangue e troca de calor condutiva.	Ambiente estacionário e transitório	Modelo dinâmico original (25N)	Um total de 25 nós, são usados para representar as características térmicas do corpo, com quatro nós. Os nós externos representam a pele e trocam calor com o meio ambiente.

<b>Ano</b>	<b>País</b>	<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Estado</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Resultados</b>
1964	USA	Wissler, E.	Um modelo matemático do sistema térmico humano	Simular as características físicas do sistema térmico humano no estado transitório. Parâmetros fisiológicos	Ambiente estacionário e transitório	Modelo dinâmico original (Wissler)	Técnicas de diferença finita foram usadas para resolver a equação de condução de calor em um computador Control Data Corporation 1604.

## 9 APÊNDICES C

Os procedimentos adotados incluíram medições dos parâmetros ambientais (temperatura do ar, temperatura de globo, umidade relativa, velocidade do vento, temperatura radiante média e Pressão de vapor médio de 1.00090 Pa) . O laboratório onde o estudo foi simulado está situado em Portugal, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Os Vestuários utilizados foram dimensionados de acordo com a ISO 9920 (2007) e atribuído aos valores como o somatório dos valores atribuídos as peças de vestuário para a determinação do índice de isolamento do vestuário igual a 0,6 clo, a padronização e estabilização da estação microclimática foram determinados pela ISO 7730 (2005), o ambiente foi determinado como homogêneo. Os ensaios realizados na câmara climática foram monitorizados a valores reais a cada 15 segundos para estabelecer um ambiente neutro, e depois para aplicação no modelo em estudo com interação de resposta a cada 5 minutos. A figura 9.1 reporta o procedimento para início da simulação.



Figura 9.1 Medição em câmara climática, laboratório do PROA

Tabela 9.1 – Valores estatísticos das variáveis em simulação para um ambiente termo

Pontos	Tg °C	Ta °C	Pr hpa	RH %	Va m/s	Tr °C
<b>MÍNIMO</b>	24,50	23,80	1006,40	50,70	0,03	24,00
<b>MÈDIO</b>	25,82	25,48	1009,64	52,80	0,14	26,33
<b>MÀXIMO</b>	26,20	25,90	1012,00	56,00	0,37	27,10
<b>DESVIO PADRÃO</b>	0,33	0,42	2,40	0,75	0,07	0,37





---

## 10 ANEXO A

Resultados apresentado no modelo de StolWijk (1971).

Tabela 10.1 – Dados de saída dos coeficientes de transferência de calor apresentado por (J. A. J. Stolwijk, 1971).

Segmento	(Hr) Coeficiente de transferência radiação	(Hc) Coeficiente de transferência por convecção	(H) Coeficiente combinado
Cabeça	5.5	2.75	8.25
Tronco	4.5	2.15	6.65
Braços	4.3	3.0	7.30
Mãos	3.0	3.35	6.35
Pernas	4.0	2.75	6.75
Pés	4.0	3.0	7.0

---

As abreviações para as seguintes variáveis: TIME, em minutos; S: taxa de armazenamento de calor em W/ m<sup>2</sup>; M: produção de calor metabólico em W/ m<sup>2</sup>; EV: perda total de calor por evaporação W/ m<sup>2</sup>; TB: temperatura corporal média ponderada em °C; TS: temperatura média ponderada da pele em °C; TH: temperatura do núcleo da cabeça representando a temperatura hipotalâmica em °C; TO: temperatura de compartimento sanguíneo central, representando temperatura esofágica em °C; TR: temperatura central do tronco representando a temperatura retal em °C; MT: temperatura do compartimento muscular da perna em CO; SBF: fluxo sanguíneo total da pele em l/ min; CO: débito cardíaco estimado em minutos; COND: condutância térmica equivalente do núcleo à pele, W/m<sup>2</sup>.h.°C; PWET: percentagem da superfície da pele uma área molhada para a taxa de suor e as condições ambientais fornecidas

Tabela 10.2 Dados de saída do sistema termofisiológico do modelo de 25 nós para os homens. (J. A. J. Stolwijk, 1971)

tempo (min)	S	M	EV	TB	TS	TH	TO	TR	TM	SBF	CO	COND	PWET
5	2.0	40.2	7.6	35.75	33.89	36.98	36.77	36.93	35.30	0.10	4.68	12.1	2.6
10	1.9	39.9	7.6	35.76	33.85	37.01	36.81	36.97	35.30	0.10	4.67	11.7	2.6
15	1.8	39.5	7.5	35.76	33.82	37.05	36.84	37.01	35.30	0.10	4.66	11.4	2.6
20	1.8	39.4	7.5	35.77	33.80	37.08	36.87	37.04	35.30	0.10	4.65	11.2	2.6
25	1.9	39.4	7.5	35.77	33.79	37.10	36.89	37.06	35.30	0.10	4.65	11.0	2.6
30	1.9	39.4	7.5	35.78	33.78	37.12	36.91	37.08	35.30	0.10	4.65	10.9	2.6
35	82.9	39.4	38.8	36.05	36.1	37.12	36.90	37.15	35.38	0.51	5.06	-56.0	34.9
40	55.2	39.4	63.6	36.24	36.48	37.22	37.01	37.24	35.57	0.78	5.33	-33.1	55.9
45	41.0	39.4	77.4	36.35	36.53	37.31	37.08	37.30	35.77	0.98	5.53	-6.0	67.7
50	31.9	39.4	86.2	36.45	36.57	37.38	37.13	37.34	35.94	1.16	5.71	10.3	73.8
55	26.4	39.4	91.5	36.52	36.59	37.42	37.16	37.36	36.08	1.26	5.82	19.8	77.6
60	23.2	39.4	94.6	36.59	36.61	37.44	37.18	37.38	36.21	1.32	5.88	25.4	79.8
65	21.2	39.4	96.5	36.65	36.63	37.46	37.20	37.40	36.31	1.37	5.92	29.1	81.0
70	19.3	39.4	98.2	36.70	36.66	37.48	37.22	37.42	36.40	1.41	5.97	32.8	82.0
75	17.8	39.4	99.6	36.75	36.68	37.49	37.23	37.43	36.48	1.45	6.00	35.7	82.8
80	16.6	39.4	100.7	36.80	36.69	37.51	37.24	37.45	36.56	1.48	6.04	38.3	83.5
85	15.4	39.4	101.7	36.84	36.71	37.52	37.26	37.46	36.63	1.51	6.07	40.7	84.1
90	14.2	39.4	102.8	36.88	36.73	37.53	37.27	37.47	36.69	1.55	6.10	43.1	84.7
95	13.3	39.4	103.6	36.92	36.74	37.54	37.28	37.48	36.74	1.57	6.13	44.8	85.2
100	12.2	39.4	104.6	36.95	36.75	37.56	37.29	37.49	36.80	1.61	6.16	47.0	85.7
105	11.5	39.4	105.4	36.98	36.76	37.57	37.30	37.50	36.83	1.63	6.18	48.5	86.2
110	10.6	39.4	106.2	37.01	36.77	37.57	37.31	37.51	36.87	1.66	6.21	50.2	86.7
115	10.6	39.4	106.7	37.04	36.78	37.58	37.32	37.52	36.91	1.67	6.23	51.4	87.0
120	9.3	39.4	107.3	37.07	36.79	37.59	37.33	37.53	36.94	1.69	6.25	52.7	87.3
125	8.7	39.4	107.8	37.09	36.79	37.60	37.33	37.53	36.97	1.71	6.26	53.8	87.6
130	8.2	39.4	108.3	37.11	36.80	37.61	37.34	37.54	37.00	1.73	6.28	54.8	87.9
135	7.5	39.4	109.0	37.13	36.81	37.61	37.34	37.55	37.02	1.75	6.30	56.1	88.3
140	7.1	39.4	109.4	37.15	36.81	37.62	37.35	37.55	37.05	1.76	6.31	57.0	88.6
145	6.6	39.4	109.8	37.17	36.82	37.62	37.35	37.56	37.07	1.77	6.33	57.8	88.8
150	6.2	39.4	110.2	37.18	36.82	37.62	37.36	37.56	37.09	1.79	6.34	58.6	89.0
155	-70.2	39.4	70.4	36.92	35.09	37.63	36.99	37.16	37.04	0.92	5.47	55.8	37.6
160	-37.1	39.4	39.0	36.79	34.89	37.39	36.94	37.12	36.93	0.55	5.11	35.9	20.3
165	-26.0	39.4	28.5	36.71	34.80	37.23	36.93	37.12	36.82	0.44	4.99	29.3	14.4
170	-18.9	39.4	24.0	36.64	34.71	37.18	36.94	37.12	36.71	0.38	4.93	25.9	11.9
175	-70.6	39.4	22.5	36.59	34.64	37.16	36.94	37.12	36.63	0.34	4.89	24.0	11.0
180	-17.1	39.4	21.3	36.55	34.56	37.17	36.94	37.12	36.55	0.31	4.86	22.4	10.5
185	-15.8	39.4	20.5	36.50	34.48	37.17	36.94	37.13	36.47	0.29	4.84	21.2	10.0
190	-14.6	39.4	19.6	36.46	34.43	37.17	36.94	37.13	36.41	0.27	4.83	20.2	9.6
195	-13.5	39.4	18.9	36.42	34.38	37.17	36.94	37.13	36.35	0.26	4.81	19.4	9.1
200	-12.5	39.4	18.2	36.39	34.34	37.17	36.94	37.13	36.30	0.25	4.80	18.7	8.8
205	-11.5	39.4	17.5	36.35	34.29	37.17	36.94	37.13	36.24	0.24	4.79	18.0	8.4
210	-10.7	39.4	16.9	36.33	34.27	37.17	36.94	37.13	36.20	0.23	4.79	17.5	8.0

---

Resultados apresentado no modelo de Gagge (1972).

Tabela 10.3– Dados de saída da simulação por atividade do modelo de dois nós. Fonte Adaptada (Gagge, 1972)

Variável	Unidades	Tipo de atividade					
		A	B	C	D	E	F
M	W/m <sup>2</sup>	58,2	130,1	130,1	233	233	291
hr	W/m <sup>2</sup> C	5,23	5,23	5,23	5,23	5,23	5,23
hc	W/m <sup>2</sup> C	2,91	4,30	2,91	6,8	10,00	5,37
h	-	8,14	9,53	8,14	12,03	15,23	10,60
Icl	clo	0,6	0,6	0,0	0,1#	0,1	0,1
μ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2

# ⇒ Roupas atléticas para ambiente interno

A ⇒ Vestido e sedentário

B ⇒ Atividade moderada

C ⇒ Despido e sedentário

D ⇒ 1.3 m/s em esteira

E ⇒ 1.3 m/s caminhando livre

F ⇒ Bicicleta ergonômica 5.23 m/s

A Tabela 10.4 aborda os efeitos da Temperatura ambiente em diferentes condições de conforto térmico para atividades consideravelmente leves ou sedentárias, com o coeficiente de transferência aplicável a sujeitos sem roupa indicado no cabeçalho da coluna por (h'e) e a relação do isolamento térmico.

Tabela 10.4 – Índices de Transferências de calor durante o conforto térmico sedentário (Nishi & Gagge, 1977)

ACT (1)	Variação de conforto	hr (2)	hc (2)	h (2)	LR (3)	he (4)	Icl <sub>e</sub> (5)	Fcl <sub>e</sub> (6)	Fpcl (6)	h' (2)	h'e (4)
0,8	26-31	4,5	1,6	6,1	6,7	10,8	0,51	0,67	0,89	4,1	97
1,1	22-26	4,45	2,15	6,6	6,7	14,2	0,52	0,65	0,86	4,3	12,3
1,1	21,5-25,5	4,4	2,8	7,2	3,3	9,2	0,53	0,62	0,82	4,6	7,6
0,8	25-29	4,5	2,9	7,4	2,2	6,4	0,53	0,62	0,81	4,6	5,3
0,8	25-29	4,5	3,0	7,5	2,2	6,6	0,53	0,61	0,81	4,6	5,4
1,1	22-25,5	4,5	3,3	7,8	2,2	7,2	0,53	0,61	0,80	4,8	5,8
1,1	22,5-25,5	4,5	5,2	9,6	0,72	3,8	0,54	0,55	0,71	5,3	2,7
1,1	24,5-26	4,5	9,9	14,4	0,22	2,2	0,56	0,44	0,55	6,4	1,2
1,1	25,5-27	4,5	19,7	24,2	0,15	3,0	0,58	0,31	0,37	7,6	1,2
1,1	27,5-29	4,5	35,4	39,9	0,05	1,8	0,59	0,21	0,25	8,6	0,5
1,1	29,7-30,7	4,6	63,3	67,9	0,02	1,0	0,59	0,13	0,15	9,4	0,2

(1) 1 MET = 58.8 W/m<sup>2</sup>

(2) W/m<sup>2</sup>.°C

(3) °C/torr

(4) W/m<sup>2</sup>.torr

(5) 1 clo = 0.155 m<sup>2</sup> C/W

(6) N.d. Icl 0.6

A Tabela 10.5 apresenta os valores referente as trocas de calores vaporizadas do pulmão, a perda de água da pele por difusão, além de demonstrar a uma medida direta do poder evaporativo do ambiente para a umidade ou para o suor acumulado do corpo. Faz-se uma análise da troca de calor seco da superfície da pele para o ambiente na temperatura do ar, o balanço de calor e as propriedades fisiológicas essenciais durante o conforto e o equilíbrio térmico. Essas temperaturas situam-se aproximadamente no meio da faixa provável ou no equilíbrio térmico e no conforto de um sujeito sedentário e em repouso enquanto normalmente está vestido.

Tabela 10.5 – Índices de Transferências de calor durante o conforto térmico sedentário (Nishi & Gagge, 1977)

ACT (1)	Pb	Ta (2)	Tsk (2)	M (3)	Eres (3)	Cres (3)	DRY (3)	Ediff (3)	Ersw (3)	Regsw (4)	Emax (3)	w (5)	SKBF (6)	Tb (2)
0.8	0.33	27.0	33.6	46.5	-3.2	-0.1	-26.9	-14.7	-1.4	2.2	247	0.06	7.7	36.35
1.1	0.33	24.0	32.97	64.0	-4.8	-0.2	-38.1	-19.5	-1.2	1.8	325	0.06	9.2	35.35
1.1	0.67	23.2	33.0	64.0	-4.8	-0.6	-44.2	-12.2	-1.9	4.6	207	0.06	9.3	36.36
0.8	1	26.1	33.6	46.5	-3.3	-0.5	-34.0	-8.2	-0.3	0.5	138	0.06	7.5	36.34
0.8	1	26.2	33.6	46.5	-3.3	-0.5	-33.7	-8.3	-0.4	0.6	141	0.06	7.5	36.34
1.1	1	23.0	33.0	64.0	-4.9	-0.9	-47.4	-9.3	-1.5	2.3	158	0.07	9.2	36.36
1.1	3	23.8	33.1	64.0	-4.8	-2.7	-50.0	-4.3	-2.2	3.3	75	0.08	9.2	36.35
1.1	10	25.9	33.4	64.0	-4.6	-7.1	-46.8	-1.6	-3.7	5.4	31	0.17	9.2	36.35
1.1	10	26.5	33.2	64.0	-4.5	-4.7	-57.4	-1.6	-1.8	2.7	29	0.11	8.9	36.36
1.1	30	28.2	33.4	64.0	-4.3	-	-45.6	-0.5	-2.7	5.1	11	~0.29	8.6	36.36
1.1	90	30.2	33.9	64.0	-4.1	-	-34.9	0	-3.6	5.2	4	~0.90	7.6	36.37

(1) 1 MET = 58.8 W/m<sup>2</sup>

(2) °C

(3) W/m<sup>2</sup>

(4) g/m<sup>2</sup>. h

(5) N.d.

(6) l/m<sup>2</sup>.h

V ~0.1; V 0.15 m/s

Tabela 10.6 Fatores fisiológicos associados ao ambiente padrão (Nishi & Gagge, 1977)

SET (°C)	Tsk (°C)	*Tcr (°C)	**Tb (°C)	REGSW (g/m <sup>2</sup> .h)	SKBF (l/m <sup>2</sup> .h)	Molhagem (N.D)	Mets (W/m <sup>2</sup> )
10	27.34	36.55	33.90	0.0	1.4	0.06	70.1
14	28.53	36.59	34.55	0.0	1.6	0.06	64.4
18	30.19	36.61	35.63	0.0	3.1	0.06	64.0
22	32.54	36.64	36..27	0.0	7.6	0.06	64.0
26	33.69	36.65	36.44	20	13	0.14	64.0
30	34.55	36.68	36.55	45	19	0.25	64.0
34	35.20	36.75	36.67	73	29	0.41	64.0
38	35.70	36.83	36.78	103	42	0.65	64.0
42	36.32	37.00	36.97	158	68	1.00	64.0

\* Tcr aqui simula a temperatura esofágica.

\*\* O fator de ponderação para Tsk em Tb varia inversamente com o SKBF; por exemplo, a 10 °C SET, a ponderação é de 0.4; a 22°C á SET é de 0.1; a 42 °C á SET é de 0,05.

## 11 ANEXO B

Os dados em análise do ambiente exterior foram adquiridos através de um estudo de Tese de Doutorado da Universidade de São Paulo (USP) e um artigo oriundo desse estudo realizado pela autora Hirashima (2017; 2016), as análises foram realizadas em Belo Horizonte – MG no sudeste do Brasil, caracterizado como clima tropical de altitude com verões quentes e úmidos e invernos frios e secos. Com auxílio de uma estação microclimática exposta em duas praças no centro da cidade, durante as duas estações do ano, verão e inverno, a variação média da temperatura do ar ficou entre 20 °C à 40 °C, a umidade relativa do ar teve uma oscilação entre 42% à 70%, a pressão saturada de vapor utilizada correspondeu a 1 atm ao nível do mar, sendo de 1.011325 Pa, o isolamento do vestuário  $I_{cl}$  corresponde a 0.6 clo com o fator da roupa  $f_{cl}$  de aproximadamente 1,1 N.d. Foram coletados dados de informações dos indivíduos através de formulários que eram aplicados durante o dia que questionavam a preferência térmica dos indivíduos como a aceitabilidade do ambiente térmico e acústico, foram entrevistado 1.700 pessoas de gêneros diferentes, o tratamento dos dados foram realizados por regressões, correlações e análise descritivas. A tabela 11.1 demonstra os valores médios dos parâmetros ambientais aplicado no estudo da autora e aproveitado na reprodução do modelo apresentado nessa Dissertação, que por motivo de COVID-2019 inviabilizou o levantamento de dados para uma possível análise.

Tabela 11.1 – Medição dos parâmetros climáticos no verão e inverno . Fonte Adaptada (Hirashima & Assis, 2017).

Levantamento de campo: Março de 2013 Estação do ano: Verão													
(1) medição no sol e (2) medição na sombra.													
Pontos	Ta °C 1	Ta °C 2	RH % 1	RH % 2	Tg °C 1	Tg °C 2	Va m/s 1	Va m/s 2	Tr °C 1	Tr °C 2	PET °C 1	PET °C 2	
MÍN	24,20	23,70	45,80	49,50	24,90	24,30	0,20	0,00	25,40	25,00	23,10	23,30	
MÉD	29,83	28,25	54,44	57,15	31,89	28,90	1,30	0,69	40,54	30,84	33,38	28,73	
MÀX	33,60	31,00	74,20	76,40	36,60	31,60	4,70	2,50	64,80	35,60	41,40	32,00	
AMP.	9,40	7,30	28,40	26,90	11,70	7,30	4,50	2,50	39,40	10,60	18,30	8,70	
DP	2,72	2,20	8,02	7,61	3,31	2,20	1,11	0,40	9,31	2,37	4,68	2,46	
CV (%)	9,14	7,80	14,74	13,32	10,40	7,60	85,71	58,19	22,98	7,67	14,03	8,55	
Levantamento de campo: Julho de 2013 Estação do ano: Inverno													
(1) medição no sol e (2) medição na sombra.													
Pontos	Ta °C 1	Ta °C 2	RH % 1	RH % 2	Tg °C 1	Tg °C 2	Va m/s 1	Va m/s 2	Tr °C 1	Tr °C 2	PET °C 1	PET °C 2	
MÍN	15,50	17,40	42,80	48,50	18,00	17,60	0,10	0,00	19,60	17,90	14,30	16,20	
MÉD	22,39	21,12	52,54	55,87	24,07	21,53	1,13	0,26	30,91	22,23	23,10	21,10	
MÀX	25,80	23,50	61,50	62,10	29,20	24,60	3,40	0,90	52,30	26,80	31,34	25,60	
AMP.	8,30	6,10	18,70	13,60	11,20	7,00	3,30	0,90	32,70	8,90	17,10	9,40	
DP	2,25	1,91	5,10	4,27	2,59	2,00	0,73	0,17	8,10	2,10	3,80	2,49	
CV (%)	10,04	9,06	9,71	7,65	10,76	9,28	64,22	64,90	26,20	9,45	16,44	11,80	

