



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
Faculdade de Engenharia Mecânica

**THATIANA JÉSSICA DA SILVA RIBEIRO**

# **Análise exergética do sistema térmico do corpo humano para avaliação de conforto térmico**

CAMPINAS

2018

THATIANA JÉSSICA DA SILVA RIBEIRO

# **Análise exergetica do sistema térmico do corpo humano para avaliação de conforto térmico**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestra em Engenharia Mecânica, na Área de Térmica e Fluídos

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Keutenedjian Mady

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA Thatiana Jéssica da Silva Ribeiro, E ORIENTADA PELO PROF. DR. Carlos Eduardo Keutenedjian Mady.

.....  
ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS  
2018

**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** CAPES, 33003017

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2783-8108>

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

R354a Ribeiro, Thatiana Jéssica da Silva, 1992-  
Análise exergetica do sistema térmico do corpo humano para avaliação de conforto térmico / Thatiana Jéssica da Silva Ribeiro. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Carlos Eduardo Keutenedjian Mady.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Exergia. 2. Sistemas biológicos. 3. Corpo humano. 4. Conforto térmico. I. Mady, Carlos Eduardo Keutenedjian, 1984-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

#### Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Exergy analysis assessment of the human body thermal system to evaluate thermal comfort

**Palavras-chave em inglês:**

Exergy

Biological systems

Human body

Thermal comfort

**Área de concentração:** Térmica e Fluídos

**Titulação:** Mestra em Engenharia Mecânica

**Banca examinadora:**

Carlos Eduardo Keutenedjian Mady [Orientador]

Waldyr Luiz Ribeiro Gallo

Cyro Albuquerque Neto

**Data de defesa:** 15-02-2018

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENERGIA**  
**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO**

**Análise exérgica do sistema térmico do corpo humano para avaliação de conforto térmico**

Autor: Thatiana Jéssica da Silva Ribeiro

Orientador: Carlos Eduardo Keutenedjian Mady

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

---

**Prof. Dr. Carlos Eduardo Keutenedjian Mady**  
**DE/FEM/UNICAMP**

---

**Prof. Dr. Waldyr Luiz Ribeiro Gallo**  
**DE/FEM/UNICAMP**

---

**Prof. Dr. Cyro Albuquerque Neto**  
**FEI**

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 15 de Fevereiro de 2018.

## Agradecimentos

À toda minha família, especialmente o meu pai (*in memoriam*) e minha mãe que sempre investiram na minha educação, colocando isso acima de muitas outras coisas em suas vidas.

Ao meu namorado, Deângeli, que tem estado ao meu lado me apoiando e ajudando desde a graduação e que investiu na carreira acadêmica vindo juntamente comigo para a cidade de Campinas cursar o mestrado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Eduardo Keutenedjian Mady pela sua dedicação em realizar este estudo de mestrado comigo, sempre disponível e interessado em ajudar, tendo por muitas vezes me feito perceber o meu potencial e o desse estudo em momentos no qual nem eu mesmo percebia.

Aos membros das bancas de qualificação e defesa, Prof. Dr. Waldyr Luiz Ribeiro Gallo e Prof. Dr. Cyro Albuquerque Neto pelas recomendações dadas a fim de melhorar este trabalho.

Aos amigos e amigas de mestrado/doutorado da FEM pelos inúmeros cafés nos quais compartilhávamos as tristezas e também as felicidades da vida acadêmica. Um obrigado especial as amigas Nayara e Juliana que na etapa final ajudaram a salvar meus resultados, me emprestando seus computadores por muitos dias para rodar o programa que, inesperadamente, ficou extremamente robusto.

Às minhas amigas da minha cidade de origem, Natal, que desde os tempos de ensino médio também, embora distantes, estejam sempre torcendo por mim e me escutando nos momentos de desabafos e incertezas.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro concedido durante todo o mestrado.

## Resumo

RIBEIRO, Thatiana Jéssica da Silva. Análise exergética do sistema térmico do corpo humano para avaliação de conforto térmico. 2018. 150p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

A aplicação de conceitos termodinâmicos em sistemas biológicos, como o corpo humano, tem sido amplamente utilizada como forma de possibilitar um melhor entendimento acerca de seu funcionamento. Do ponto de vista da Primeira Lei da Termodinâmica, é inferido que toda energia gerada no corpo humano deve ser conservada. Entretanto, o funcionamento do corpo humano ocorre devido a um conjunto de processos que inevitavelmente apresentam irreversibilidades, portanto uma certa quantidade de entropia é sempre gerada. Dessa forma, para promover a avaliação de um sistema como o corpo humano é muito importante que sejam utilizados os conceitos da Primeira Lei da Termodinâmica conjuntamente com a Segunda Lei da Termodinâmica, gerando portanto a análise exergética. Diversos modelos representativos do corpo humano têm sido desenvolvidos e a análise exergética aplicadas à esses modelos possibilitam a avaliação da qualidade dos processos de conversão de energia que acontecem nele. A análise exergética do corpo humano considera não só os fenômenos fisiológicos, como também as interações entre o corpo humano e o ambiente. Portanto os parâmetros ambientais podem ser analisados e intervenções no ambiente podem ser propostas de forma a considerar o conforto térmico dos seus ocupantes, que por sua vez tende a afetar o seu desempenho. Nesse estudo, a análise exergética foi aplicada ao corpo humano utilizando três métodos disponíveis na literatura. Os indicadores de conforto térmico foram obtidos e então analisados em relação ao conforto térmico. A influência dos parâmetros ambientais, como por exemplo, a temperatura e umidade relativa do ar, nesses parâmetros foram também analisadas. Além disso, um novo parâmetro ambiental foi implementado ao modelo computacional utilizado: a velocidade do ar. Esse parâmetro afeta diretamente o cálculo do coeficiente convectivo de transferência de calor, que afeta a análise exergética como um todo. Foi observado que métodos de análise exergética que têm sido amplamente utilizados em análises de conforto térmico podem não estar descrevendo os fenômenos precisamente. Por exemplo, a taxa de exergia destruída obtida quando o método de Shukuya *et al.* (2010) é utilizado, é pelo ao menos uma ordem de grandeza superior ao calculado utilizando-se os outros dois métodos.

*Palavras-chave:* Análise Exergética, Sistemas Biológicos, Corpo Humano, Conforto Térmico.

## Abstract

RIBEIRO, Thatiana Jéssica da Silva. Exergy analysis assessment of the human body thermal system to evaluate thermal comfort. 2018. 150p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

The use of Thermodynamics concepts on biological systems, such as the human body, have been widely carried out in order to promote a better understanding of its functioning. From the First Law standpoint, one can infer that the energy produced within the body is always conserved. However, the functioning of the human body occurs due to a set of processes that intrinsically present irreversibilities and therefore a certain amount of entropy is always generated. Thus, in order to promote the evaluation of a system such as the human body, it is very important that the concepts of the First Law of Thermodynamics be used jointly with the Second Law of Thermodynamics, generating the exergy analysis. Several models representative of the human body have been developed and, by applying the exergy analysis to these models, it is possible to evaluate the quality of the energy conversion processes that take place within the body. The exergy analysis of the human body takes into account not only the physiological phenomena, but also the interactions between the human body and the environment. Hence, environmental parameters can be analyzed and interventions in the indoor environment can be proposed in order to consider the thermal comfort of its occupants, which consequently tends to affect their performance. In this study exergy analysis was applied to the human body using three different methods available in the literature. Thermal comfort indexes were obtained and then analyzed regarding the thermal comfort. The influence of environmental parameters, such as the temperature and relative humidity, in these parameters were also analyzed. Furthermore, a new parameter was implemented in the computational model that was used: the air velocity. This parameter affects directly the convective heat transfer coefficient evaluation, which affects the exergy analysis. It was observed that methods which have been widely used in thermal comfort analyses might not be describing the phenomena accurately. For instance, the destroyed exergy rate obtained using the method described on Shukuya *et al.* (2010) is of at least one order of magnitude higher than what was obtained using the other two methods.

*Keywords:* Exergy Analysis, Biological Systems, Human Body, Thermal Comfort.

## Lista de Ilustrações

3.1	Método para obtenção da exergia química de uma substância que não está presente no ambiente de referência, nesse caso um hidrocarboneto genérico. FONTE: Mady (2014) . . . . .	28
3.2	Balanco exergético em um volume de controle. FONTE: Mady (2014) . . . . .	28
3.3	Sistema térmico do corpo humano. FONTE: Ferreira (2001) . . . . .	29
3.4	Relação entre PMV e PPD. FONTE: Adaptado de American Society of Heating e Engineers (2005) . . . . .	36
3.5	Modelo térmico do corpo humano desenvolvido por Fanger (1972). FONTE: American Society of Heating e Engineers (2005) . . . . .	37
3.6	Modelo de dois compartimentos com transferências de energia e massa. 1 - Condução entre núcleo e pele, 2 - Transferência de energia devido à corrente sanguínea, 3 - Radiação térmica, 4 - Transferência de calor na superfície da pele devido ao fluxo de massa, 5 - Difusão de água e vaporização de suor, 6 - Convecção, 7 - Respiração. FONTE: Prek e Butala (2010) . . . . .	42
4.1	Modelo de dois compartimentos. FONTE: Shukuya <i>et al.</i> (2010) . . . . .	48
4.2	Taxas de exergias obtidas com o método de Shukuya <i>et al.</i> (2010). FONTE: Adaptado de Shukuya <i>et al.</i> (2010) . . . . .	54
4.3	Exergia destruída obtida com o modelo de Prek e Butala (2010) em função da temperatura e umidade relativa do ar para indivíduos vestidos para: (a) Verão. (b) Inverno. FONTE: Prek e Butala (2010) . . . . .	60
4.4	Volume de controle utilizado em Mady <i>et al.</i> (2014). FONTE: Adaptado de Mady <i>et al.</i> (2014) . . . . .	61
4.5	Exergia destruída obtida com o modelo de Mady <i>et al.</i> (2014) em função da temperatura e umidade relativa do ar para: (a) Indivíduo despido. (b) Indivíduo com vestimenta. FONTE: Mady <i>et al.</i> (2014) . . . . .	63
4.6	Modelo do corpo humano. FONTE: Ferreira (2001) . . . . .	64
4.7	Representação dos membros inferiores. (a) Coxa. (b) Perna Esquerda. (c) Pé. (d) Combinação de tecidos. FONTE: Ferreira (2001) . . . . .	65
4.8	Representação dos membros superiores. (a) Braço. (b) Antebraço. (c) Mão. (d) Combinação de tecidos. FONTE: Ferreira (2001) . . . . .	66
4.9	Representação do pescoço. FONTE: Ferreira (2001) . . . . .	66

4.10	Representação da cabeça. (a) Seção 1. (b) Seção 2. (c) Seção 3. (d) Combinação de tecidos e órgãos. FONTE: Ferreira (2001) . . . . .	67
4.11	Sistema circulatório em um elemento $j$ . FONTE: Ferreira (2001) . . . . .	68
4.12	Modelo simplificado do corpo humano. Fonte: Mady (2014) . . . . .	69
4.13	Transferências de energia e massa nos compartimentos. (a) Núcleo. (b) Músculo. (c) Gordura. (d) Pele. . . . .	70
4.14	Sistema circulatório no modelo simplificado do corpo humano . . . . .	71
4.15	Resistências térmicas de condução propostas para o modelo simplificado do corpo humano utilizando a abordagem de Mady (2014). . . . .	73
4.16	Resistências térmicas de condução propostas para o modelo simplificado do corpo humano utilizando a abordagem de Prek e Butala (2010). . . . .	74
4.17	Resistências térmicas de condução propostas para o modelo simplificado do corpo humano utilizando a abordagem desenvolvida. . . . .	75
4.18	Resultados de indicadores de conforto térmico: (a) PMV. (b) PPD. . . . .	82
5.1	Resultados para cenários propostos na Tabela 4.4 utilizando o método de Mady <i>et al.</i> (2014): (a) Taxa de exergia destruída. (b) Taxa de exergia transferida ao ambiente. . . . .	84
5.2	Resultados para cenários propostos na Tabela 4.4 utilizando o método de Prek e Butala (2010) com adaptações para exergia associada às irreversibilidades internas: (a) Taxa de exergia destruída. (b) Taxa de exergia transferida ao ambiente. . . . .	86
5.3	Comparação das taxa de exergia interna obtida para os três métodos. (a) $T = 10^{\circ}\text{C}$ . (b) $T = 15^{\circ}\text{C}$ . (c) $T = 20^{\circ}\text{C}$ . (d) $T = 25^{\circ}\text{C}$ . (e) $T = 30^{\circ}\text{C}$ . (f) $T = 35^{\circ}\text{C}$ . . . . .	90
5.4	Comparação da exergia associada às irreversibilidades internas do método de Prek e Butala (2010). (a) Intervalo completo. (b) Altas temperaturas e umidades relativas. . . . .	91
5.5	Comparação entre os fatores multiplicadores e o fator de Carnot para os termos de: (a) Convecção. (b) Radiação. . . . .	92
5.6	Resultados utilizando o método de Prek e Butala (2010) com termos de radiação e convecção modificados. . . . .	93
5.7	Comparação para taxa de exergia transferida ao ambiente nos modelos: (a) Mady <i>et al.</i> (2014), Prek e Butala (2010) e Prek e Butala (2010) modificado. (b) Mady <i>et al.</i> (2014) e Prek e Butala (2010) modificado. . . . .	94
5.8	Resultados para cenários propostos na Tabela 4.4 utilizando o método de Shukuya <i>et al.</i> (2010): (a) Taxa de exergia destruída. (b) Taxa de exergia transferida ao ambiente. . . . .	95
5.9	Comparação entre a taxa de exergia destruída obtidas pelos métodos de análise exérgica de: Prek e Butala (2010), Shukuya <i>et al.</i> (2010) e Mady <i>et al.</i> (2014). . . . .	97

5.10	Resultados utilizando o método de análise exérgica de Shukuya <i>et al.</i> (2010) com modificação proposta. (a) Como função da temperatura do ar. (b) Como função da temperatura e da umidade relativa do ar. . . . .	97
5.11	Comparação entre a taxa de exérgia destruída calculada pelo método de Prek e Butala (2010) e pelo método de Shukuya <i>et al.</i> (2010) desconsiderando-se o termo de geração de água devido ao metabolismo. . . . .	98
5.12	Resultados utilizando os três métodos de análise exérgica, sendo o método de Shukuya <i>et al.</i> (2010) com modificação proposta. (a) Taxa de exérgia destruída. (b) Taxa de exérgia transferida ao ambiente. . . . .	99
5.13	Relação entre o indicador PMV definidos na American Society of Heating e Engineers (2005) e: (a) a taxa de exérgia destruída pelo método de Mady <i>et al.</i> (2014). (b) a taxa de exérgia transferida ao ambiente pelo método de Mady <i>et al.</i> (2014). . .	101
5.14	Relação entre o indicador PMV definido na American Society of Heating e Engineers (2005) e: (a) a taxa de exérgia destruída pelo método de Prek e Butala (2010). (b) a taxa de exérgia transferida ao ambiente pelo método de Prek e Butala (2010). .	102
5.15	Relação entre o indicador PMV definido na American Society of Heating e Engineers (2005) e : (a) a taxa de exérgia destruída pelo método de Shukuya <i>et al.</i> (2010). (b) a taxa de exérgia transferida ao ambiente pelo método de Shukuya <i>et al.</i> (2010). .	104
5.16	Relação entre o indicador PPD definidos na American Society of Heating e Engineers (2005) e . (a) a taxa de exérgia destruída pelo método de Mady <i>et al.</i> (2014). (b) a taxa de exérgia transferida ao ambiente pelo método de Mady <i>et al.</i> (2014). . .	106
5.17	Relação entre o indicador PPD definidos na American Society of Heating e Engineers (2005) e: (a) a taxa de exérgia destruída pelo método de Prek e Butala (2010). (b) a taxa de exérgia transferida ao ambiente pelo método de Prek e Butala (2010). .	108
5.18	Relação entre o indicador PPD definido na American Society of Heating e Engineers (2005) e . (a) a taxa de exérgia destruída pelo método de Shukuya <i>et al.</i> (2010). (b) a taxa de exérgia transferida ao ambiente pelo método de Shukuya <i>et al.</i> (2010). .	109
5.19	Exérgia associada ao fenômeno de convecção utilizando o método de Mady <i>et al.</i> (2014) considerando-se coeficiente convectivo variável . . . . .	110
5.20	Comparação entre os indicadores de conforto térmico considerando-se coeficiente convectivo variável utilizando o método de Mady <i>et al.</i> (2014). (a) Taxa de exérgia transferida ao ambiente. (b) Taxa de exérgia destruída. . . . .	112
5.21	Exérgia associada ao fenômeno de convecção utilizando o método de Prek e Butala (2010) considerando-se coeficiente convectivo variável . . . . .	113

5.22	Comparação entre os indicadores de conforto térmico considerando-se coeficiente convectivo variável utilizando o método de Prek e Butala (2010). (a) Taxa de exergia transferida ao ambiente. (b) Taxa de exergia destruída. . . . .	114
5.23	Comparação entre termos da análise exergética de Prek e Butala (2010) considerando-se as correlações para o cálculo de coeficiente convectivo variável em relação ao caso sem correlação, originalmente mostrado em Ferreira (2001). . .	116
5.24	Exergia associada ao fenômeno de convecção utilizando o método de Shukuya <i>et al.</i> (2010) considerando-se coeficiente convectivo variável . . . . .	117
5.25	Comparação entre os indicadores de conforto térmico considerando-se coeficiente convectivo variável utilizando o método de Shukuya <i>et al.</i> (2010). (a) Taxa de exergia transferida ao ambiente. (b) Taxa de exergia destruída. . . . .	118
5.26	Comparação entre termos individuais da análise exergética de Shukuya <i>et al.</i> (2010) em relação à taxa de exergia transferida ao ambiente. . . . .	119
5.27	Exergia associada ao fenômeno de convecção utilizando o método de Mady <i>et al.</i> (2014) considerando-se a variação da velocidade no cálculo do coeficiente convectivo de transferência de calor . . . . .	120
5.28	Comparação entre os indicadores de conforto térmico considerando-se a velocidade do ar variável utilizando o método de Mady <i>et al.</i> (2014). (a) Taxa de exergia transferida ao ambiente. (b) Taxa de exergia destruída. . . . .	121
5.29	Exergia associada ao fenômeno de convecção utilizando o método de Prek e Butala (2010) considerando-se a variação da velocidade no cálculo do coeficiente convectivo de transferência de calor . . . . .	122
5.30	Comparação entre os indicadores de conforto térmico considerando-se a velocidade do ar variável utilizando o método de Prek e Butala (2010). (a) Taxa de exergia transferida ao ambiente. (b) Taxa de exergia destruída. . . . .	123
5.31	Exergia associada ao fenômeno de convecção utilizando o método de Shukuya <i>et al.</i> (2010) considerando-se a variação da velocidade no cálculo do coeficiente convectivo de transferência de calor . . . . .	124
5.32	Comparação entre os indicadores de conforto térmico considerando-se a velocidade do ar variável utilizando o método de Shukuya <i>et al.</i> (2010). (a) Taxa de exergia transferida ao ambiente. (b) Taxa de exergia destruída. . . . .	125
A.1	Distribuição temporal de temperatura para o caso de $T_{ar} = 10\text{ °C}$ e $\phi = 50\%$ . . . .	140
A.2	Distribuição temporal de temperatura para o caso de $T_{ar} = 30\text{ °C}$ e $\phi = 50\%$ . . . .	141
A.3	Distribuição temporal de temperatura para o caso de $T_{ar} = 35\text{ °C}$ e $\phi = 50\%$ . . . .	141
B.1	Taxa de exergia associada ao metabolismo para o método de (MADY <i>et al.</i> , 2014). .	142
B.2	Taxa de exergia associada ao metabolismo para o método de (PREK E BUTALA, 2010).142	142

B.3	Taxa de exergia associada ao metabolismo para o método de (SHUKUYA <i>et al.</i> , 2010).	143
B.4	Taxa de exergia associada a geração de água no núcleo devido ao metabolismo para o método de (SHUKUYA <i>et al.</i> , 2010).	143
B.5	Taxa de exergia associada a geração de água no envoltório devido ao metabolismo para o método de (SHUKUYA <i>et al.</i> , 2010).	144
B.6	Taxa de exergia associada a convecção para o método de (MADY <i>et al.</i> , 2014).	144
B.7	Taxa de exergia associada a convecção para o método de (PREK E BUTALA, 2010).	145
B.8	Taxa de exergia associada a convecção para o método de (SHUKUYA <i>et al.</i> , 2010).	145
B.9	Taxa de exergia associada a radiação para o método de (MADY <i>et al.</i> , 2014).	146
B.10	Taxa de exergia associada a radiação para o método de (PREK E BUTALA, 2010).	146
B.11	Taxa de exergia associada a radiação para o método de (SHUKUYA <i>et al.</i> , 2010).	147
B.12	Taxa de exergia associada ao processo de sudorese para o método de (MADY <i>et al.</i> , 2014).	147
B.13	Taxa de exergia associada ao processo de sudorese para o método de (PREK E BUTALA, 2010).	148
B.14	Taxa de exergia associada ao processo de sudorese para o método de (SHUKUYA <i>et al.</i> , 2010).	148
B.15	Taxa de exergia associada ao processo de respiração para o método de (MADY <i>et al.</i> , 2014).	149
B.16	Taxa de exergia associada ao processo de respiração para o método de (PREK E BUTALA, 2010).	149
B.17	Taxa de exergia associada ao processo de respiração para o método de (SHUKUYA <i>et al.</i> , 2010).	150

## Lista de Tabelas

3.1	Escala de sensação térmica American Society of Heating e Engineers (2005) . . . .	35
4.1	Propriedades e parâmetros para cada tecido/órgão. FONTE: Ferreira (2001) . . . .	68
4.2	Propriedades e parâmetros para cada tecido/órgão. FONTE: Mady (2014) . . . .	69
4.3	Resistência térmica de condução para os modelos para $T = 30^{\circ}C$ e $\phi = 50\%$ . . .	77
4.4	Transferência de calor por condução para os modelos para $T = 30^{\circ}C$ e $\phi = 50\%$ .	77
4.5	Parâmetros do meio ambiente simulados . . . . .	78
4.6	Variação do coeficiente convectivo com a velocidade do ar usada como base para variar o coeficiente dos diferentes membros do modelo proposto por Ferreira e Ya- nagihara (2009) . . . . .	83
5.1	Coeficientes obtidos para o intervalo de temperatura entre 10 e 25°C . . . . .	88
5.2	Coeficientes obtidos para o intervalo de temperatura entre 25 e 35 °C . . . . .	88

## Lista de Abreviaturas e Siglas

### *Símbolos*

- $A$  - Área,  $m^2$
- $B$  - Exergia,  $J$
- $\dot{B}$  - Taxa de exergia,  $W$
- $\dot{B}''$  - Taxa de exergia por unidade de área,  $W/m^2$
- $b$  - Exergia específica,  $kJ/kg$
- $c$  - Calor específico,  $kJ/(kgK)$
- $C''$  - Capacidade térmica do núcleo do corpo,  $J/K$
- $dT$  - Aumento infinitesimal da temperatura,  $K$
- $E$  - Energia,  $J$
- $f$  - Fator de correção da superfície da vestimenta ( $A_{roupa}/A_D$ ), —
- $g$  - Aceleração gravitacional,  $m/s^2$
- $\Delta g$  - Variação da função de Gibbs,  $kJ/kg$
- $H$  - Taxa de entalpia,  $W$
- $\dot{H}''$  - Taxa de transferência de energia por unidade de área,  $W/m^2$
- $h$  - Entalpia específica ou Coeficiente de transferência de calor,  $J/kg$ ,  
 $W/(m^2K)$
- $\Delta \dot{H}$  - Variação da taxa entalpia,  $W$
- $I$  - Isolação típica da vestimenta,  $(m^2K)/W$
- $k$  - Condutividade térmica,  $W/(mK)$
- $k''$  - Condutividade térmica por unidade de área,  $W/(m^2K)$
- $\bar{k}$  - Condutividade térmica média entre os compartimentos  $i$  e  $j$ ,  $W/(mK)$
- $l$  - Altura do corpo humano,  $m$
- $LR$  - Relação de Lewis,  $K/kPa$
- $\dot{m}$  - Vazão mássica,  $kg/s$
- $M$  - Taxa de exergia do metabolismo ou Massa molar,  $W$ ,  $g/mol$
- $\dot{M}''$  - Taxa de energia do metabolismo por unidade de área,  $W/m^2$

$m$	- Massa do corpo humano, $kg$
$\dot{m}''$	- Vazão mássica de produção de suor na transpiração por unidade de área, $kg/(m^2s)$
$m_{O_2}$	- Vazão mássica de oxigênio consumido, $kg/s$
$m_{CO_2}$	- Vazão mássica de dióxido de carbono produzida, $kg/s$
$P$	- Pressão, $kPa$
$\Delta p$	- Diferença entre a pressão ventricular máxima e residual, $mmHg$
$\dot{Q}$	- Taxa líquida de transferência de calor, $W$
$\dot{Q}''$	- Taxa de calor transferido por unidade de área, $W/m^2$
$R$	- Constante de um gás perfeito ou Resistência térmica, $J/(molK)$ , $(m^2K)/W$
$r$	- Raio, $m$
<b>S</b>	- Entropia, $J$
$s$	- Entropia específica, $J/kg$
$\dot{S}$	- Taxa de entropia, $W$
$\dot{S}''$	- Taxa de energia armazenada no corpo por unidade de área, $W/m^2$
$t$	- Tempo, $s$
$T$	- Temperatura, $^{\circ}C$ , $K$
$V$	- Velocidade ou Volume, $m/s$ , $m^3$
$V''$	- Taxa volumétrica por unidade de área, $(m^3/s)/m^2$
$x$	- Fração molar, —
$z$	- Altura, $m$
$\dot{W}$	- Potência, $W$
$w$	- Trabalho específico e Fração da pele na qual ocorre vaporização, $J/kg$ , —
$\dot{W}''$	- Potência por unidade de área, $W/m^2$
$y$	- Fração mássica, —

### ***Letras gregas***

$\alpha$	- Massa relativa da pele e Coeficiente de absorção entre a área superficial humana e uma superfície $j$ nas proximidades do corpo, —, —
$\varepsilon$	- Emissividade, —
$\nu$	- Volume sistólico, $cm^3$

$\rho$	-	Massa específica, $kg/m^3$
$\sigma$	-	Constante de Stefan-Boltzmann, $W/m^2 K^4$
$\phi$	-	Umidade relativa do ar —
$\varphi_{1 \rightarrow 2}$	-	Fator de forma, —
$\omega$	-	Umidade absoluta do ar, $kg_{vapor}/kg_{ar seco}$

### ***Sub-índices***

0	-	estado padrão, 1 atm 298 K
00	-	ambiente de referência
1 $\rightarrow$ 2	-	Emissividade da superfície 1 para 2, —
<i>ar</i>	-	ar do ambiente
<i>ativ</i>	-	atividade
<i>c, conv</i>	-	convecção
<i>cd, cond</i>	-	condução
<i>CO<sub>2</sub></i>	-	dióxido de carbono
<i>D</i>	-	de DuBois (corpo despido)
<i>dest, d</i>	-	destruída
<i>dif</i>	-	difusão natural de água pela pele
<i>e</i>	-	entrada
<i>ef</i>	-	efetiva
<i>evap</i>	-	processo de sudorese
<i>ex</i>	-	expirado
<i>expansão, rev</i>	-	expansão por processo reversível
<i>ger</i>	-	gerada
<i>gordura</i>	-	camada da gordura
<i>i</i>	-	arbitrária, camada arbitrária, componente i
<i>i <math>\rightarrow</math> j</i>	-	do compartimentos <i>i</i> para <i>j</i> , <i>W</i>
<i>j</i>	-	fronteira arbitrária ou camada arbitrária
<i>lv</i>	-	liquido-vapor
<i>max</i>	-	máxima
<i>mr</i>	-	radiante média
<i>músculo</i>	-	camada do músculo
<i>N</i>	-	nitrogênio

<i>núcleo</i>	-	camada do núcleo
$O_2$	-	oxigênio
<i>op</i>	-	operativa
<i>pele</i>	-	camada da pele
<i>prod</i>	-	produtos
<i>s</i>	-	saída
<i>q</i>	-	química
<i>q,i</i>	-	química do componente i
<i>r, rad</i>	-	radiação
<i>rb</i>	-	radiação de uma superfície escura
<i>reag</i>	-	reagentes
<i>resp</i>	-	respiração
<i>rev</i>	-	reversível
<i>roupa</i>	-	na superfície da vestimenta
<i>sat</i>	-	saturado
<i>transp</i>	-	transpiração
<i>tremor</i>	-	tremor, calafrios
$v_0$	-	vapor de água na temperatura do ambiente de referência
$v_a, v_s$	-	vapor de água saturado na temperatura do ambiente
<i>VC</i>	-	Volume de controle
<i>vr</i>	-	vapor de água na temperatura do ambiente

# SUMÁRIO

<b>Lista de Ilustrações</b>	<b>8</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>13</b>
<b>Lista de Abreviaturas e Siglas</b>	<b>14</b>
<b>SUMÁRIO</b>	<b>18</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>20</b>
1.1 Estrutura da dissertação . . . . .	21
<b>2 Objetivos</b>	<b>23</b>
<b>3 Revisão da literatura</b>	<b>24</b>
3.1 Conceitos termodinâmicos . . . . .	24
3.1.1 Primeira lei da termodinâmica . . . . .	24
3.1.2 Segunda lei da termodinâmica . . . . .	25
3.1.3 O conceito de Exergia . . . . .	25
3.1.3.1 Exergia física . . . . .	26
3.1.3.2 Exergia química . . . . .	27
3.1.3.3 Análise exergética de um volume de controle . . . . .	28
3.2 Conceitos fisiológicos . . . . .	29
3.2.1 O sistema térmico do corpo humano . . . . .	29
3.2.1.1 Sistema Passivo . . . . .	30
3.2.1.1.1 Fenômenos de transferência de energia no corpo humano . . . . .	31
3.2.1.2 Sistema de controle . . . . .	33
3.3 Conceitos do estudo do Conforto Térmico . . . . .	34
3.3.1 Neutralidade térmica . . . . .	34
3.3.2 Conforto Térmico . . . . .	34
3.3.2.1 Indicadores de conforto térmico . . . . .	35
3.4 Análises energéticas do corpo humano . . . . .	36
3.5 Análises exergéticas do corpo humano . . . . .	44

<b>4</b>	<b> Materiais e métodos</b>	<b>47</b>
4.1	Modelos de análise exergética do corpo humano . . . . .	47
4.1.1	Modelo de análise exergética de Shukuya et al. (2010) . . . . .	47
4.1.2	Modelo térmico desenvolvido por Prek e Butala (2010) . . . . .	54
4.1.3	Método de análise exergética aplicada ao corpo humano desenvolvido por Mady et al. (2014) . . . . .	60
4.2	Modelo térmico do corpo humano para a aplicação dos três métodos de análise exergética . . . . .	64
4.3	Modelo térmico simplificado do corpo humano . . . . .	69
4.4	Métodos . . . . .	78
<b>5</b>	<b> Resultados e discussões</b>	<b>84</b>
<b>6</b>	<b> Conclusões</b>	<b>127</b>
	<b>Referências</b>	<b>132</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>138</b>
<b>A</b>	<b> – Dedução do termo condução de calor adaptado para o modelo desenvolvido por Prek e Butala (2010)</b>	<b>138</b>
<b>B</b>	<b> – Dedução do termo condução de calor para o modelo desenvolvido neste estudo</b>	<b>139</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>140</b>
<b>A</b>	<b> – Distribuição temporal de temperaturas do corpo humano obtidas com o modelo de (FERREIRA E YANAGIHARA, 2009)</b>	<b>140</b>
<b>B</b>	<b> – Taxas de exergia obtidas para cada fenômeno de transferência de energia e massa</b>	<b>142</b>

# 1 Introdução

A aplicação de conceitos da Termodinâmica tem se mostrado como uma ferramenta importante para a análise de organismos vivos e entendimento de seu funcionamento como também na análise de diferentes tipos de ecossistemas. Ao longo do tempo esses conceitos têm sido aplicados em diferentes organismos e ecossistemas, como por exemplo, seres humanos e ecossistemas aquáticos. Entre esses conceitos, destacam-se a utilização da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica e a análise exergética. É importante entender e avaliar o comportamento termodinâmico do corpo humano (sistema passivo e sistema de controle) quando sujeito a mudanças de condições ambientais. Dessa forma é possível projetar os sistemas não só de forma mais econômica (como em edifícios com baixo consumo de energia), porém, também levando-se em conta o conforto térmico dos seus ocupantes, que por sua vez tende a afetar o seu desempenho.

Hardy e DuBois (1938a) e Hardy e DuBois (1938b) foram os primeiros a aplicar a Primeira Lei da Termodinâmica ao corpo humano. Eles conduziram análises experimentais, em indivíduos do sexo masculino e despídos, utilizando um calorímetro e um radiômetro. Essas análises experimentais foram também utilizadas para observar o efeito da realização de exercícios físicos, de calafrios, de correntes forçadas de ar e da utilização de vestimenta no corpo humano, como é mostrado em Hardy *et al.* (1938a) e Hardy *et al.* (1938b). Um pouco mais tarde, essas análises foram estendidas também a indivíduos do sexo feminino, como é mostrado em Hardy e DuBois (1940), Hardy *et al.* (1941) e DuBois *et al.* (1952).

A aplicação da Segunda Lei da Termodinâmica na análise dos seres humanos trouxe importantes contribuições para o entendimento de seu funcionamento. A propriedade entropia está intrinsicamente relacionada à direcionalidade de processos, assim como a vida do ser humano, que caminha naturalmente do estado de nascimento, crescimento, envelhecimento até a morte. Schrödinger (1944) descreve que o estado no qual é atingido um equilíbrio termodinâmico, ou seja, não ocorrem mais interações espontâneas entre o ser humano e o ambiente no qual ele está inserido, é o estado em que não é mais possível sustentar a vida. Nesse estado, segundo o autor, é observado um valor máximo de entropia. Visto que a entropia do ser humano sempre aumenta ao longo do tempo devido às atividades metabólicas necessárias para suprir a demanda energética do corpo, ou seja, há sempre uma taxa de geração de entropia, o ser humano tende a evoluir para o estado de morte, pois a entropia cresce de tal forma que em algum momento o valor máximo é atingido e portanto o desequilíbrio que mantém a vida é cessado.

A análise da geração de entropia foi também aplicada ao estudo do corpo humano por Prigogine e Wiame (1946), que estabeleceu o princípio de mínima geração de entropia. Segundo o referido autor, todos os seres vivos tendem a uma produção mínima de entropia. A Segunda Lei da Termodinâmica foi formalmente aplicada ao corpo humano por Aoki (1989), Aoki (1990) e Aoki (1991), baseado em dados energéticos de Hardy *et al.* (1938b), DuBois (1939), Hardy e DuBois (1938a), Hardy e DuBois (1938b) e DuBois *et al.* (1952). Em Aoki (1990), o conceito de geração de entropia foi relacionado com o conceito de exergia destruída por meio do teorema de Gouy-Stodola. Nesse mesmo período, Batato *et al.* (1990) foram os primeiros a realizar uma análise exérgica do corpo humano.

Ao longo do tempo, diversos métodos de análise exérgica do corpo humano têm sido propostos visando promover o estudo do conforto térmico. Alguns desses métodos de maior destaque e utilização são mostrados em artigos de revisão da literatura da linha de pesquisa de conforto térmico, como por exemplo, Djongyang *et al.* (2010), Taleghani *et al.* (2013) e Rupp *et al.* (2015).

Neste estudo, a análise exérgica será aplicada ao modelo térmico do corpo humano proposto por Ferreira e Yanagihara (2009) baseado nos métodos propostos por Prek e Butala (2010), Tokunaga e Shukuya (2011) e Mady *et al.* (2014), que serão descritos no Capítulo 4, com a finalidade de analisar os indicadores de conforto térmico obtidos e compará-los com resultados esperados apresentados na literatura, como por exemplo indicadores PMV e PPD mostrados em American Society of Heating e Engineers (2005). A influência da variação de parâmetros ambientais nos indicadores de conforto térmico, como por exemplo, na taxa de exergia destruída, é também analisada.

## 1.1 Estrutura da dissertação

Inicialmente os **Objetivos** deste estudo (Capítulo 2) são mostrados. Em seguida, o texto está estruturado em quatro partes:

- **Revisão da Literatura** (Capítulo 3) é dividida em cinco partes: apresentação de conceitos básicos da termodinâmica que serão importantes para o entendimento do estudo; apresentação de conceitos fisiológicos básicos relacionados ao sistema térmico do corpo humano; apresentação de conceitos básicos da linha de pesquisa de conforto térmico presentes na normativa American Society of Heating e Engineers (2005), apresentação de análises ener-

géticas do corpo humano que são importantes para o estudo e por fim uma breve evolução dos métodos de análise exergética é mostrada.

- **Materiais e métodos** (Capítulo 4) é dividido em quatro partes: apresentação dos três métodos de análise exergética do corpo humano que são utilizados no estudo; apresentação do modelo térmico do corpo humano desenvolvido por Ferreira e Yanagihara (2009) e utilizado em maior parte deste estudo; apresentação do modelo térmico simplificado do corpo humano desenvolvido por Mady *et al.* (2014) e por fim a descrição das etapas e processos que foram realizados neste estudo.
- **Resultados e discussões** (Capítulo 5) os resultados dos indicadores obtidos a partir dos três métodos de análise exergética são apresentados e discutidos. Comparações entre os métodos, análise da influência da alteração de parâmetros ambientais são feitas e correlação entre os indicadores obtidos e indicadores tradicionais da normativa American Society of Heating e Engineers (2005) são elaboradas.
- **Conclusões** (Capítulo 6) apresenta um resumo das principais conclusões inferidas a partir dos resultados apresentados no Capítulo 5.

## 2 Objetivos

A análise exergética tem se mostrado uma ferramenta útil para avaliar e melhorar a eficiência de processos, dispositivos e sistemas assim como para melhorar o desempenho ambiental e econômico. Com a análise exergética aplicada ao corpo humano, indicadores de conforto térmico podem ser obtidos e analisados, dessa forma intervenções no ambiente podem ser propostas de modo a propiciar um ambiente no qual o indivíduo se aproxime a condições de conforto térmico, isso é importante até para otimizar o seu desempenho. Este estudo tem como objetivo a análise da influência de diferentes parâmetros na obtenção e análise de indicadores de conforto térmico a partir da aplicação de três diferentes métodos de análise exergética do corpo humano em um modelo de corpo humano previamente publicado na literatura. Destaca-se que existem grandes diferenças entre esses métodos de análise exergética, sendo um dos objetivos desse trabalho um estudo comparativo.

### 3 Revisão da literatura

Nesse capítulo, abordam-se conceitos relacionados a Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica aplicadas a um volume de controle, exergia e análise exergética. Em seguida, os fenômenos fisiológicos que acontecem no corpo humano e o sistema térmico são brevemente discutidos. Por fim, tem-se a apresentação da análise energética e um breve histórico do desenvolvimento da análise exergética.

#### 3.1 Conceitos termodinâmicos

Nesta seção serão abordados alguns conceitos termodinâmicos básicos utilizados nesse estudo.

##### 3.1.1 Primeira lei da termodinâmica

A primeira lei da termodinâmica expressa o fenômeno da conservação de energia. A Equação 3.1 mostra a primeira lei da termodinâmica aplicada a um volume de controle que pode ter múltiplas entradas e saídas.

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum \dot{m}_s \left( h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (3.1)$$

Na qual  $dE_{VC}/dt$  representa a variação de energia do volume de controle com o tempo,  $\dot{Q}$  e  $\dot{W}$  representam a taxa líquida de transferência de energia por interações de calor e trabalho através das fronteiras, respectivamente, e os termos dos somatórios representam as taxas de transferências de entalpia, energia cinética e potencial devido aos fluxos de massa de entrada e/ou saída. É comum desconsiderar os termos relacionados a variação de energia cinética e potencial em aplicações práticas visto que a variação de entalpia é o termo mais influente.

### 3.1.2 Segunda lei da termodinâmica

É observado que há um sentido preferencial definido para processos espontâneos acontecerem. Por exemplo, um objeto a uma determinada temperatura  $T_i$  em contato com ar atmosférico à temperatura  $T_{ar}$ , no qual  $T_i > T_{ar}$ , tende espontaneamente a resfriar-se até que a temperatura  $T_{ar}$  seja atingida. Neste processo ocorre um decréscimo da energia interna do objeto e um consequente aumento da energia interna da vizinhança. Mesmo que o critério de conservação da energia fosse satisfeito, o processo inverso de aquecimento do objeto não aconteceria espontaneamente, pois a energia interna do ambiente não diminuiria espontaneamente para que o aumento de energia interna do objeto e consequentemente seu aquecimento ocorresse. Seria necessário portanto um dispositivo auxiliar que poderia fazer com que a temperatura do objeto retornasse às condições iniciais, porém alguma mudança permanente na condição da vizinhança seria ocasionada. A Segunda Lei da Termodinâmica expressa o sentido preferencial no qual os processos acontecem bem como suas irreversibilidades. A Equação 3.2 mostra a segunda lei da termodinâmica aplicada a um volume de controle.

$$\frac{dS_{VC}}{dt} = \sum \frac{\dot{Q}_{VC}}{T_j} + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s + \dot{S}_{ger} \quad (3.2)$$

Na qual  $dS_{VC}/dt$  representa a taxa de variação de entropia no volume de controle com o tempo,  $\dot{Q}_{VC}/T_j$  a razão entre a taxa de transferência de energia devido a um fluxo de calor e a temperatura da fronteira na qual essa transferência ocorre, os termos do somatório  $\dot{m}_e s_e$  e  $\dot{m}_s s_s$  representam as taxas de transferência de entropia através de fluxo de massa pela fronteira e o termo  $\dot{S}_{ger}$  representa a taxa de geração de entropia. Por meio desta equação infere-se que, para volumes de controle, a entropia pode ser transferida através de interações de calor ocorrendo na fronteira do volume de controle e/ou através de fluxos de matéria. Além disso, o termo de geração de entropia é sempre positivo ou nulo, sendo o primeiro para sistemas irreversíveis e nulo para sistemas reversíveis.

### 3.1.3 O conceito de Exergia

A propriedade exergia é definida por Szargut *et al.* (1988) como o trabalho máximo que pode ser obtido por meio de processos reversíveis quando um sistema interage somente com compo-

mentos do meio ambiente, passando de um determinado estado termodinâmico para um estado de equilíbrio irrestrito, ou seja, equilíbrio térmico, mecânico e químico com o ambiente. A exergia é composta de quatro componentes, que compõem a exergia total:

- Exergia potencial;
- Exergia cinética;
- Exergia física;
- Exergia química.

Na análise de processos, a exergia expressa um padrão de qualidade dos processos de conversão de energia. Enquanto a energia é sempre conservada, a exergia é destruída por meio de irreversibilidades. Aplicando-se a análise exergética em um determinado processo, pontos de "ineficiência" podem ser detectados e intervenções nos mesmos podem ser propostas de forma a minimizar a destruição de exergia e assim otimizá-lo.

### 3.1.3.1 Exergia física

A exergia física é o máximo de trabalho que pode ser obtido quando um sistema evolui de um determinado estado termodinâmico para um estado de equilíbrio restrito com o ambiente, ou seja, quando é atingido o equilíbrio térmico e mecânico ( $P = P_0$  e  $T = T_0$ ). A exergia física pode ser calculada como mostrado na Equação 3.3.

$$b = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) \quad (3.3)$$

Na qual  $u$ ,  $v$  e  $s$  são, respectivamente, a energia interna específica, o volume específico e a entropia específica nas condições  $(P, T)$  e  $u_0$ ,  $v_0$   $s_0$  são as energia interna específica, volume específico e entropia específica, respectivamente, nas condições do ambiente de referência  $(P_0, T_0)$ . A Equação 3.3 também pode ser escrita para um fluxo mássico utilizando-se a propriedade termodinâmica entalpia.

### 3.1.3.2 Exergia química

Ao atingir o estado restrito o sistema ou fluxo de substância ainda apresenta um potencial para gerar algum efeito útil. É dito então que ele ainda contém certa quantidade de exergia química. Portanto pode-se afirmar que a exergia química é o máximo de trabalho que pode ser obtido quando um sistema ou fluxo de certa substância evolui do estado de equilíbrio restrito para o estado de equilíbrio irrestrito com o ambiente por meio de interações de transferência de calor e/ou massa, ou seja, quando além do equilíbrio térmico e mecânico é atingido também o equilíbrio químico com o ambiente. O estado de equilíbrio irrestrito é também denominado de estado morto. Kotas (1985) apresenta uma expressão para o cálculo da exergia química de um gás perfeito presente no ambiente de referência. Esta expressão é mostrada na Equação 3.4 e indica o trabalho isotérmico que pode ser obtido por uma turbina quando esse gás perfeito é levado das condições de  $T_0$  e  $P_0$  para a sua pressão parcial no ambiente de referência definido por Szargut *et al.* (1988),  $P_{00}$ .

$$w_{expansão,rev} = b_q = RT_0 \ln \left( \frac{P_0}{P_{00}} \right) \quad (3.4)$$

Em que  $R$  é a constante do gás perfeito,  $T_0$  a temperatura do ambiente de referência,  $P_0$  a pressão do ambiente de referência e  $P_{00}$  a pressão parcial do gás perfeito no ambiente de referência.

Para substâncias que não estão presentes no ambiente de referência a exergia química deve ser obtida a partir da análise da reação química entre a substância e substâncias provenientes do ambiente de referência (denominadas de co-reagentes) que irão gerar como produtos substâncias que também são encontradas no ambiente de referência. Por exemplo, para um hidrocarboneto genérico de forma  $C_aH_b$ , a Figura 3.1 mostra o método que pode ser utilizado para o cálculo da sua exergia química e a Equação 3.5 mostra como a exergia química dessa substância é calculada.

$$w_{rev} = b_q = -(\Delta g_0) - \left[ \sum x_i b_{q,i} \right]_{co-reagents} + \left[ \sum x_i b_{q,i} \right]_{produtos} \quad (3.5)$$

Na qual  $\Delta g_0$  é a variação da função de Gibbs da reação de oxidação do hidrocarboneto (com os reagentes e produtos nas condições  $P = P_0$  e  $T = T_0$ );  $x_i$  a fração molar do elemento  $i$  na reação de referência e  $b_{q,i}$  a exergia química do elemento  $i$  no ambiente de referência padrão.

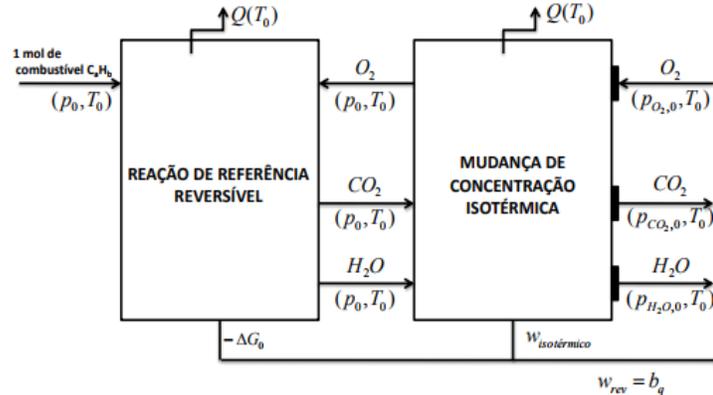


Figura 3.1: Método para obtenção da exergia química de uma substância que não está presente no ambiente de referência, nesse caso um hidrocarboneto genérico. FONTE: Mady (2014)

### 3.1.3.3 Análise exérgica de um volume de controle

A análise exérgica é obtida a partir da combinação da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica. A exergia de um volume de controle pode ser alterada devido a interações de calor, trabalho e também devido ao fluxo de massa pela fronteira. Além disso, para todo processo real certa quantidade de exergia é destruída devido à geração de entropia ( $\dot{B}_d = T_0 \dot{S}_{ger}$ ). Para o volume de controle mostrado na Figura 3.2 o balanço de exergia é mostrado na Equação 3.6

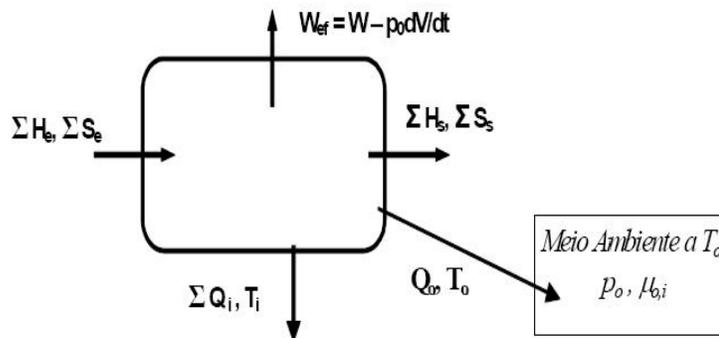


Figura 3.2: Balanço exérgico em um volume de controle. FONTE: Mady (2014)

$$\frac{dB_{VC}}{dt} = \sum_j \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) - \dot{W}_{ef} - \dot{B}_d + \sum_e \dot{B}_e - \sum_s \dot{B}_s \quad (3.6)$$

Na qual  $\frac{dB_{VC}}{dt}$  é a variação da exergia contida no volume de controle com o tempo;  $\dot{Q}_j$  é a

taxa de transferência de calor através da fronteira  $j$ ;  $T_0$  a temperatura do ambiente de referência,  $T_j$  a temperatura na fronteira  $j$ ;  $\dot{W}_{ef}$  a potência efetiva;  $\dot{B}_d$  a taxa de exergia destruída e  $\dot{B}_e$  e  $\dot{B}_s$  são os fluxos de exergia física das entradas e saídas, respectivamente.

## 3.2 Conceitos fisiológicos

### 3.2.1 O sistema térmico do corpo humano

Os seres humanos são animais homeotérmicos, ou seja, possuem um sistema térmico que atua de maneira a manter sua temperatura interna constante, até mesmo para grandes variações de condições ambientais. O sistema térmico do corpo humano é composto por dois subsistemas: o sistema passivo e o sistema de controle (também denominado termorregulador ou ativo). A Figura 3.3. mostra o esquema do sistema térmico do corpo humano.

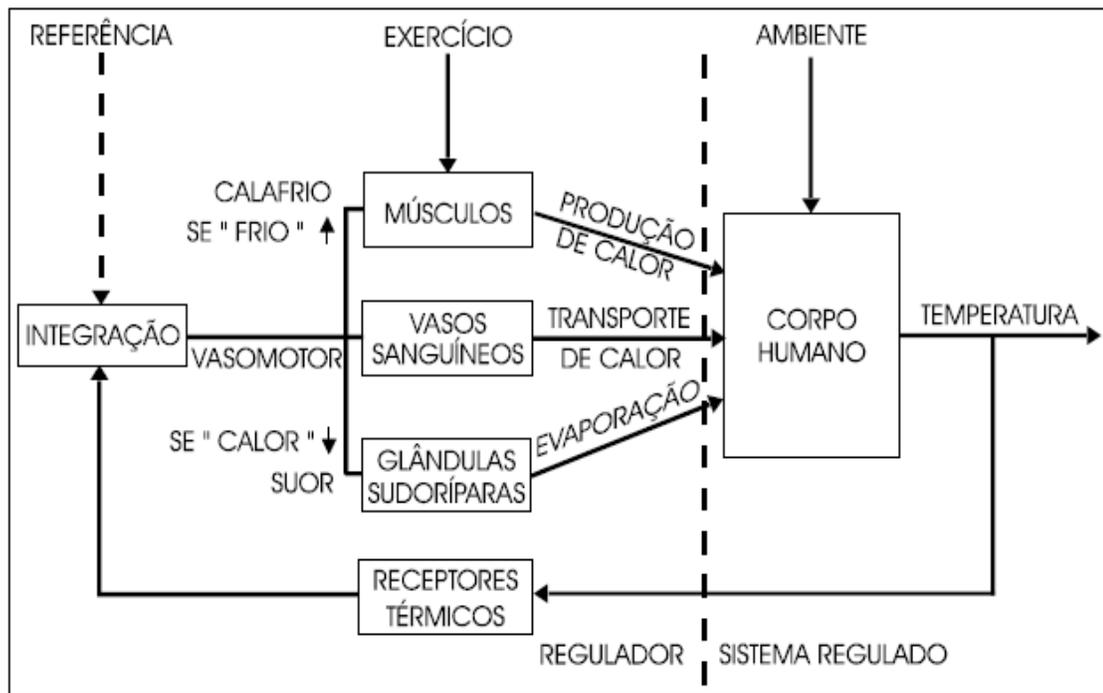


Figura 3.3: Sistema térmico do corpo humano. FONTE: Ferreira (2001)

A temperatura corporal normal é próxima a  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sendo observadas variações de cerca de  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  para a temperatura central e maiores faixas de variação para tecidos periféricos, como por exemplo, a pele, tecidos subcutâneos e músculos. O hipotálamo recebe informações transmitidas a partir dos diversos receptores no corpo e age como o controlador da temperatura interna corporal.

É de suma importância que a temperatura interna mantenha-se em determinado intervalo visto que todo o funcionamento de células e órgãos podem ser prejudicados por temperaturas elevadas ou reduzidas. O aumento da temperatura interna, chamado macroscopicamente de hipertermia, pode acarretar a desnaturação de proteínas e enzimas que são fundamentais para o metabolismo celular. Nas enzimas, esse aumento contribui para uma maior agitação molecular, entretanto, para cada tipo de enzima há uma temperatura ótima na qual a velocidade da reação é máxima. A faixa de temperatura ótima para as enzimas do corpo humano situa-se entre 35 e 40 °C e, se essa faixa for ultrapassada, a agitação molecular se torna tão forte que desestabiliza a estrutura espacial da enzima e ela se desnatura. Da mesma forma, a redução da temperatura corporal interna provoca a redução na velocidade das reações, e isso também prejudica o metabolismo, macroscopicamente entendido por hipotermia.

Uma temperatura interna corporal inferior à 28 °C, pode causar arritmia cardíaca e morte. Enquanto que para temperatura interna corporal maior do que 46 °C danos irreversíveis ao cérebro podem ser causados (American Society of Heating e Engineers, 2005).

A temperatura na superfície da pele é muito importante em relação à capacidade da pele de transferir energia sob forma de calor para o meio ambiente, visto que, quando a produção de energia no interior do organismo é maior do que sua perda, é causado o aumento da temperatura interna corporal e isso pode prejudicar várias funções do organismo. Em situações inversas a temperatura da pele também tem um importante papel, pois mecanismos acionados pelo sistema de controle vão agir de forma a reduzir essa temperatura, reduzindo a quantidade de energia transferida da pele para o ambiente e conseqüentemente preservando a energia interna.

### **3.2.1.1 Sistema Passivo**

O sistema passivo é representado pelo balanço de energia e massa nos tecidos que compõem o corpo humano. É considerada a condução tridimensional de calor, a transferência de calor entre sangue e tecidos, entre grandes artérias, no trato respiratório e a transferência de calor e massa entre o corpo e o meio ambiente. Uma hipótese simplificadora aplicada ao estudo é que, considerando-se coordenadas cilíndricas, a condução na direção radial é dominante, como mostrado em Pennes (1948).

### 3.2.1.1.1 Fenômenos de transferência de energia no corpo humano

Nos tópicos seguintes serão apresentados algumas das transferências de energia que acontecem no interior do corpo, e entre o corpo e o meio ambiente no qual ele está inserido.

#### ○ Metabolismo

É o conjunto de processos químicos que possibilitam a sobrevivência do ser humano. Por meio desses processos a demanda energética necessária para a atividade do indivíduo ( $M_{ativ}$ ) e para a produção de tremores ( $M_{tremor}$ ), quando necessário, são supridas (Tribess, 2012). No caso do metabolismo dos seres humanos, destacam-se as reações de oxidação dos carboidratos (glicose), lipídeos e proteínas (aminoácidos). A taxa de metabolismo mínima necessária para manter funções vitais de um indivíduo que encontra-se em repouso é chamada de metabolismo basal.

De acordo com Mountcastle (1980), os três fatores que mais influenciam o metabolismo são: o nível de atividade, a temperatura externa e a digestão de alimentos. Outras particularidades acerca do metabolismo é que quanto maior a idade, menor se torna a taxa metabólica e que o metabolismo de indivíduos do sexo feminino é inferior ao de indivíduos do sexo masculino.

#### ○ Respiração

A respiração tem como objetivo o fornecimento de oxigênio ( $O_2$ ) aos tecidos e a remoção de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) dos mesmos. O dióxido de carbono é gerado devido a reação entre o oxigênio e os nutrientes no metabolismo.

Segundo Guyton e Hall (2006), a respiração pode ser subdivida em quatro eventos: a ventilação pulmonar, a difusão do oxigênio e do dióxido de carbono entre os alvéolos e o sangue, o transporte de oxigênio e dióxido de carbono no sangue e nos líquidos corporais e por último a regulação da ventilação (feita pelo sistema nervoso).

O transporte de oxigênio pelo sangue ocorre principalmente por sua reação com moléculas de hemoglobina (Albuquerque-Neto, 2005).

#### ○ Sudorese

A sudorese consiste no fenômeno de vaporização de água na superfície da pele que pode ser proveniente da ação do mecanismo sudomotor de termorregulação (transpiração) ou da difusão natural de água pela pele. Como foi descrito anteriormente, mesmo que a superfície

da pele aparente estar seca, há sempre difusão de água através da pele de forma passiva. Portanto, somente a evaporação de suor devido a transpiração pode ser controlada (com redução da temperatura do ambiente, por exemplo).

A evaporação do suor na superfície da pele é um processo eficiente de eliminação de energia, pois, para que a evaporação ocorra uma elevada quantidade de calor é consumida. O suor é produzido nas glândulas sudoríparas localizadas na derme e é conduzido até a epiderme através de dutos. e posteriormente a sua evaporação (Mountcastle, 1980)

- Convecção

A convecção acontece na superfície da pele devido ao fluxo de correntes de ar nas proximidades da pele. De forma geral, correntes de ar que estão numa temperatura menor do que a da superfície da pele se aquecem ao entrar em contato com ela e se elevam devido ao gradiente de massa específica que é gerado pelo aquecimento. Quando o indivíduo encontra-se num ambiente comum, sem sistemas de ar condicionado ou ventilação artificial, é dito que ele sofre influência da convecção natural e caso esse ambiente seja modificado por algum dos fatores já mencionados, está submetido à convecção forçada. A magnitude do calor perdido por convecção está diretamente relacionada com a velocidade do ar, temperatura do ar e da pele.

- Radiação

A transferência de energia sob forma de calor devido ao fenômeno de radiação térmica ocorre na superfície da pele porque todo objeto de temperatura superior à temperatura zero absoluta ( $T = 0 \text{ K}$ ) irradia certa quantidade de energia por radiação, independentemente da presença de um meio físico ou não. O corpo humano transfere radiação térmica de forma difusa, ou seja, em todas as direções e possui emissividade aproximadamente igual a de um corpo negro perfeito, independentemente da cor visível da pele. Além disso, as superfícies do ambiente interno (paredes da vizinhança) também irradiam certa quantidade de energia que é absorvida pela superfície da pele.

- Condução

A transferência por interações de calor devido a condução ocorre em um meio sólido com temperaturas diferentes. No caso do interior do corpo humano, calor é transferido por condução entre os tecidos internos até a superfície da pele, entretanto, na superfície da pele o fenômeno de condução para o ambiente é tão baixo, quando comparado às outras componentes, que é constantemente desconsiderado em estudos da literatura.

### 3.2.1.2 Sistema de controle

O sistema de controle está relacionado com a resposta fisiológica devido a alterações no meio ambiente ou no nível de atividade do corpo. Ele atua buscando manter a energia interna do corpo, e conseqüentemente a temperatura interna corporal, constante. Fazem parte desse sistema de controle os mecanismos vasomotores (vasodilatação e vasoconstrição), mecanismo sudomotor (sudorese) e contrações musculares (calafrios).

- Mecanismos vasomotores

A energia que é transferida entre o corpo humano e o ambiente na superfície da pele é proveniente de regiões mais internas do corpo e gerada pelo metabolismo. Essa energia interna é conduzida pelas camadas internas de tecido até a pele e também é transportada pela corrente sanguínea.

Os mecanismos vasomotores são responsáveis por limitar ou acelerar a transferência de calor para a pele por meio da variação do fluxo sanguíneo nos “plexos” presentes entre a derme e a hipoderme. Quando é desejada a redução da transferência de calor para a pele, o mecanismo de vasoconstrição é ativado, o fluxo de sangue é reduzido e conseqüentemente observa-se a diminuição da temperatura da pele. Já quando deseja-se acelerar a transferência de calor para a pele, acontece a vasodilatação e o fluxo de sangue é aumentado. O mecanismo de vasoconstrição é ativado quando o ser humano encontra-se sob condições de baixa temperatura e o de vasodilatação é ativado sob temperatura elevada. O controle desse fluxo sanguíneo para a pele é feito pelo sistema nervoso simpático (ou autônomo) (Ferreira, 2001).

- Mecanismo sudomotor (sudorese)

A evaporação do suor na superfície da pele é um processo eficiente de eliminação de energia, pois, para que a evaporação ocorra uma elevada quantidade de energia é requerida. O suor é produzido nas glândulas sudoríparas localizadas na derme e é conduzido até a epiderme através de dutos. Mesmo que a superfície da pele aparente estar seca, há sempre difusão de água através da pele e posteriormente a sua evaporação (Mountcastle, 1980). Quando a temperatura do ambiente é maior do que a temperatura da pele a evaporação de suor é o único meio pelo qual o corpo humano consegue perder calor.

- Calafrios

Os calafrios são uma resposta do sistema termorregulatório do corpo humano devido à exposição prolongada a um ambiente com baixa temperatura. Para evitar a redução da temperatura

interna do corpo, a atividade metabólica no tecido muscular é aumentada, acarretando um aumento da energia produzida. Associado a geração extra de energia é observado o aumento da quantidade de oxigênio consumida, da frequência respiratória e da pressão sanguínea.

### **3.3 Conceitos do estudo do Conforto Térmico**

Nas subseções a seguir serão apresentados conceitos relevantes na área de estudo do Conforto Térmico.

#### **3.3.1 Neutralidade térmica**

A condição de neutralidade térmica é a condição na qual o corpo humano não sofre interferência do sistema de controle (ou termorregulatório), ou seja, há somente a atuação do sistema passivo para manter a temperatura corporal constante e no intervalo de temperatura ideal. A temperatura operativa tem de estar na faixa compreendida entre 29 e 31 °C para que o corpo humano despido esteja em neutralidade térmica (American Society of Heating e Engineers, 2005). Nos estudos de Ferreira (2001), dada uma anatomia proposta, o ambiente no qual o corpo humano encontra-se em neutralidade térmica tem uma temperatura igual a 30 °C, umidade relativa de 50 %, velocidade do ar inferior à 0,15 m/s e sistema de controle inativo.

#### **3.3.2 Conforto Térmico**

Segundo a American Society of Heating e Engineers (2005) o conforto térmico é definido como uma condição mental de um indivíduo que expressa satisfação com o ambiente térmico no qual está inserido. O termo “satisfação”, não é um conceito absoluto, portanto o julgamento do conforto térmico é um processo cognitivo que envolve muitos fatores influenciados por processos físicos, fisiológicos, psicológicos e outros.

Fanger (1982) correlacionou que, para um determinado nível de atividade metabólica no qual o corpo humano encontra-se próximo a condições de neutralidade térmica, a temperatura da pele e a taxa de produção de suor são os únicos parâmetros fisiológicos que influenciam no balanço energético. Portanto, ele criou correlações para o cálculo da temperatura da pele e da taxa de pro-

dução de suor quando o corpo humano está em situação de conforto térmico. Substituindo-se essas correlações no balanço energético, o referido autor propôs um balanço energético específico para condições de conforto térmico.

### 3.3.2.1 Indicadores de conforto térmico

- o PMV (*Predicted Mean Vote*)

O indicador de conforto térmico PMV (*Predicted Mean Vote*) é utilizado como forma de prever a média da resposta de um grande grupo de pessoas de acordo com a escala de sensação térmica definida pela ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*), mostrada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Escala de sensação térmica American Society of Heating e Engineers (2005)

+3	Muito quente
+2	Quente
+1	Calor leve
0	Neutralidade térmica
-1	Frio leve
-2	Frio
-3	Muito frio

Fanger (1970) correlaciona o PMV à diferença entre o fluxo de energia em uma condição ambiental genérica e o fluxo de energia necessário para condições de conforto térmico, para um determinado nível de atividade metabólica por meio da Equação 3.7.

$$PMV = \left( 0,352e^{-0,042(\dot{M}/A_D)} + 0,032 \right) IAT \quad (3.7)$$

Na qual  $M$  é a taxa do metabolismo em base energética,  $A_D$  a área do corpo despido e  $IAT$  o índice de atividade térmica, calculado pela Equação 3.8.

$$IAT = (\dot{M} - \dot{W}) - (\dot{Q}_c + \dot{Q}_r + \dot{H}_e + \Delta\dot{H}_{res}) \quad (3.8)$$

Em que  $(\dot{M} - \dot{W})$  é a taxa de energia líquida disponível para ser transferida para o ambiente;  $\dot{Q}_c$  a energia transferida na superfície da pele por convecção;  $\dot{Q}_r$  a energia transferida na superfície da pele por radiação;  $\dot{H}_e$  a energia transferida na superfície da pele devido ao

processo da sudorese e  $\Delta\dot{H}_{res}$  a energia transferida devido ao processo de respiração. Nota-se que o IAT é que uma variação temporal da energia interna do corpo.

- PPD (*Predicted Percent Dissatisfied*)

O PPD (*Predicted Percent Dissatisfied*) é um outro indicador de conforto térmico que é calculado baseado no indicador PMV, como mostra a Equação 3.9. Ele mostra a percentagem de pessoas que tendem a sentir certo desconforto com a condição de um determinado ambiente, seja esse desconforto relativo à sensações de muito quente ou muito frio.

$$PPD = 100 - 95e^{-(0,03353PMV^4+0,2179PMV^2)} \quad (3.9)$$

A relação entre o PMV e PPD é mostrada na Figura 4.5. Nota-se que um PPD = 10 % equivale a um intervalo de  $-0,5 \leq PMV \leq 0,5$  e que mesmo para  $PMV = 0$ , há 5 % de pessoas insatisfeitas.

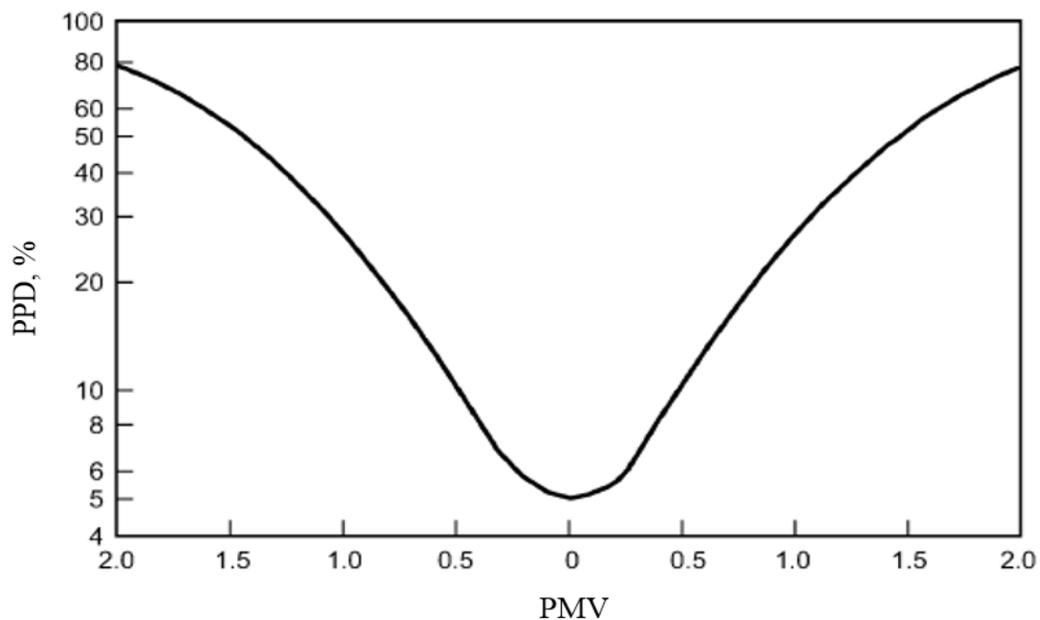


Figura 3.4: Relação entre PMV e PPD. FONTE: Adaptado de American Society of Heating e Engineers (2005)

### 3.4 Análises energéticas do corpo humano

Segundo a American Society of Heating e Engineers (2005), energia é produzida no interior do corpo humano devido ao metabolismo ( $M$ ). Parte dessa energia pode ser utilizada para a realiza-

ção de trabalho externo ( $\dot{W}$ ). O restante dessa energia deve ser então transferido para o meio através da pele e do aparelho respiratório. Caso essa energia não seja totalmente transferida ao ambiente, ou caso a quantidade de energia transferida supere a energia gerada, é causado o aumento/redução da temperatura, respectivamente. O balanço energético mostrado na American Society of Heating e Engineers (2005) é mostrado na Equação 3.10.

$$\dot{M}'' - \dot{W}'' = \dot{Q}''_{pele} + \dot{H}''_{res} + \dot{S}'' \quad (3.10)$$

Na qual  $\dot{M}'' - \dot{W}''$  expressa a taxa de energia líquida disponível para ser transferida ao ambiente,  $\dot{Q}''_{pele}$  a energia transferida na superfície da pele por convecção, radiação e vaporização de suor (associada a entalpia de vaporização);  $\dot{H}''_{res}$  a energia transferida devido ao processo de respiração (também associada a uma variação de entalpia) e  $\dot{S}''$  a energia armazenada no interior do corpo, ou seja, uma variação de energia interna com o tempo.

As interações térmicas entre o corpo e o ambiente são mostradas na Figura 3.5 utilizando o modelo térmico do corpo humano desenvolvido por Fanger (1972). Nesse modelo o corpo humano é representado por como um cilindro de seção circular, envolto em um cilindro concêntrico representando a vestimenta.

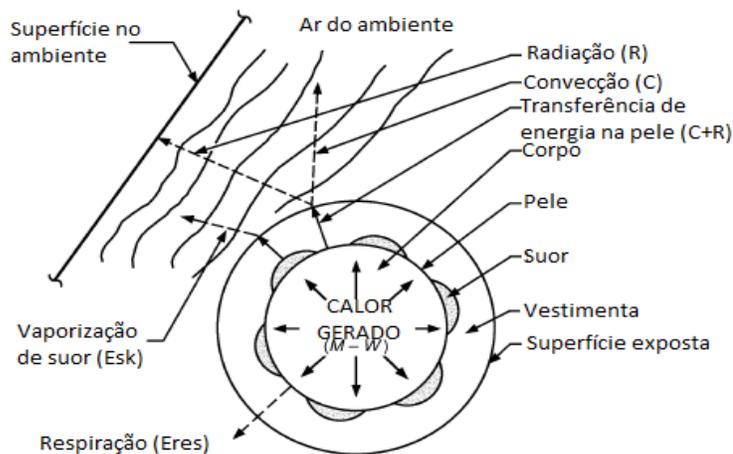


Figura 3.5: Modelo térmico do corpo humano desenvolvido por Fanger (1972). FONTE: American Society of Heating e Engineers (2005)

A transferência de calor por convecção na superfície da pele é dada pela Equação 3.11.

$$\dot{Q}_{conv}'' = h_c f_{roupa} (T_{roupa} - T_{ar}) \quad (3.11)$$

Na qual  $h_c$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção;  $f_{roupa}$  o fator de correção da superfície da vestimenta, calculado como  $A_{roupa}/A_D$ , na qual  $A_D$  é a área do corpo despido, proposta por Du BOIS e Du BOIS (1916) e mostrada na Equação 3.12;  $T_{roupa}$  a temperatura na superfície da vestimenta e  $T_{ar}$  a temperatura do ambiente.

$$A_D = 0,202m^{0,425}l^{0,725} \quad (3.12)$$

Em que  $m$  e  $l$  são a massa e altura do corpo despido, representado pelo cilindro.

A transferência de calor por radiação na superfície da pele é calculada pela Equação 3.13.

$$\dot{Q}_{rad}'' = f_{roupa} h_r (T_{roupa} - T_{mr}) \quad (3.13)$$

Na qual  $f_{roupa}$  o fator de correção da superfície da vestimenta;  $h_r$  o coeficiente de transferência de calor por radiação linearizado, calculado pela Equação 3.14;  $T_{roupa}$  a temperatura na superfície da vestimenta e  $T_{mr}$  a temperatura média radiante.

$$h_r = 4 \cdot f_{eff} \varepsilon \sigma \left( \frac{T_{roupa} + T_{mr}}{2} \right)^3 \quad (3.14)$$

Em que  $f_{eff}$  é o fator de correção para a área superficial efetiva da vestimenta, calculado por  $f_{eff} = A_{rad}/A_D$ ;  $\varepsilon$  a emissividade do corpo;  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2 K^4)$ );  $T_{mr}$  a temperatura média radiante e  $T_{roupa}$  é a temperatura na superfície da vestimenta.

As transferências de energia associadas aos processos de convecção e radiação são combinadas e por fim calculadas segundo mostrado da Equação 3.15, incluindo a resistência da roupa.

$$\dot{Q}''_{rad} + \dot{Q}''_{conv} = \frac{T_{pele} - T_{op}}{R_{roupa} + \frac{1}{f_{roupa}h}} \quad (3.15)$$

Em que  $T_{pele}$  é a temperatura na superfície da pele;  $T_{op}$  a temperatura operativa, calculada pela Equação 3.16;  $R_{roupa}$  a resistência térmica da vestimenta;  $f_{roupa}$  é a razão entre a área do corpo vestido e do corpo despido e  $h$  o coeficiente combinado de transferência de calor, calculado pela Equação 3.17.

$$T_{op} = \frac{T_a h_c + T_{mr} h_r}{h_c + h_r} \quad (3.16)$$

$$h = h_{conv} + h_{rad} \quad (3.17)$$

A energia transferida devido ao processo de sudorese na superfície da pele é calculada pela Equação 3.18.

$$\dot{H}''_{evap} = \dot{H}''_{evap,dif} + \dot{H}''_{evap,transp} = \frac{w(P_{pele,sat} - P_{va})}{R_{roupa} + \frac{1}{f_{roupa}h_e}} \quad (3.18)$$

Na qual  $w$  é fração da pele onde ocorre vaporização de suor, calculada pela Equação 3.19;  $P_{pele,sat}$  é a pressão de vapor de água na pele (normalmente o vapor encontra-se saturado);  $P_{va}$  a pressão de vapor de água no ambiente;  $R_{roupa}$  a resistência à troca de calor por evaporação da roupa;  $f_{roupa}$  o fator de área da vestimenta e  $h_e$  o coeficiente de troca de calor por evaporação.

$$w = w_{transp} + 0,06(1 - w_{transp}) \quad (3.19)$$

A eliminação de água pela superfície da pele ocorre por dois fenômenos: difusão natural de água na superfície da pele ( $\dot{H}''_{evap,dif}$ ) e transpiração devido a mecanismos termorregulatórios do corpo ( $\dot{H}''_{evap,transp}$ ). A transferência de calor devido à difusão natural ocorre somente na fração do corpo que não está coberta por suor, que equivale a 6 % do corpo. A Equação 3.20 mostra como ela é calculada.

$$\dot{H}_{evap,dif}'' = 0.06 (1 - w_{transp}) \cdot \dot{H}_{evap,max}'' \quad (3.20)$$

Na qual  $w_{transp}$  é a fração do corpo na qual a evaporação de suor decorrente da transpiração acontece, que pode ser determinada pela Equação 3.21.

$$w_{transp} = \frac{\dot{H}_{evap,transp}''}{\dot{H}_{evap,max}''} \quad (3.21)$$

E  $\dot{H}_{evap,max}$  é a transferência máxima de calor devido a evaporação de suor, que acontece quando toda a pele encontra-se molhada, ou seja,  $w = 1$ . Ela pode ser calculada como indica a Equação 3.22.

$$\dot{H}_{evap,max}'' = \frac{P_{pele,sat} - P_{va}}{R_{roupa} + \frac{1}{f_{roupa} h_e}} \quad (3.22)$$

Na qual  $P_{pele,sat}$  é a pressão de vapor de água na pele (normalmente o vapor encontra-se saturado);  $P_{va}$  a pressão de vapor de água no ambiente;  $R_{roupa}$  a resistência à troca de calor por evaporação da roupa;  $f_{roupa}$  o fator de área da vestimenta e  $h_e$  o coeficiente de troca de calor por evaporação.

E, a transferência de calor devido à evaporação de suor proveniente da transpiração é diretamente proporcional à quantidade de suor produzida, como mostra a Equação 3.23.

$$\dot{H}_{evap,transp}'' = \dot{m}_{transp}'' h_{lv} \quad (3.23)$$

Onde  $\dot{m}_{transp}''$  é a vazão mássica de produção de suor no corpo por unidade de área e  $h_{lv}$  a entalpia de vaporização da água na temperatura superficial da pele.

Por fim, para o balanço energético definido em American Society of Heating e Engineers (2005) observa-se que o termo relacionado a transferência de energia devido ao processo de respiração pode ser calculado pela Equação 3.24.

$$\dot{H}_{res}'' = \frac{\dot{m}_{res}(h_{ar,expirado} - h_{ar,inspirado})}{A_D} \quad (3.24)$$

Na qual  $\dot{m}_{res}$  é vazão mássica de ar inspirado, calculada pela Equação 3.25;  $h_{ar,expirado}$  a entalpia específica do ar expirado;  $h_{ar,inspirado}$  a entalpia específica do ar inspirado e  $A_D$  a área do corpo despido.

$$\dot{m}_{res} = 1,43 \cdot 10^{-6} \dot{M}'' A_D \quad (3.25)$$

Em que  $\dot{M}''$  é a taxa de metabolismo por unidade de área e  $A_D$  a área do corpo despido.

No estudo de Prek e Butala (2010) o balanço energético para a camada de núcleo e de pele é mostrado separadamente pelas Equações 3.26 e 3.27. A Figura 3.6 mostra o modelo de dois compartimentos utilizado pelo referido autor, explicitando também as transferências de energia e massa.

$$\frac{m_{núcleo} c_{núcleo}}{A_{Du}} \frac{dT_{núcleo}}{dt} = (1 - \eta) \dot{M}'' - \dot{H}_{res}'' - \dot{Q}_{núcleo-pele}'' \quad (3.26)$$

$$\frac{m_{pele} c_{pele}}{A_{Du}} \frac{dT_{pele}}{dt} = \dot{Q}_{núcleo-pele}'' - (\dot{Q}_{cd}'' + \dot{Q}_{conv}'' + \dot{Q}_{rad}'' + \dot{H}_{evap}'') \quad (3.27)$$

Na qual o autor não explicitou o que seria a variável  $\eta$ , pode-se inferir que se trataria de uma fração do metabolismo produzido no compartimento da pele do corpo em base energética, entretanto seria necessário também explicitar no lado direito da Equação 3.27 um termo  $\eta \dot{M}''$ ;  $c_{núcleo}$  é o calor específico do núcleo;  $c_{pele}$  o calor específico da pele;  $T_{núcleo}$  a temperatura do núcleo;  $T_{pele}$  a temperatura da pele;  $m_{núcleo}$  a massa do núcleo, calculada como:  $m_{núcleo} = m_{corpo} \cdot (1 - \alpha)$ , sendo  $m_{corpo}$  a massa do corpo e  $\alpha$  a massa relativa de pele, calculada com base na taxa de circulação sanguínea, que por sua vez é calculada com base em parâmetros dos sinais de temperatura, que no caso não é o foco deste estudo e podem ser encontrados em Prek e Butala (2010);  $m_{pele}$  é a massa da pele, calculada como  $m_{pele} = m_{corpo} \cdot \alpha$ ;  $\dot{H}_{res}''$  a taxa de transferência de energia pela respiração;  $\dot{M}''$  a taxa de produção de energia do metabolismo;  $\dot{Q}_{núcleo-pele}''$  a taxa de transferência de calor entre o núcleo e a pele;  $\dot{Q}_{cd}''$  a taxa de transferência de calor devido à condução (em casos nos quais há

vestimenta);  $\dot{Q}''_{conv}$  a taxa de transferência de calor devido à convecção;  $\dot{Q}''_{rad}$  a taxa de transferência de calor devido à radiação e  $\dot{H}''_{evap}$  a taxa de transferência de energia devido à sudorese.

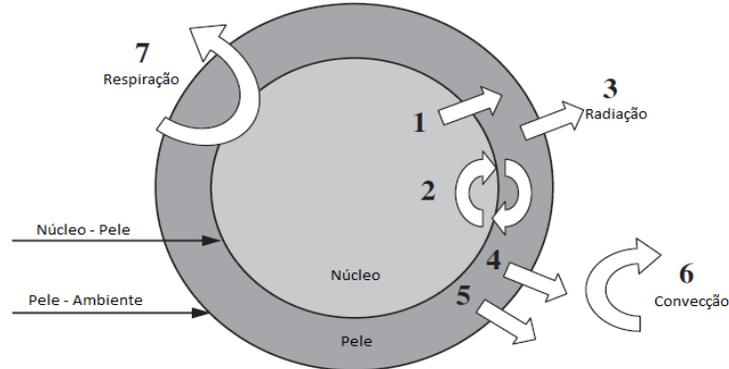


Figura 3.6: Modelo de dois compartimentos com transferências de energia e massa. 1 - Condução entre núcleo e pele, 2 - Transferência de energia devido à corrente sanguínea, 3 - Radiação térmica, 4 - Transferência de calor na superfície da pele devido ao fluxo de massa, 5 - Difusão de água e vaporização de suor, 6 - Convecção, 7 - Respiração. FONTE: Prek e Butala (2010)

A transferência de calor por condução entre o núcleo e a pele é dada pela Equação 3.28.

$$\dot{Q}''_{núcleo-pele,K} = K''_{núcleo-pele}(T_{núcleo} - T_{pele}) \quad (3.28)$$

Na qual  $K''_{núcleo-pele}$  é a condutividade térmica entre o núcleo e a pele;  $T_{núcleo}$  a temperatura do núcleo e  $T_{pele}$  a temperatura da pele.

A transferência de energia devido à circulação sanguínea entre o núcleo e a pele é dada pela Equação 3.29.

$$\dot{Q}_{núcleo-pele,sangue} = \dot{m}_{sangue}c_{p,sangue}(T_{núcleo} - T_{pele}) \quad (3.29)$$

Em que  $c_{p,sangue}$  é o calor específico do sangue;  $\dot{m}_{sangue}$  a vazão mássica de sangue;  $T_{núcleo}$  a temperatura do núcleo e  $T_{pele}$  a temperatura da pele. O autor somou a energia transferida devido à circulação sanguínea de devido a condução entre tecidos, entretanto verificou-se que são grandezas diferentes e portanto nesse estudo todos os termos de energia e exergia são multiplicados pela área do corpo despido e são dados em unidade de taxa de energia/exergia.

A transferência de calor por radiação térmica pela pele é calculada pela mesma equação mostrada na American Society of Heating e Engineers (2005) (Equação 3.13). Entretanto, o autor mostrou uma correlação para o cálculo da temperatura na superfície da vestimenta, mostrada na Equação 3.30.

$$T_{roupa} = \frac{T_{pele}}{I_{roupa}} + f_{roupa} \frac{h_c T_{ar} - h_r T_{mr}}{\frac{1}{I_{roupa}} + f_{roupa}(h_c + h_r)} \quad (3.30)$$

Em que  $T_{mr}$  é a temperatura média radiante;  $T_{pele}$  é a temperatura na pele;  $T_{ar}$  a temperatura do ambiente;  $f_{roupa}$  o fator de correção da superfície da vestimenta;  $I_{roupa}$  a isolamento típica da vestimenta (calculada com base na resistência da roupa como  $I_{roupa} = \frac{R_{roupa}}{0,155}$ ),  $h_c$  o coeficiente convectivo e  $h_r$  o coeficiente de radiação térmica linearizado (Equação 3.14).

Por fim, a transferência de calor total que ocorre na superfície da pele devido à transpiração e a difusão de água é dada pela Equação 3.31.

$$\dot{H}_{evap}'' = f_{roupa} f_{cle} LR h_c w (P_{pele,sat} - P_{va}) \quad (3.31)$$

Na qual  $f_{roupa}$  é o fator de correção da superfície da vestimenta;  $f_{cle}$  é a eficiência térmica efetiva da vestimenta; LR a relação de Lewis (16,5 K/kPa);  $h_c$  o coeficiente convectivo;  $w$  a fração do corpo na qual a evaporação de suor acontece e  $P_{pele,sat}$  e  $P_{va}$  são a pressão de vapor de água na pele (normalmente o vapor encontra-se saturado) e a pressão de vapor de água no ambiente, respectivamente.

O método de Mady *et al.* (2014) para análise energética está de acordo com as equações apresentadas em American Society of Heating e Engineers (2005), exceto para o caso da variação de entalpia associada ao processo de respiração, que é calculada pela Equação 3.32.

$$\Delta \dot{H}_{resp} = \dot{m}_{resp} c_{p,ar} (T_{ex} - T_{ar}) + \dot{m}_{resp} (\omega_{ex} h_{ex} - \omega_{ar} h_{ar}) \quad (3.32)$$

Em que  $\dot{m}_{res}$  é a vazão mássica de ar, calculada a partir da Equação 3.25;  $c_{p,ar}$  é o calor específico do ar;  $T_{ar}$  a temperatura do ar do ambiente;  $\omega_{ar}$  a umidade absoluta do ar do ambiente,

calculada pela Equação 3.33;  $h_{ar}$  a entalpia do ar inspirado;  $T_{ex}$  é a temperatura do ar expirado, calculada a partir da Equação 3.34;  $\omega_{ex}$  a umidade absoluta do ar expirado, calculada pela Equação 3.35 e  $h_{ex}$  a entalpia do ar expirado.

$$\omega_{ar} = \frac{0,622P_v(T_0)}{P - P_v(T_0)} \quad (3.33)$$

Nesse estudo, o ambiente de referência considerado está a  $P = P_0 = 101,32kPa$

$$T_{exp} = 32,6 + 0,066T_{op} + 32\omega_{ar} \quad (3.34)$$

Na qual  $T_{op}$  é a temperatura operativa e  $\omega_{ar}$  é a umidade absoluta do ar ambiente, calculada pela Eq 3.33.

$$\omega_{ex} = 0,0277 + 0,00065T_{ar} + 0,2\omega_{ar} \quad (3.35)$$

Em que  $T_{ar}$  e  $\omega_{ar}$  são a temperatura e umidade absoluta do ar do ambiente, respectivamente.

### 3.5 Análises exergéticas do corpo humano

Ao longo do tempo diversos novos métodos de análise exergética do corpo humano têm sido propostos. Prek (2006) utilizou o modelo de dois compartimentos (pele e núcleo) do corpo humano desenvolvido por Gagge *et al.* (1986) para realizar um balanço energético e exergético do corpo humano. Embora nesse modelo o corpo humano seja representado por dois compartimentos, o núcleo e a pele, a análise termodinâmica apresentada leva em conta apenas a pele. O autor também comparou a exergia destruída com os índices tradicionalmente usados na área, destacando-se o Voto Médio Estimado (PMV), e mostrou que o ponto de mínima exergia consumida coincide com o PMV correspondente às condições de neutralidade térmica. Prek e Butala (2010) aplicaram a análise exergética ao corpo humano de uma forma diferente do que havia sido feito anteriormente em Prek (2006). Em seu estudo, foi concluído que, mantendo parâmetros fisiológicos fixos, somente uma determinada combinação de parâmetros do ambiente garante mínima exergia destruída. Eles

correlacionaram essa condição com a condição de conforto térmico. Além disso, foi mostrado que a influência da umidade relativa na exergia destruída é pequena quando comparada a influência da temperatura operativa e que, quanto maior a resistência da vestimenta, mais sensível se torna a exergia destruída em relação a mudanças de temperatura. Posteriormente, Prek e Butala (2017) apresentaram uma revisão da análise exérgica proposta anteriormente para avaliar as irreversibilidades externas e internas do corpo humano.

Um outro estudo no qual o modelo de dois compartimentos foi utilizado foi o de Shukuya *et al.* (2010). Neste estudo foi descrito detalhadamente como o balanço de exergia do corpo humano é realizado. Simone *et al.* (2011) utilizaram o modelo exérgico do corpo humano desenvolvido por Shukuya *et al.* (2010) para calcular a taxa de exergia consumida (denominação dada pelo referido autor para a exergia destruída) e comparar com dados anteriores de indicadores de sensação térmica, como por exemplo, PMV (*Predicted Mean Vote*) e TVS (*Thermal Sensation Votes*). Eles concluíram que o ponto de menor exergia consumida pode ser relacionado com sensação térmica próxima à neutralidade térmica, tendendo para sensação de ligeiramente frio. Tokunaga e Shukuya (2011) realizaram experimentos nos quais indivíduos eram submetidos a dois tipos de ambientes: um sujeito a ventilação natural e outro com condições climáticas controladas por um sistema de ar condicionado. Eles utilizaram a modelagem em regime transiente com o modelo de análise exérgica descrito em Shukuya *et al.* (2010) e encontraram diferenças entre parâmetros calculados e parâmetros medidos que não puderam ser negligenciadas, como por exemplo o termo de área de superfície molhada, portanto tanto a análise exérgica calculada quanto a baseada na análise experimental foram mostradas.

Por meio da análise exérgica é possível avaliar as irreversibilidades internas e externas dos processos fisiológicos do corpo humano, portanto ela tem se mostrado útil para o projeto de ambientes internos. Intervenções nesse ambiente podem ser feitas de maneira a promover condições sob as quais os seus ocupantes estarão em conforto térmico. Com base nisso, Dovjak *et al.* (2015) aplicou a análise exérgica considerando tanto iterações entre ambiente interno e externo, como entre ambiente interno e o ser humano. Foram considerados dois tipos de ambientes internos, termicamente isolados e não isolados, para variações de parâmetros externos característicos de quatro condições climáticas (clima temperado, frio, quente e seco, quente e úmido). Foi mostrado que o isolamento térmico do ambiente interno resulta na diminuição da exergia destruída no corpo humano para as quatro condições analisadas.

Wu *et al.* (2013) apresentaram uma nova forma de realizar a análise exérgica do corpo humano baseado no modelo térmico de Gagge *et al.* (1971). Seu objetivo principal é analisar o efeito

das condições do ambiente interno no desempenho do ser humano. Seus resultados mostraram que a exergia destruída é inversamente proporcional ao desempenho do ser humano para um determinado intervalo de temperatura operativa entre 17 e 28 °C. Além disso, eles também concluíram que o ponto de máximo desempenho não necessariamente coincide com a condição de conforto térmico. Na realidade é observado que a condição máxima de performance coincide com sensação térmica próximas a condições de ligeiramente frio.

Mady *et al.* (2013) analisaram a duração da vida do ser humano por meio da análise exergética aplicada a um modelo térmico simplificado descrito posteriormente em Mady (2014) com a finalidade de calcular a exergia destruída durante a vida de um brasileiro em condições basais usando dados antropométricos médios. Em seu estudo foi confirmado a validade do princípio de Prigogine. Já em Mady *et al.* (2014) um modelo térmico mais complexo desenvolvido por Ferreira e Yanagihara (2009) foi utilizado para realizar a análise exergética do corpo humano. Foi concluído que para umidades relativas entre 40 % e 50 %, faixa de aplicação para finalidades de projetos de ar condicionado, a exergia destruída é mínima e coincide com a condição de conforto térmico. Porém, há faixas de aplicação nas quais somente o mínimo ponto de exergia destruída não é suficiente para caracterizar a condição de conforto térmico, como por exemplo, em casos de temperatura elevada e umidade relativa do ar reduzida a exergia destruída era mínima, porém sob essas condições o corpo não poderia estar em conforto térmico. Portanto, foi proposto que em condições específicas o conforto térmico deveria ser caracterizado não somente pelo ponto de mínima exergia destruída, mas também pela análise da exergia transferida ao ambiente e da eficiência exergética.

Os três métodos de análise exergética que serão utilizados neste estudo serão apresentados detalhadamente no Capítulo 4.

## 4 Materiais e métodos

Nesse capítulo, os métodos de análise exérgica que são utilizados neste estudo são apresentados detalhadamente, os modelos térmicos utilizados na simulação do corpo humano são também apresentados e, por fim, os procedimentos realizados são mostrados.

### 4.1 Modelos de análise exérgica do corpo humano

Nesta sessão são apresentados os modelos de análise exérgica aplicados ao corpo humano desenvolvidos por Shukuya *et al.* (2010), Prek e Butala (2010) e Mady *et al.* (2014).

#### 4.1.1 Modelo de análise exérgica de Shukuya *et al.* (2010)

Shukuya *et al.* (2010) descreve em detalhes como o balanço de exergia do corpo humano é desenvolvido. Este modelo foi utilizado em diversos outros estudos, como por exemplo Simone *et al.* (2011), Tokunaga e Shukuya (2011) e Dovjak *et al.* (2015), com o objetivo da análise de condições de conforto térmico. Como ponto de partida, são descritos alguns conceitos chaves como por exemplo os processos “entropia-exergia”. Os denominados processos “entropia-exergia” são caracterizados por quatro fases que, segundo o autor, acontece em qualquer sistema em operação, inclusive no corpo humano. Inicialmente o sistema é alimentado por energia ou massa que tem potencial para se dispersar, ou seja, contém exergia. Parte dessa energia/massa é dispersada dentro do sistema com a finalidade de realização de trabalho, exergia é então consumida. Devido a esse consumo de exergia, uma quantidade proporcional de entropia é gerada e posteriormente descartada no ambiente para que então o processo de alimentação de energia/massa seja então recomeçado.

Antes que o balanço de exergia do corpo humano seja discutido, o autor também reforça que deve ser analisado o balanço de água, de energia e de entropia no organismo. O modelo do corpo humano utilizado em seu estudo é o modelo denominado de dois compartimentos, composto por dois cilindros concêntricos representativos do núcleo e do envoltório do corpo humano, como mostrado na Figura 4.1.

O balanço de exergia do corpo humano utilizado por Shukuya *et al.* (2010) é mostrado na Equação 4.1.

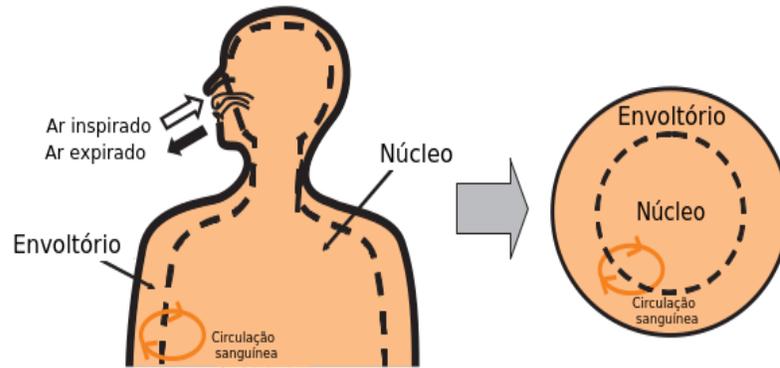


Figura 4.1: Modelo de dois compartimentos. FONTE: Shukuya *et al.* (2010)

$$\begin{aligned} \dot{B}''_{dest} = & (\dot{B}''_{met} + \dot{B}''_{ar,inspirado} + \dot{B}''_{\acute{a}gua-n\acute{u}cleo} + \dot{B}''_{\acute{a}gua-envolt\acute{o}rio} + \dot{B}''_{rad,absorvida}) \\ & - (\dot{B}''_{armazenada} + \dot{B}''_{ar,expirado} + \dot{B}''_{sudorese} + \dot{B}''_{rad,liberada} + \dot{B}''_{conv}) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Os termos de exergias no método deste autor é calculado por unidade de área. Portanto, para poder comparar todos em uma mesma base todos os termos foram multiplicados pela área do corpo humano.

#### o Exergia associada ao metabolismo

Embora em seu estudo seja enfatizado que o funcionamento do corpo humano e atividade do mesmo é possibilitada devido ao consumo de matéria orgânica rica em exergia química, nos chamados *chemical-exergy consumption processes*, o termo de exergia relacionado ao metabolismo, que é a base desses processos de conversão de exergia química em trabalho, é retratado somente como uma exergia térmica associada a uma diferença finita de temperatura, como mostrado na Equação 4.2.

$$\dot{B}''_{met} = \dot{M}'' \left( 1 - \frac{T_0}{T_{n\acute{u}cleo}} \right) \quad (4.2)$$

Em que  $\dot{M}''$  é a taxa de metabolismo em base energética;  $T_0$  a temperatura do ambiente de referência e  $T_{n\acute{u}cleo}$  a temperatura no núcleo.

Dessa forma, a exergia de reagentes e produtos envolvidos no conjunto de reações químicas que constituem o metabolismo não são consideradas. Estudos mostram que a exergia do

metabolismo calculada dessa forma é de pelo ao menos uma ordem de grandeza menor do que quando a exergia química das reações metabólicas são consideradas (Mady *et al.*, 2014).

○ **Exergia associada a água líquida gerada no núcleo do corpo devido ao metabolismo**

Shukuya *et al.* (2010) afirma que os átomos de hidrogênio presentes na matéria orgânica que é metabolizada podem reagir com átomos de oxigênio provenientes do processo de respiração, gerando moléculas de água no estado líquido. Portanto, segundo o referido autor é necessário contabilizar a exergia da água que é gerada no núcleo. A Equação 4.3 mostra a exergia da água gerada no núcleo pelo metabolismo.

$$\begin{aligned} \dot{B}''_{\text{água-núcleo}} = V''_{\text{água-núcleo}} \rho_{\text{água}} \left\{ c_{p,\text{água}} \left[ (T_{\text{núcleo}} - T_0) - T_0 \ln \left( \frac{T_{\text{núcleo}}}{T_0} \right) \right] \right. \\ \left. + \frac{\bar{R}}{M_{\text{água}}} T_0 \ln \left( \frac{P_{vs}(T_0)}{p_{v0}} \right) \right\} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Na qual  $V''_{\text{água-núcleo}}$  é a vazão volumétrica por unidade de área de água líquida gerada no núcleo do corpo que se torna vapor de água e é expirada na respiração, calculada pela Equação 4.4;  $\rho_{\text{água}}$  a massa específica da água líquida;  $c_{p,\text{água}}$  o calor específico da água líquida;  $T_{\text{núcleo}}$  a temperatura do núcleo do corpo;  $P_{vs}(T_0)$  a pressão de vapor de água saturado na temperatura do ambiente de referência;  $T_0$  a temperatura do ambiente de referência;  $M_{\text{água}}$  a massa molar de água e  $\bar{R}$  a constante universal dos gases.

$$V''_{\text{água-núcleo}} = 1,2 \cdot 10^{-6} \cdot \dot{M}'' (0,029 - 0,049 \cdot 10^{-4} p_{vr}) \quad (4.4)$$

Em que  $\dot{M}''$  é a taxa de metabolismo por unidade de área em base energética e  $p_{vr}$  a pressão de vapor de água na temperatura do ambiente.

Outros estudos, como por exemplo, Mady *et al.* (2014) e Batato *et al.* (1990) incluem a influência da formação de moléculas de água na análise exérgica por meio do cálculo da exergia relacionadas as reações químicas metabólicas.

○ **Exergia associada a água líquida gerada no envoltório do corpo devido ao metabolismo e do ar seco necessário para dispersão de vapor de água da transpiração**

De forma análoga ao que foi discutido no compartimento do núcleo, Shukuya *et al.* (2010) também afirma que há formação de moléculas de água no compartimento da pele. Além disso, ele afirma que a exergia associada a uma certa quantidade de ar seco tem que ser considerada na análise exérgica, visto que o vapor de água difundido no ambiente devido ao processo

da sudorese não irá ser dispersado em um espaço de vácuo, mas sim em um ambiente no qual já estão presentes moléculas de vapor de água. A Equação 4.5 mostra a exergia associada à água gerada no envoltório pelo metabolismo que irá sofrer dispersão.

$$\begin{aligned} \dot{B}''_{\text{água-envoltório}} = V''_{\text{água-envoltório}} \rho_{\text{água}} \left\{ c_{p,\text{água}} \left[ (T_{\text{pele}} - T_0) - T_0 \ln \left( \frac{T_{\text{pele}}}{T_0} \right) \right] \right. \\ \left. + \frac{\bar{R}}{M_{\text{água}}} T_0 \left[ \ln \left( \frac{P_{vs}(T_0)}{p_{v0}} \right) + \frac{P - p_{vr}}{p_{vr}} \ln \left( \frac{P - p_{vr}}{P - p_{v0}} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Em que  $V''_{\text{água-envoltório}}$  é a taxa volumétrica de água líquida gerada no envoltório do corpo como suor, calculada pela Equação 4.6;  $T_{\text{pele}}$  a temperatura da pele;  $c_{p,\text{água}}$  o calor específico da água líquida;  $p_{v0}$  a pressão do vapor de água no ambiente de referência,  $P$  é a pressão atmosférica do ar;  $p_{vr}$  a pressão do vapor de água no ambiente;  $T_0$  a temperatura do ambiente de referência;  $M_{\text{água}}$  a massa molar de água e  $\bar{R}$  a constante universal dos gases.

$$V''_{\text{água-envoltório}} = \frac{w \dot{H}''_{\text{evap,max}}}{h_{lv} \rho_{\text{água}}} \quad (4.6)$$

Na qual  $w$  é a fração da pele coberta por suor;  $\dot{H}''_{\text{evap,max}}$  o calor de vaporização de suor máximo, quando a pele está totalmente coberta por suor;  $h_{lv}$  a entalpia de vaporização da água e  $\rho_{\text{água}}$  a massa específica da água.

#### o Exergia associada ao ar inspirado

A Equação 4.7 mostra a exergia associada ao ar inspirado.

$$\begin{aligned} \dot{B}''_{\text{ar,inspirado}} = V''_{\text{insp}} \left\{ \left[ c_{p,\text{ar}} \left( \frac{M_{\text{ar}}}{\bar{R} T_{\text{ar}}} \right) (P - p_{vr}) + c_{p,\text{vap}} \left( \frac{M_{\text{água}}}{\bar{R} T_{\text{ar}}} \right) p_{vr} \right] \cdot \right. \\ \left. \left[ (T_{\text{ar}} - T_0) - T_0 \ln \left( \frac{T_{\text{ar}}}{T_0} \right) \right] + \frac{T_0}{T_{\text{ar}}} \left[ (p - p_{vr}) \ln \left( \frac{P - p_{vr}}{P - p_{v0}} \right) \right. \right. \\ \left. \left. p_{vr} \ln \left( \frac{p_{vr}}{p_{v0}} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Em que  $V''_{\text{insp}}$  é a vazão volumétrica de ar inspirado por unidade de área ( $V''_{\text{insp}} = 1,2 \cdot 10^{-6} \dot{M}''$ );  $c_{p,\text{ar}}$  o calor específico do ar;  $M_{\text{ar}}$  a massa molar do ar seco;  $\bar{R}$  a constante universal dos gases;  $T_{\text{ar}}$  a temperatura do ar do ambiente;  $P$  a pressão atmosférica do ar;  $p_{vr}$  a pressão do vapor de água no ambiente;  $c_{p,\text{vap}}$  o calor específico do vapor de água;  $M_{\text{água}}$  a massa

molar de água;  $T_0$  a temperatura do ambiente de referência e  $p_{v0}$  é a pressão do vapor de água no ambiente de referência.

○ **Exergia associada à radiação absorvida pela superfície da pele**

A Equação 4.8 mostra a exergia da radiação absorvida pela pele e vestimenta.

$$\dot{B}_{rad,absorvida}'' = f_{eff} f_{roupa} \sum_{j=1}^N \alpha_{pj} \varepsilon_{roupa} h_{rb} \frac{(T_j - T_0)^2}{T_j + T_0} \quad (4.8)$$

Na qual  $f_{eff}$  é a razão entre a área efetiva do corpo humano na qual ocorre a radiação pela área da superfície do corpo vestida;  $f_{roupa}$  a razão entre a área do corpo vestida pela área do corpo sem vestimenta;  $\alpha_{pj}$  o coeficiente de absorção entre a área superficial humana e uma superfície  $j$  nas proximidades do corpo;  $\varepsilon_{roupa}$  a emissividade da superfície vestida;  $h_{rb}$  o coeficiente de troca de calor por radiação de uma superfície escura e  $T_j$  a temperatura da superfície  $j$ .

Para este estudo, este termo é nulo pois a temperatura nas paredes da vizinhança ( $T_j$ ) é considerada igual a temperatura do ar do ambiente de referência ( $T_0$ ), portanto a diferença entre elas é nula.

○ **Exergia consumida**

A taxa de exergia destruída, ou consumida segundo a nomenclatura do referido autor, é definida pelo autor pela Equação 4.9.

$$\dot{B}_{cons}'' = T_0 \delta \dot{S}_{ger}'' \quad (4.9)$$

Em que  $\delta \dot{S}_{ger}''$  é a taxa de entropia gerada durante um período infinitesimal de tempo e  $T_0$  a temperatura do ambiente de referência.

○ **Exergia associada ao processo de sudorese na superfície da pele**

A exergia do processo de sudorese é dada pela Equação 4.10.

$$\dot{B}_{sudorese}'' = V_{\acute{a}gua-ent\acute{o}rio}'' \rho_{\acute{a}gua} \left\{ c_{p,vap} \left[ (T_{roupa} - T_0) - T_0 \ln \left( \frac{T_{roupa}}{T_0} \right) \right] + \frac{\bar{R}}{M_{\acute{a}gua}} T_0 \left[ \ln \left( \frac{P_{vr}}{p_{v0}} \right) + \frac{P - p_{vr}}{p_{vr}} \ln \left( \frac{P - p_{vr}}{P - p_{v0}} \right) \right] \right\} \quad (4.10)$$

Na qual  $V''_{\text{água-}envoltório}$  é taxa volumétrica de água líquida gerada no envoltório;  $\rho_{\text{água}}$  a massa específica da água;  $c_{p,vap}$  o calor específico do vapor de água;  $T_{roupa}$  é a temperatura na superfície da vestimenta;  $T_0$  a temperatura do ambiente de referência;  $\bar{R}$  a constante universal dos gases;  $M_{\text{água}}$  a massa molar da água;  $p_{vr}$  a pressão do vapor de água no ambiente;  $p_{v0}$  é a pressão do vapor de água no ambiente de referência e  $P$  a pressão atmosférica. De acordo com Shukuya *et al.* (2010), o último termo do lado direito da equação contabiliza a exergia associada ao ar seco que, segundo os autores, tem que ser considerada, como mostrado anteriormente na sessão de exergia associada a água líquida gerada no envoltório do corpo devido ao metabolismo e do ar seco necessário para dispersão de vapor de água da sudorese.

○ **Exergia associada à convecção na superfície da pele**

A exergia associada a convecção é dada pela Equação 4.11.

$$\dot{B}''_{conv} = f_{roupa} h_{c,roupa} (T_{roupa} - T_{ar}) \left( 1 - \frac{T_0}{T_{roupa}} \right) \quad (4.11)$$

Em que  $h_{c,roupa}$  é o coeficiente da transferência de calor convectiva média sobre a superfície de corpo vestida;  $f_{roupa}$  a razão entre a área do corpo com vestimenta e a área do corpo despido;  $T_{roupa}$  é a temperatura na superfície da vestimenta e  $T_{ar}$  a temperatura do ambiente.

○ **Exergia associada ao ar expirado**

A exergia do ar expirado é dada pela Equação 4.12.

$$\begin{aligned} \dot{B}''_{ar,expirado} = V''_{exp} \left\{ \left[ c_{p,ar} \left( \frac{M_{ar}}{\bar{R}T_{núcleo}} \right) (P - p_{vs}(T_{núcleo})) + c_{p,vap} \left( \frac{M_{\text{água}}}{\bar{R}T_{núcleo}} \right) p_{vs}(T_{núcleo}) \right] \cdot \right. \\ \left. \left[ (T_{núcleo} - T_0) - T_0 \ln \left( \frac{T_{núcleo}}{T_0} \right) \right] + \frac{T_0}{T_{núcleo}} \left[ (P - p_{vs}(T_{núcleo})) \cdot \right. \right. \\ \left. \left. \ln \left( \frac{P - p_{vs}(T_{núcleo})}{P - P_{v0}} \right) + p_{vs}(T_{núcleo}) \ln \left( \frac{p_{vs}(T_{núcleo})}{p_{v0}} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Na qual  $V''_{exp}$  é vazão volumétrica de ar expirado ( $V''_{exp} = V''_{insp}$ );  $c_{p,ar}$  o calor específico do ar;  $\bar{R}$  a constante universal dos gases;  $P$  a pressão atmosférica;  $M_{ar}$  a massa molar do ar;  $T_{núcleo}$  a temperatura do núcleo;  $M_{\text{água}}$  a massa molar da água;  $p_{vs}(T_{núcleo})$  a pressão de vapor de água saturado no núcleo do corpo e  $p_{v0}$  é a pressão do vapor de água no ambiente de referência

○ **Exergia associada à radiação emitida pela superfície da pele**

A exergia liberada por radiação pela pele e superfície da vestimenta é dada pela Equação 4.13.

$$\dot{B}''_{rad,liberada} = f_{eff} f_{roupa} \varepsilon_{roupa} h_{rb} \frac{(T_{roupa} - T_0)^2}{T_{roupa} + T_0} \quad (4.13)$$

Em que  $f_{eff}$  é a razão entre a área efetiva do corpo humano na qual ocorre a radiação pela área da superfície do corpo vestida;  $f_{roupa}$  a razão entre a área do corpo vestida pela a área do corpo sem vestimenta;  $\varepsilon_{roupa}$  a emissividade da superfície vestida;  $h_{rb}$  o coeficiente de troca de calor por radiação de uma superfície escura e  $T_j$  a temperatura da superfície  $j$ .

No caso desse estudo, foi considerado que o individuo está despido, portanto  $T_{roupa} = T_{pele}$ ,  $f_{roupa} = 1$  e  $\varepsilon_{roupa} = \varepsilon_{pele} = 1$ . E uma outra simplificação feita é de que  $h_{rb} = h_r$ .

○ **Exergia armazenada no núcleo e no envoltório**

A taxa de exergia armazenada no núcleo e no envoltório é dada pela Equação 4.14.

$$\dot{B}''_{armazenada} = \left\{ C''_{núcleo} \left( 1 - \frac{T_0}{T_{núcleo}} \right) dT_{núcleo} + C''_{envoltório} \left( 1 - \frac{T_0}{T_{pele}} \right) dT_{pele} \right\} \quad (4.14)$$

Em que  $C''_{núcleo}$  é a capacidade térmica do núcleo do corpo,  $dT_{núcleo}$  é um aumento infinitesimal da temperatura do núcleo do corpo,  $C''_{envoltório}$  é a capacidade térmica do envoltório do corpo,  $dT_{pele}$  é um aumento infinitesimal na temperatura da pele. Este termo do balanço energético proposto por Shukuya *et al.* (2010) não tem muito significado em uma análise exérgica, pois o calor é uma forma de interação de fronteira associada a uma diferença finita de temperatura, que no caso não é armazenado no corpo, mas sim tornado uma variação de exergia no corpo ( $dB/dt$ ).

Por fim, para um cenário no qual foi considerado uma temperatura do ambiente interno ( $T_{ar}$ ) igual a 22 °C, uma temperatura do ambiente externo de referência ( $T_0$ ) igual a 0 °C e uma umidade relativa de 40 %, Shukuya *et al.* (2010) obteve as seguintes taxas de exergias mostradas na Figura 4.2

O termo denotado por ar úmido e água representa a soma das exergias associadas ao ar inspirado e água gerada, tanto no núcleo quanto no envoltório, devido ao metabolismo. Na sua análise dos termos de exergia de entrada, a exergia da soma dessas componentes não são tão expressivas quando comparadas as exergias associadas ao metabolismo e a radiação absor-

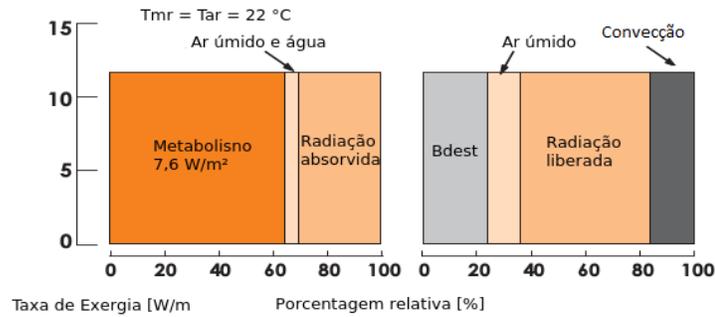


Figura 4.2: Taxas de exergias obtidas com o método de Shukuya *et al.* (2010). FONTE: Adaptado de Shukuya *et al.* (2010)

vida. Já nos termos de exergia de saída, a maior contribuição é dada pela exergia associada a radiação liberada.

#### 4.1.2 Modelo térmico desenvolvido por Prek e Butala (2010)

A exergia destruída total no corpo humano é dada pela Equação 4.15.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{B}''_{dest} = & \Delta \dot{B}''_{núcleo-pele,K} + \Delta \dot{B}''_{núcleo-pele,sangue} + \Delta \dot{B}''_{conv} + \Delta \dot{B}''_{rad} + \Delta \dot{B}''_{evap} \\ & + \Delta \dot{B}''_{a, massa} + \Delta \dot{B}''_{a,q} + \Delta \dot{B}''_{res} + \Delta \dot{B}''_{res,q} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Os termos de exergias no método deste autor é calculado por unidade de área. Portanto, para poder comparar todos em uma mesma base todos os termos foram multiplicados pela área do corpo humano.

- **Exergia associada à transferência de energia entre o núcleo e a pele**

Segundo Prek e Butala (2010), a transferência de energia entre o núcleo e a pele ocorre de duas formas: condução de calor devido à diferença de temperatura entre o núcleo e a pele, que é calculada com base na condutividade térmica dos tecidos do corpo humano e devido ao fluxo de sangue entre o núcleo e a pele. As exergias associadas a essas transferências de exergia é dada pela Equação 4.16 e Equação 4.17, respectivamente.

$$\Delta \dot{B}''_{núcleo-pele,K} = \dot{Q}''_{núcleo-pele,K} \left( 1 - \frac{T_{op}}{T_{núcleo}} \right) \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{B}_{núcleo-pele,sangue} = \dot{Q}_{núcleo-pele,sangue} \left[ (T_{núcleo} - T_{pele}) - T_0 \ln \left( \frac{T_0}{T_{núcleo}} \right) \right] \\ - \dot{m}_{sangue} \nu \Delta p \end{aligned} \quad (4.17)$$

Na qual  $\dot{Q}''_{núcleo-pele,K}$  é a taxa de transferência de calor que ocorre por condução no interior do corpo, calculada pela Equação 3.8 na sessão 3.6;  $\dot{Q}_{núcleo-pele,sangue}$  é a taxa de transferência de energia que ocorre devido ao fluxo de sangue, calculada pela Equação 3.9 na sessão 3.6;  $T_{núcleo}$  é a temperatura no núcleo;  $T_{pele}$  é a temperatura da pele;  $T_0$  é a temperatura do ambiente de referência;  $\dot{m}_{sangue}$  é a vazão volumétrica de sangue;  $\nu$  é o volume sistólico, ou seja, o volume de sangue bombeado pelo ventrículo esquerdo por batimento cardíaco;  $\Delta p$  é a diferença entre a pressão ventricular máxima e residual e  $T_{op}$  é a temperatura operativa, calculada pela Equação 3.12.

Neste estudo, essas exergias associadas as irreversibilidades internas foram inicialmente calculadas com a aproximação mostrada na Equação 4.18, pois baseando-se em equações mostradas em (Prek, 2005) e (Prek, 2006) acreditava-se que toda essa energia transferida nas camadas internas deveria ser igual o “calor” gerado devido a atividade metabólica.

$$\Delta \dot{B}_{interno} = \dot{M} \left( 1 - \frac{T_0}{T_{núcleo}} \right) \quad (4.18)$$

Posteriormente foi feita uma análise desses termos aplicados a um modelo simplificado descrito na sessão 4.2 levando em consideração a transferência de calor por condução e pela circulação sanguínea.

#### o **Transferência de calor por radiação térmica pela pele**

Já a exergia da radiação é definida de forma geral como mostra a Equação 4.19:

$$B_r = \varphi \varepsilon \sigma A T^4 \left[ 1 - \frac{4 T_0}{3 T} + \frac{1}{3} \left( \frac{T_0}{T} \right)^4 \right] \quad (4.19)$$

Na qual  $\varphi$  é o fator de forma da superfície,  $A$  é a área da superfície,  $\varepsilon$  é a emissividade,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann,  $T$  é a temperatura inicial e  $T_0$  é a temperatura no estado final (ambiente de referência).

Entre duas superfícies, a exergia da radiação é definida pela Equação 4.20.

$$B_{r,1\rightarrow 2} = \varphi_{1\rightarrow 2} \varepsilon_{1\rightarrow 2} \sigma A_1 T^4 \left[ (T_1^4 - T_2^4) - \frac{4}{3} T_0 (T_1^3 - T_2^3) \right] \quad (4.20)$$

Em que, para esta análise,  $T_1$  é a temperatura da pele  $T_{pele}$  e  $T_2$  é a temperatura da superfície da vestimenta  $T_{roupa}$ . Por simplificação, a emissividade e o fator de forma são considerados unitários, portanto, tem-se que por unidade de área, a exergia devido à radiação é dada pela Equação 4.21.

$$\Delta \dot{B}_{rad}'' = \frac{\sigma \left[ (T_{pele}^4 - T_{roupa}^4) - \frac{4}{3} T_{roupa} (T_{pele}^3 - T_{roupa}^3) \right]}{A_{Du}} \quad (4.21)$$

Entretanto, é observado por análise dimensional que a área de DuBois observada nesta equação deverá estar na realidade multiplicando e a temperatura  $T_0$  deveria estar multiplicando o termo de  $(4/3) \cdot (T_{pele}^3 - T_{roupa}^3)$ .

Essa maneira de calcular a exergia associada à radiação tem sido contestada ao longo dos anos, tendo em vista que a aplicação das equações definidas acima estariam corretas apenas se o corpo humano estivesse diretamente exposto à radiação solar, que não é o caso de quando estuda-se o conforto térmico em ambientes.

#### ○ **Transferência de calor e massa por convecção térmica pela pele**

A exergia associada ao fenômeno de convecção que ocorre na superfície da pele é calculada pela Equação 4.22.

$$\Delta \dot{B}_{conv}'' = \dot{Q}_{conv}'' \left( T_{roupa} - T_{ar} - T_{ar} \ln \left( \frac{T_{roupa}}{T_{ar}} \right) \right) \quad (4.22)$$

Em que  $\dot{Q}_{conv}''$  é a taxa de transferência de calor por convecção, por unidade de área,  $T_{roupa}$  é a temperatura na superfície da vestimenta e  $T_{ar}$  é a temperatura do ar do ambiente. Para não alterar o modelo exergético desenvolvido por (Prek e Butala, 2010) essa equação foi utilizada, porém por análise dimensional percebe-se que o resultado obtido não equivale a propriedade exergia.

#### ○ **Difusão de água na superfície da pele e transpiração**

A exergia associada a transferência de calor devido a difusão natural de água pela pele e vaporização de suor que acontece na superfície da pele é dada pela Equação 4.23.

$$\Delta \dot{B}_{evap}'' = \dot{H}_{evap} \left( 1 - \frac{T_{op}}{T_{pele}} \right) \quad (4.23)$$

Na qual  $T_{op}$  é a temperatura operativa e  $T_{pele}$  é a temperatura na superfície da pele. Entretanto, para este trabalho foi considerado que a temperatura operativa é igual a temperatura do ar,  $T_{ar}$ .

o **Transferência de energia na superfície da pele devido à transferência de massa**

Uma corrente de ar úmido é composta por ar seco e certa quantidade de vapor de água. A exergia presente nessa corrente, por unidade de massa de ar seco, pode ser calculada a partir da Equação 4.24 (Bejan, 1988).

$$b = (c_{p,ar} + \omega \cdot c_{p,vap}) \left[ (T - T_0) - T_0 \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) \right] + (1 + 1,608\omega) R_{ar} T_0 \ln \left( \frac{P}{P_0} \right) + R_{ar} T_0 \left[ (1 + 1,608\omega) \ln \left( \frac{1 + 1,608\omega_0}{1 + 1,608\omega} \right) \right] + 1,608\omega \ln \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right) \quad (4.24)$$

Percebe-se que a exergia do ar úmido é composta por três parcelas nesse caso: a primeira é a parcela térmica, seguida pela parcela mecânica e por fim a parcela relacionada à exergia química. Na equação 4.24, são observados os seguintes parâmetros:  $c_{p,ar}$  é o calor específico do ar atmosférico,  $\omega$  é a umidade absoluta do ar,  $c_{p,vap}$  é o calor específico do vapor de água,  $T$  é uma temperatura arbitrária,  $T_0$  é a temperatura do ambiente de referência,  $P_0$  é a temperatura do ambiente de referência e  $\omega_0$  é a umidade absoluta no ambiente de referência.

A transferência de energia na superfície da pele devido à transferência de massa ocorre tanto do ambiente para a pele ( $\dot{B}_{e, massa}''$ ) quanto da pele para o ambiente ( $\dot{B}_{s, massa}''$ ), portanto a Equação 4.24 é reescrita como mostrado nas Equações 4.25 e 4.26.

$$\dot{B}_{e, massa}'' = \dot{m}_{ar} (c_{p,ar} + \omega c_{p,vap}) \left[ T_e - T_0 - T_0 \ln \left( \frac{T_e}{T_0} \right) \right] + R_{ar} T_0 \left[ (1 + 1,608\omega_e) \ln \left( \frac{1 + 1,608\omega_{0,sat}}{1 + 1,608\omega_e} \right) + 1,608\omega_e \ln \left( \frac{\omega_e}{\omega_{0,sat}} \right) \right] \quad (4.25)$$

$$\dot{B}_{s, massa}'' = \dot{m}_{ar} (c_{p,ar} + \omega c_{p,vap}) \left[ T_s - T_0 - T_0 \ln \left( \frac{T_s}{T_0} \right) \right] + (1 + 1,608\omega_s) R_{ar} T_0 \ln \left( \frac{P_s}{P_0} \right) + R_{ar} T_0 \left[ (1 + 1,608\omega_s) \ln \left( \frac{1 + 1,608\omega_{0,sat}}{1 + 1,608\omega_s} \right) + 1,608\omega_s \ln \left( \frac{\omega_s}{\omega_{0,sat}} \right) \right] \quad (4.26)$$

Em que  $\dot{m}_{ar}$  é a vazão mássica de ar, calculada pela Equação 4.27;  $c_{p,ar}$  é o calor específico

do ar atmosférico,  $\omega_e$  é a umidade absoluta do ar de "entrada";  $\omega_s$  é a umidade absoluta do ar de "saída";  $c_{p,vap}$  é o calor específico do vapor d'água,  $T_e$  é uma temperatura de "entrada" do fluxo de massa;  $T_s$  é uma temperatura de "saída" do fluxo de massa;  $T_0$  é a temperatura do ambiente de referência,  $P_0$  é a temperatura do ambiente de referência e  $\omega_0$  é a umidade absoluta no ambiente de referência .

$$\dot{m}_{ar} = \frac{\dot{H}_{evap}}{h_{lv}} (\omega_{0,sat} - \omega_{insp}) \quad (4.27)$$

E, por fim, o termo de exergia associado a esse fenômeno de transferência de massa na superfície da pele é calculado pela Equação 4.28.

$$\dot{B}_{a, massa}'' = \dot{B}_{s, massa}'' - \dot{B}_{e, massa}'' \quad (4.28)$$

Além disso, embora a Equação 4.24 já considere a exergia química, o método de Prek e Butala (2010) considera ainda uma parcela de exergia química associada a esse processo, calculada pela Equação 4.29

$$\dot{B}_{a,q}'' = (\dot{m}_{dif} + \dot{m}_{suor})(-R_{\acute{a}gua} T_0 \ln \phi_a) \quad (4.29)$$

Na qual  $\dot{m}_{dif}$  é a vazão mássica de água que sofre difusão na superfície da pele;  $\dot{m}_{suor}$  é a vazão mássica de suor da transpiração;  $R_{\acute{a}gua}$  a constante do vapor de água;  $T_0$  a temperatura do ambiente de referência e  $\phi_a$  a umidade relativa do ar. O autor não mostrou o método de calculo de  $\dot{m}_{dif}$  e  $\dot{m}_{suor}$  portanto foi utilizado as equações mostradas na American Society of Heating e Engineers (2005).

#### o **Respiração**

Para o caso do ar inspirado, a Equação 4.24 pode ser reescrita como mostrado na Equação 4.30. Percebe-se que a exergia do ar úmido é composta por três parcelas nesse caso: a primeira é a parcela térmica, seguida pela parcela mecânica e por fim a parcela relacionada à exergia química.

$$\begin{aligned} \dot{B}_{insp}'' = \dot{m}_{a,res} (c_{p,ar} + \omega c_{p,vap}) & \left[ T_{insp} - T_0 - T_0 \ln \left( \frac{T_{insp}}{T_0} \right) \right] \\ + R_{ar} T_0 & \left[ (1 + 1,608\omega_{insp}) \ln \left( \frac{1 + 1,608\omega_{0,sat}}{1 + 1,608\omega_{insp}} \right) + 1,608\omega_{insp} \ln \left( \frac{\omega_{insp}}{\omega_{0,sat}} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.30)$$

Nesse caso, a temperatura do ar inspirado é  $T_{insp}$  e a umidade absoluta é  $\omega_{insp}$ . Como o ar é inspirado na mesma pressão da referência, percebemos que a parcela mecânica não existe.

E, para o ar expirado, a Equação 4.24 pode ser reescrita, como mostra a Equação 4.31.

$$\begin{aligned} \dot{B}''_{exp} = \dot{m}_{a,res} (c_{p,ar} + \omega c_{p,vap}) \left[ T_{exp} - T_0 - T_0 \ln \left( \frac{T_{exp}}{T_0} \right) \right] + (1 + 1,608\omega_{exp}) R_{ar} T_0 \ln \left( \frac{P_{exp}}{P_0} \right) \\ + R_{ar} T_0 \left[ (1 + 1,608\omega_{exp}) \ln \left( \frac{1 + 1,608\omega_{0,sat}}{1 + 1,608\omega_{exp}} \right) + 1,608\omega_{exp} \ln \left( \frac{\omega_{exp}}{\omega_{0,sat}} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.31)$$

Considera-se que o ar está sendo expirado à mesma pressão do ambiente ( $P_{exp} = P$ ). Além disso, a vazão mássica de ar pode ser calculada pela Equação 4.32.

$$\dot{m}_{a,res} = 1.89. \left( \dot{M}'' + \dot{M}''_{calafrios} \right) \quad (4.32)$$

Na qual  $\dot{M}''$  é a taxa de metabolismo e  $\dot{M}''_{calafrios}$  é a taxa de metabolismo extra gerada no tecido muscular devido à exposição prolongadas a baixas temperaturas. Entretanto, durante as simulações foi observado que a vazão mássica de ar respirado calculada por essa equação não refletiu valores realistas, portanto foi utilizado a Equação 3.25 da norma American Society of Heating e Engineers (2005).

Por fim, a parcela de exergia térmica associada ao processo de respiração é mostrada na Equação 4.33.

$$\Delta \dot{B}''_{resp} = \dot{B}''_{insp} - \dot{B}''_{exp} \quad (4.33)$$

Além disso, o autor ainda considerou a variação de exergia química associada a respiração é dada pela Equação 4.34.

$$\Delta B''_{res,q} = \dot{m}_{vap,res} \cdot (-R_{\acute{a}gua} T_0 \ln \phi_{ar}) \quad (4.34)$$

Em que  $\dot{m}_{vap,res}$  é a vazão mássica de vapor de água contida no ar,  $R_{\acute{a}gua}$  é dado por  $R_{\acute{a}gua} = \bar{R}/M_{\acute{a}gua}$  e  $\phi_{ar}$  é a umidade relativa do ar.

Utilizando esse modelo, Prek e Butala (2010) obteve os seguintes resultados mostrados na Figura 4.3 para indivíduos vestidos para condições climáticas típicas de verão e inverno. Ressalta-se as condições ambientais sob as quais o valor de exergia destruída é mínimo por meio de um marcador preto, para ambos os casos mostrados.

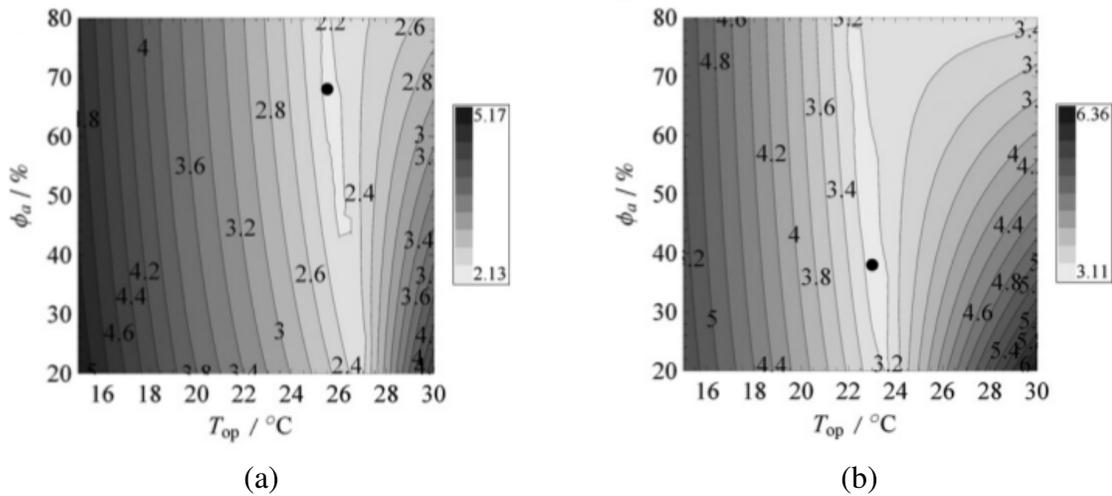


Figura 4.3: Exergia destruída obtida com o modelo de Prek e Butala (2010) em função da temperatura e umidade relativa do ar para indivíduos vestidos para: (a) Verão. (b) Inverno. FONTE: Prek e Butala (2010)

#### 4.1.3 Método de análise exérgica aplicada ao corpo humano desenvolvido por Mady et al. (2014)

O volume de controle utilizado por Mady *et al.* (2014) é subdividido em dois volumes de controle: o volume de controle para processos na escala celular (VC 1) e o volume de controle do restante do corpo, composto por sistema térmico, circulatório e respiratório (VC 2). A Figura 4.4 mostra os fluxos de energia e massa no volume de controle utilizado, sendo a análise de exergia desenvolvida baseada na fronteira externa que engloba o VC 1 e o VC 2 mostrada na Equação 4.35.

$$\dot{B}_{dest} = \left( \dot{B}_M - \frac{dB}{dt} \Big|_{\Delta T} \right) - \dot{W} - (\dot{B}_r + \dot{B}_c + \dot{B}_e + \Delta \dot{B}_{res}) \quad (4.35)$$

Na qual  $\dot{B}_M$  é a taxa exergia associada ao metabolismo;  $dB/dt$  a variação de exergia interna com o tempo devido a  $\Delta T$  do ambiente;  $\dot{W}$  a potência;  $\dot{B}_r$  a taxa de exergia associada ao processo de radiação;  $\dot{B}_c$  a taxa de exergia associada a convecção;  $\dot{B}_e$  a taxa de exergia associada a sudorese e  $\Delta \dot{B}_{res}$  a taxa de exergia associada ao processo de respiração ( $\Delta \dot{B}_{res} = \dot{B}_{exp} - \dot{B}_{insp}$ ). Neste estudo foi considerado que o corpo humano está em condições de repouso,  $\dot{W} = 0$ .

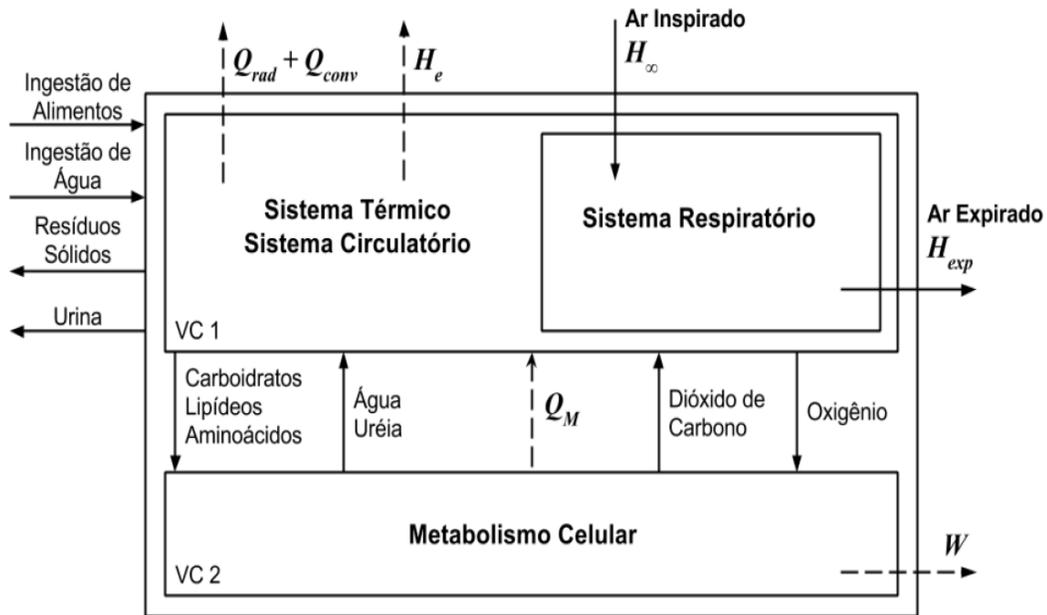


Figura 4.4: Volume de controle utilizado em Mady *et al.* (2014). FONTE: Adaptado de Mady *et al.* (2014)

#### o **Metabolismo**

No trabalho desenvolvido por Mady *et al.* (2014), a taxa exergia associada ao metabolismo é calculada a partir da Equação 4.36.

$$\dot{B}_M = \dot{B}_{reag} - \dot{B}_{prod} = 9558\dot{m}_{O_2} + 3928\dot{m}_{CO_2} - 1823\dot{m}_N \quad (4.36)$$

Na qual  $\dot{m}_{O_2}$  é a vazão mássica de oxigênio consumido,  $\dot{m}_{CO_2}$  a vazão mássica de dióxido de carbono produzida e  $\dot{m}_N$  a vazão mássica de nitrogênio. A obtenção dessa equação é discutida em Mady e De Oliveira Junior (2013).

A taxa de exergia associada a energia liberada devido ao metabolismo celular é definido pela Equação 4.37.

$$\dot{B}_{Q_M} = \dot{Q}_M \left( 1 - \frac{T_0}{T_{corpo}} \right) \quad (4.37)$$

Em que  $\dot{Q}_M$  é a energia líquida associada ao metabolismo ( $\dot{Q}_M = \dot{M} - \dot{W}$ ) e por sua vez,  $\dot{M} = H_{reag} - H_{prod} = 11179\dot{m}_{O_2} + 2502\dot{m}_{CO_2} - 1580\dot{m}_N$ . Embora esta transferência de energia seja mostrada, quando se adota a fronteira do volume de controle externa ao corpo (na pele), essa parcela de exergia não é contabilizada.

○ **Radiação**

A taxa de exergia associada à radiação é dada pela Equação 4.38.

$$\dot{B}_r = \dot{Q}_r \left( 1 - \frac{T_{mr}}{T_{pele}} \right) \quad (4.38)$$

Em que  $\dot{Q}_r$  é a taxa de transferência de energia por radiação,  $T_{mr}$  é a temperatura média radiante e  $T_{pele}$  é a temperatura da pele.

○ **Convecção**

A taxa de exergia associada à convecção é dada pela Equação 4.39.

$$\dot{B}_c = \dot{Q}_c \left( 1 - \frac{T_{ar}}{T_{pele}} \right) \quad (4.39)$$

Na qual  $\dot{Q}_c$  é a taxa de transferência de energia por convecção,  $T_{ar}$  é a temperatura do ambiente e  $T_{pele}$  é a temperatura da pele.

○ **Respiração**

A taxa de exergia associada ao processo da respiração é dada pela Equação 4.40.

$$\Delta \dot{B}_{res} = \dot{m}_{res} \sum_i \left[ y_{i,ex} c_{p,i} \left( T_{ex} - T_0 - T_0 \ln \left( \frac{T_{ex}}{T_0} \right) \right) + y_{i,ex} R_i T_0 \ln \left( \frac{P_{i,ex}}{P_{i,0}} \right) \right] \quad (4.40)$$

Em que  $\dot{m}_{res}$  é a vazão mássica de ar, calculada a partir da Equação 3.21;  $y_{i,ex}$  é a fração mássica de cada componente presente no ar expirado,  $c_{p,i}$  é o calor específico de cada componente presente no ar expirado,  $T_{ex}$  é a temperatura do ar expirado, calculada a partir da Equação 3.32;  $T_0$  é a temperatura do ambiente de referência, que para essa abordagem é igual a temperatura do ambiente no qual o corpo está inserido ( $T_{ar}$ );  $R_i$  é a constante de cada componente presente no ar expirado,  $P_{i,ex}$  é a pressão parcial de cada componente do ar expirado e  $P_{i,0}$  é a pressão parcial de cada componente do ar expirado no ambiente de referência.

Nesse estudo, o ambiente de referência considerado está a  $P_0 = 101,32kPa$ , e seguindo o modelo de Dalton de gases ideais, podemos reescrever a relação entre pressões presentes no último termo da equação pela Equação 4.41.

$$\frac{P_{i,ex}}{P_{i,0}} = \frac{y_{i,ex} P_0}{y_{i,0} P_0} = \frac{y_i}{y_{i,0}} \quad (4.41)$$

Em que  $y_{i,ex}$  é a fração mássica dos componentes presentes no ar expirado e  $y_{i,0}$  é a fração mássica de cada componente no ambiente de referência. Para esta abordagem, a referência utilizada é o próprio ambiente no qual o corpo está inserido.

#### o Sudorese

A Equação 4.42 apresenta a taxa de exergia associada ao processo de sudorese.

$$\dot{B}_e = \dot{m}_{vap} (h_{lv} - T_0 s_{lv}) + \dot{m}_{vap} R_{vap} T_0 \ln \left( \frac{P_{vap,pele}}{P_{vap,0}} \right) \quad (4.42)$$

No qual  $\dot{m}_{vap}$  é a vazão mássica de suor, calculada por:  $\dot{m}_{vap} = \dot{H}_e / h_{lv}$ ;  $h_{lv}$  e  $s_{lv}$  são as entalpia e entropia de vaporização do vapor de água na temperatura da superfície da pele, respectivamente;  $R_{vap}$  a constante do vapor de água;  $T_0$  a temperatura do ambiente de referência;  $P_{vap,pele}$  a pressão de vapor de água na temperatura da superfície da pele e  $P_{vap,0}$  a pressão de vapor de água na temperatura do ambiente de referência.

Mady *et al.* (2014) utilizou esse método de análise exérgica descrita nesta sessão para analisar o comportamento da taxa de exergia destruída em relação à mudanças ambientais de temperatura e umidade relativa. Foi analisado por ele inclusive a influência da vestimenta nesse parâmetro, como é mostrado na Figura 4.5

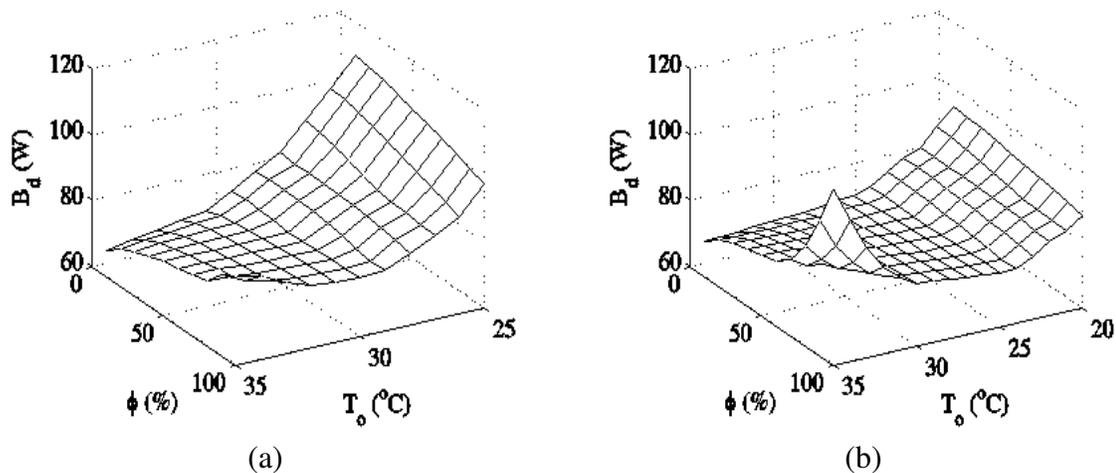


Figura 4.5: Exergia destruída obtida com o modelo de Mady *et al.* (2014) em função da temperatura e umidade relativa do ar para: (a) Indivíduo despido. (b) Indivíduo com vestimenta. FONTE: Mady *et al.* (2014)

## 4.2 Modelo térmico do corpo humano para a aplicação dos três métodos de análise exergética

O modelo térmico do corpo humano utilizado neste estudo é descrito em Ferreira (2001) e Ferreira e Yanagihara (2009). Ele é composto por 15 elementos cilíndricos de seção elíptica representando a cabeça, pescoço, tronco, braços, antebraços, mãos, coxas, pernas e pés. Os cilindros representativos da cabeça e do tronco são subdivididos em três diferentes seções com o objetivo de promover a modelagem de órgãos específicos. A Figura 4.6 mostra o modelo térmico do corpo humano.

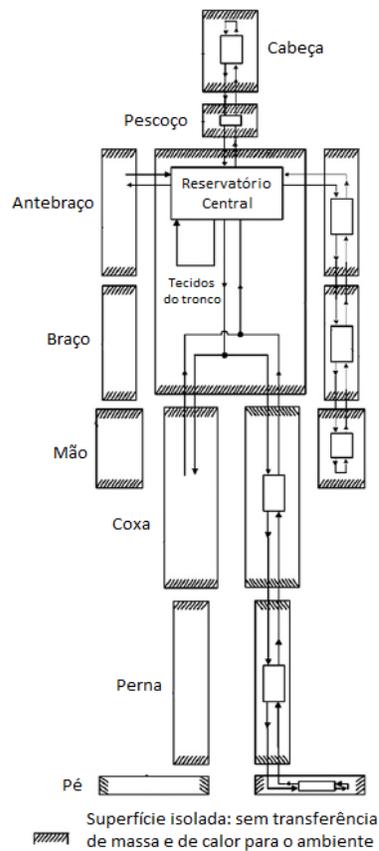


Figura 4.6: Modelo do corpo humano. FONTE: Ferreira (2001)

Cada cilindro apresenta uma combinação específica de tecidos, com propriedades termodinâmicas uniformes e específicas. As Figuras 4.7 a 4.10 mostram as combinações de tecidos para as diferentes partes do corpo humano.

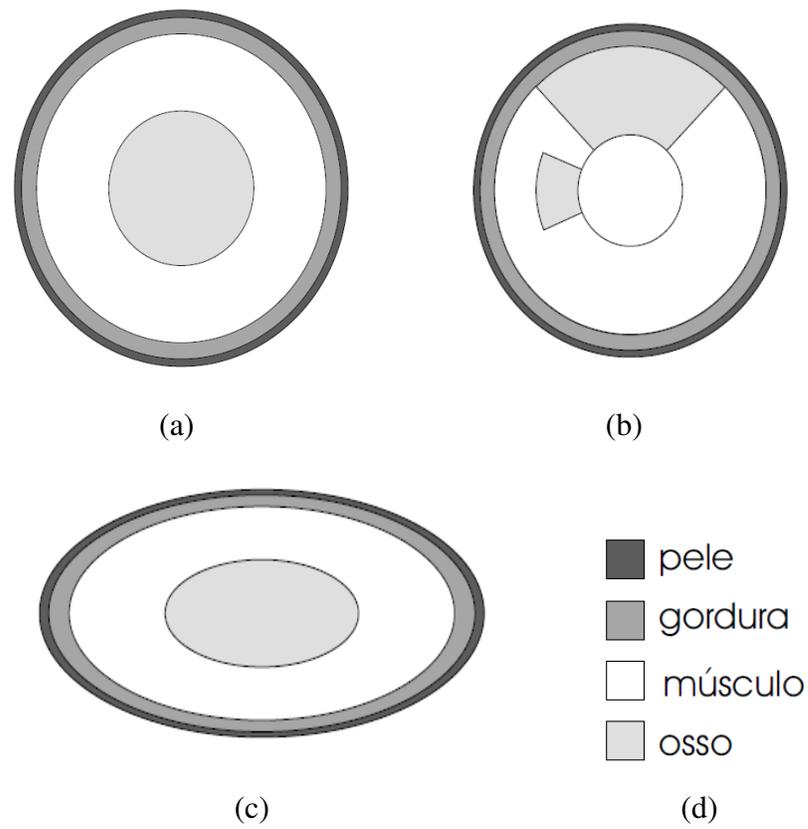


Figura 4.7: Representação dos membros inferiores. (a) Coxa. (b) Perna Esquerda. (c) Pé. (d) Combinação de tecidos. FONTE: Ferreira (2001)

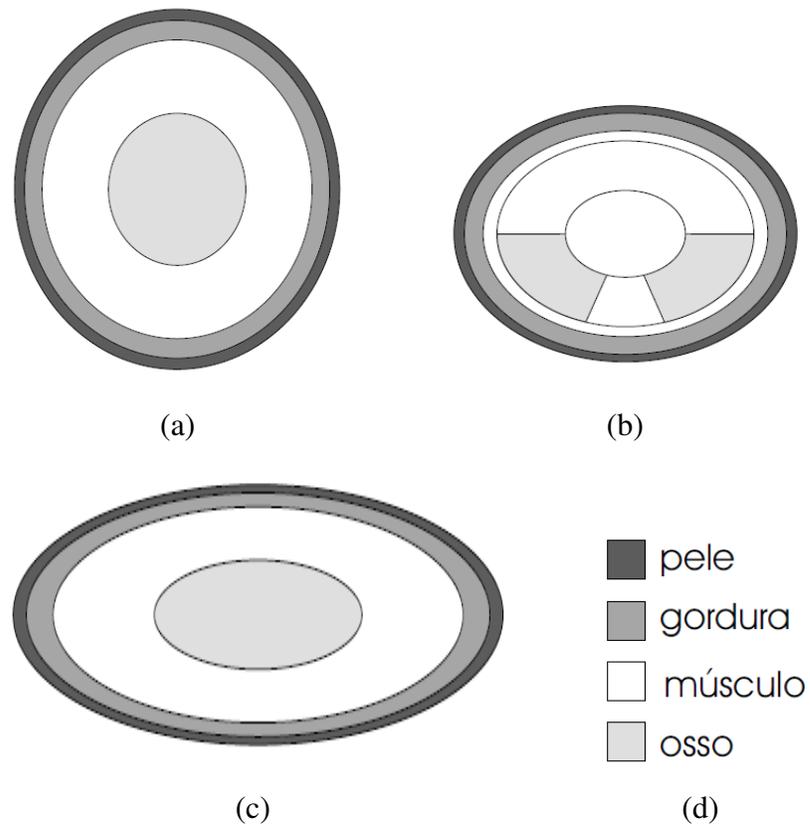


Figura 4.8: Representação dos membros superiores. (a) Braço. (b) Antebraço. (c) Mão. (d) Combinação de tecidos. FONTE: Ferreira (2001)

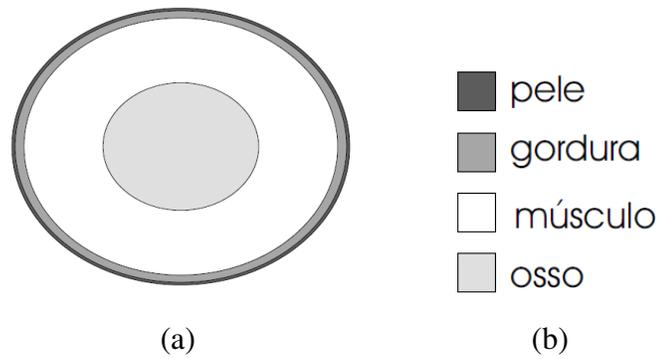


Figura 4.9: Representação do pescoço. FONTE: Ferreira (2001)

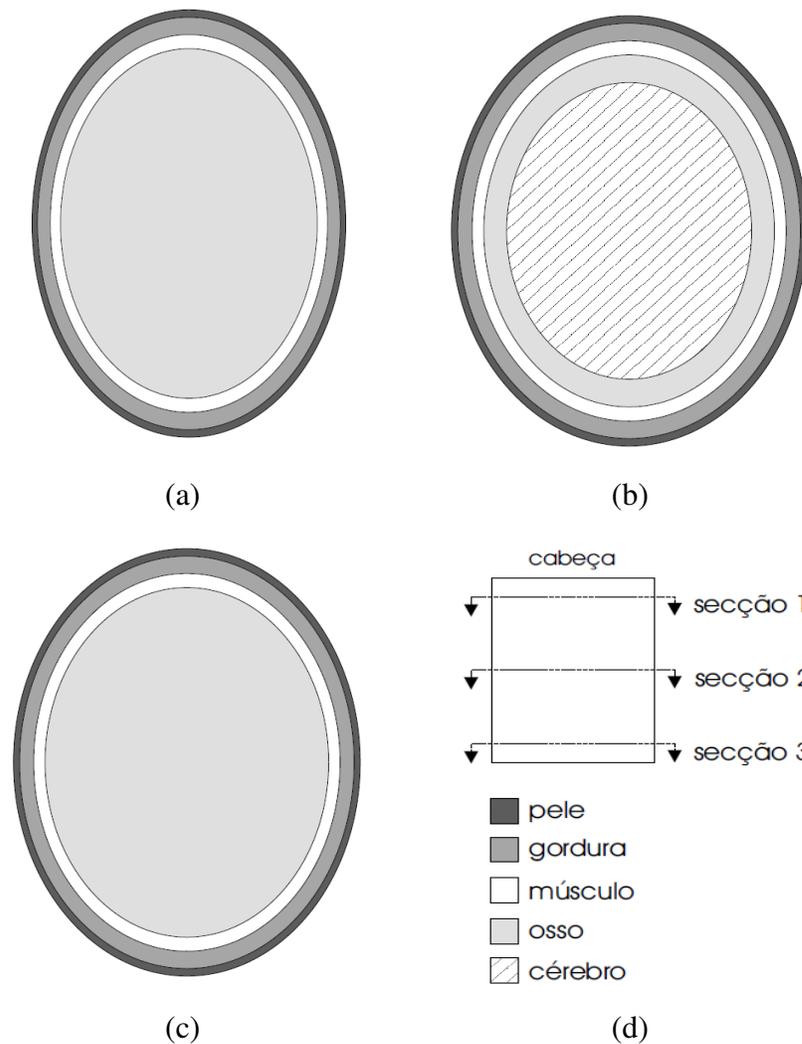


Figura 4.10: Representação da cabeça. (a) Seção 1. (b) Seção 2. (c) Seção 3. (d) Combinação de tecidos e órgãos. FONTE: Ferreira (2001)

Para cada membro, o sistema circulatório é composto por: um reservatório que contém o sangue arterial e outro de sangue venoso, com exceção para o tronco no qual há somente o reservatório venoso. Os reservatórios trocam calor entre si e com os tecidos adjacentes, sendo que esta última troca de calor segue o modelo de Pennes (1948). A Figura 4.11 mostra a representação do sistema circulatório para um elemento  $j$ .

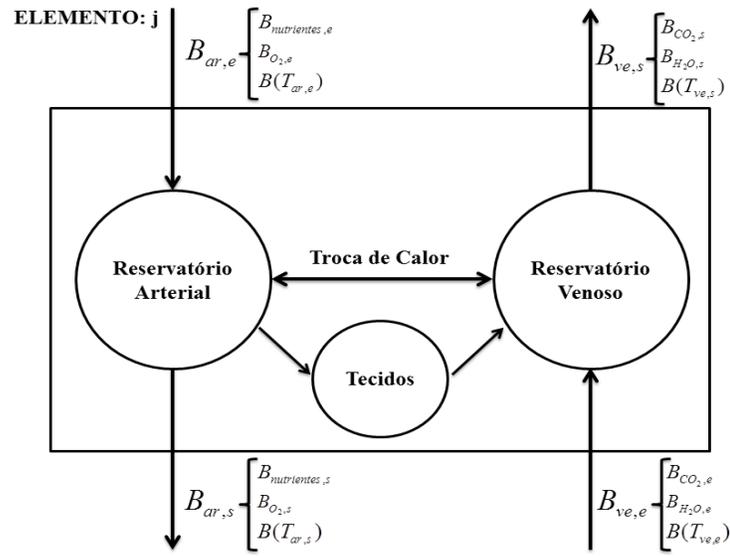


Figura 4.11: Sistema circulatório em um elemento  $j$ . FONTE: Ferreira (2001)

A Tabela 4.1 mostra algumas dessas propriedades para os diferentes tipos de tecidos utilizados no modelo.

Tabela 4.1: Propriedades e parâmetros para cada tecido/órgão. FONTE: Ferreira (2001)

Tecido	Massa específica [ $kg/m^3$ ]	Calor específico [ $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ]	Condutividade térmica [ $W/(m \cdot ^\circ C)$ ]	Metabolismo basal [ $W/m^3$ ]	$10^6$ . Perfusão sanguínea [ $m^3_{sangue}/(m^3_{tecido} \cdot s)$ ]
Pele	1085	3680	0,47	368	362
Gordura	920	2300	0,21	368	77
Músculo	1085	3800	0,51	684	543
Osso	1357	1700	0,75	368	0
Cérebro	1080	3850	0,49	9472	9000
Pulmão	560	3520	0,28	339	41301
Coração	1080	3550	0,47	24128	14400
Víscera	1080	3504	0,49	3852	8925
Sangue	1059	3850	—	0	—

A equação do balanço energético é resolvida para cada membro, segundo os métodos apresentados em Ferreira (2001), para o cálculo do perfil de temperatura ao longo do tempo. Por fim, as transferências de energia e exergia são calculadas, a análise exérgica é feita e indicadores de conforto térmico são obtidos.

### 4.3 Modelo térmico simplificado do corpo humano

Um modelo simplificado desenvolvido por Mady (2014) e aplicado por Martinez Garcia *et al.* (2016) no escopo do estudo de conforto térmico foi utilizado para a análise das irreversibilidades internas consideradas por Prek e Butala (2010). Nesse modelo o corpo humano é representado por apenas um cilindro subdividido em quatro compartimentos. Cada compartimento representa um diferente tipo de tecido, como é mostrado na Figura 4.12.

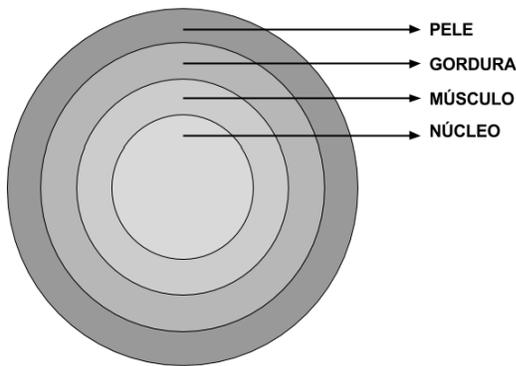


Figura 4.12: Modelo simplificado do corpo humano. Fonte: Mady (2014)

Considerando o centro das circunferências como o ponto inicial da direção radial, os raios do núcleo, músculo, gordura e pele são: 6,078 cm, 9,326 cm, 10,26 cm e 10,54 cm, respectivamente. Justifica-se a escolha desse modelo para essa análise devido a homogeneidade das propriedades de cada compartimento. A Tabela 4.2 mostra algumas propriedades termodinâmicas e características do modelo de Mady (2014).

Tabela 4.2: Propriedades e parâmetros para cada tecido/órgão. FONTE: Mady (2014)

Tecido	Massa específica [ $kg/m^3$ ]	Calor específico [ $J/(kg.K)$ ]	Condutividade térmica [ $W/(m.K)$ ]	Metabolismo basal [ $W/m^3$ ]	$10^6$ . Fluxo de sangue basal [ $m^3_{sangue}/(m^3_{tecido}.s)$ ]
Pele	1085	3680	0,43	368,1	361,7
Gordura	920	2300	0,21	368,4	76,7
Músculo	1085	3800	0,51	684,2	542
Núcleo	1119	2679	0,5038	2653	4155

A Figura 4.13 mostra as transferências de calor e massa que acontecem nos compartimentos do modelo.

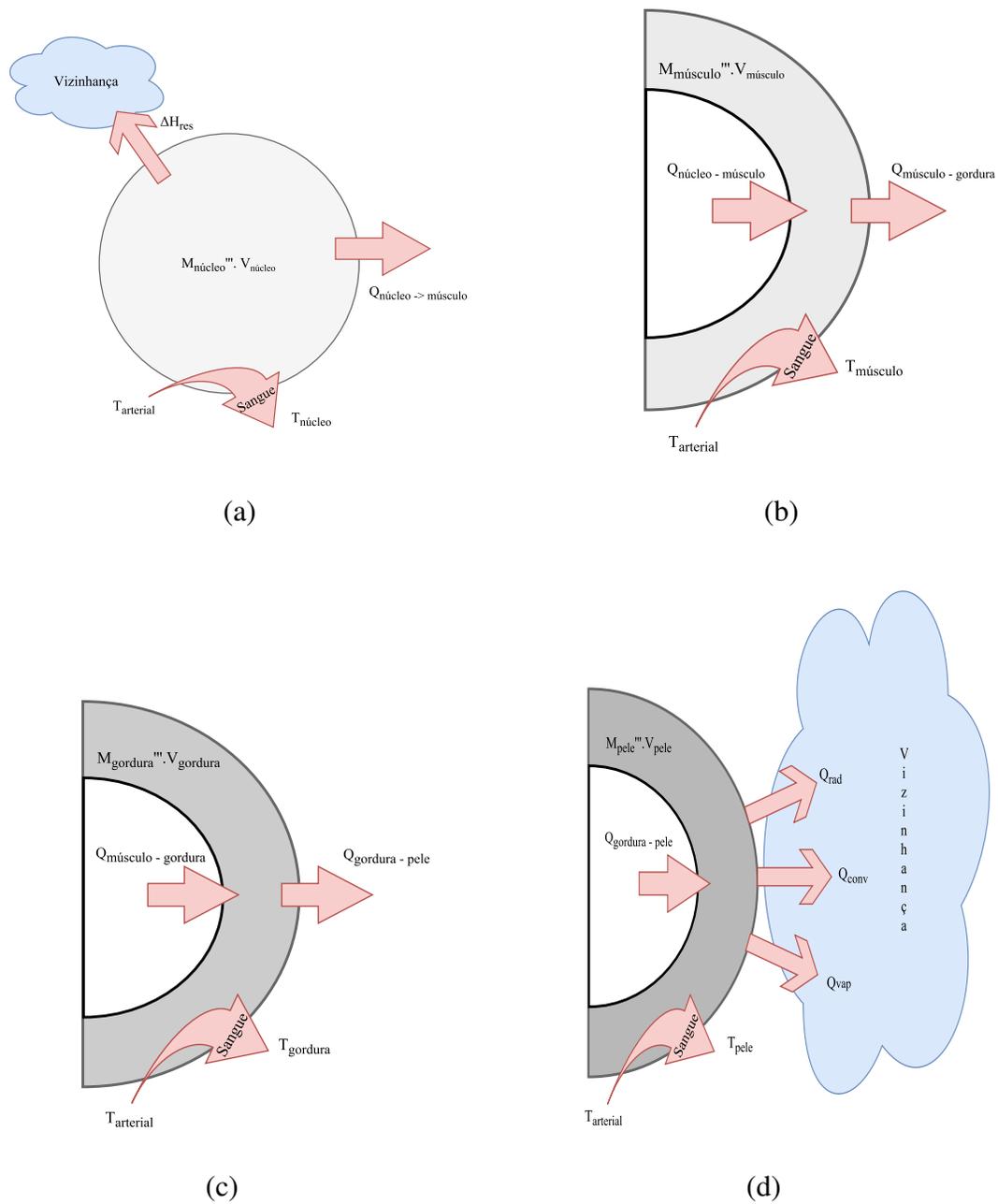


Figura 4.13: Transferências de energia e massa nos compartimentos. (a) Núcleo. (b) Músculo. (c) Gordura. (d) Pele.

O sistema circulatório para este caso é representado por um reservatório de sangue arterial no qual ocorre a entrada do sangue venoso proveniente de todos os compartimentos (na temperatura do compartimento) e a saída de sangue arterial com destino a cada compartimento, como mostrado na Figura 4.14.



Figura 4.14: Sistema circulatório no modelo simplificado do corpo humano

Segundo a modelagem elaborada por Mady *et al.* (2014) a condução de calor entre os compartimentos pode ser modelada segundo a Equação 4.43.

$$\dot{Q}_{i \rightarrow j} = \frac{\bar{k} 2\pi l (T_i - T_j)}{\ln\left(\frac{r_j}{r_i}\right)} \quad (4.43)$$

Na qual os subíndices  $i$  e  $j$  referem-se aos compartimentos;  $\bar{k}$  é a condutividade térmica média entre os compartimentos  $i$  e  $j$ , calculada de acordo com a Equação 4.44;  $T_i$  a temperatura do compartimento  $i$ ;  $T_j$  a temperatura do compartimento  $j$  e  $l$  a altura do cilindro representativo do corpo humano.

$$\bar{k} = \frac{k_i V_i + k_j V_j}{V_i + V_j} \quad (4.44)$$

Por exemplo, a transferência de energia por condução da camada do núcleo para o músculo é mostrada na Equação 4.45.

$$\dot{Q}_{\text{núcleo} \rightarrow \text{músculo}} = \frac{\bar{k}_{\text{núcleo} \rightarrow \text{músculo}} 2\pi l (T_{\text{núcleo}} - T_{\text{músculo}})}{\ln\left(\frac{r_{\text{músculo}}}{r_{\text{núcleo}}}\right)} \quad (4.45)$$

Na qual,  $\bar{k}_{\text{núcleo} \rightarrow \text{músculo}}$  é a condutividade média entre os compartimentos do núcleo e do músculo, calculada como  $\bar{k}_{\text{núcleo} \rightarrow \text{músculo}} = \frac{k_{\text{núcleo}} V_{\text{núcleo}} + k_{\text{músculo}} V_{\text{músculo}}}{V_{\text{núcleo}} + V_{\text{músculo}}}$ ;  $l$  é a altura do cilindro;  $T_{\text{núcleo}}$  a temperatura do compartimento do núcleo;  $T_{\text{músculo}}$  a temperatura do compartimento do músculo;  $r_{\text{músculo}}$  o raio do compartimento do músculo e  $r_{\text{núcleo}}$  o raio do compartimento do núcleo.

Já Prek e Butala (2010) calcula o calor conduzido entre os compartimentos, para o modelo de dois compartimentos, como mostrado na Equação 4.46.

$$\dot{Q}''_{núcleo \rightarrow pele} = k''_{núcleo \rightarrow pele} (T_{núcleo} - T_{pele}) \quad (4.46)$$

Na qual  $k''_{núcleo \rightarrow pele}$  é a condutibilidade térmica do corpo por unidade de área;  $T_{núcleo}$  a temperatura do núcleo e  $T_{pele}$  a temperatura da pele. O valor de  $k''_{núcleo \rightarrow pele}$  em seu estudo é de  $5,28 \text{ W}/(m^2 K)$ , extraído de American Society of Heating e Engineers (2005). Este valor de condutividade térmica foi adaptado por meio da observação das unidades como mostrado no Anexo A para a utilização neste modelo simplificado de quatro camadas. Portanto, adaptando o modelo de Prek e Butala (2010) a esse modelo simplificado de Mady (2014) tem-se então as transferências de calor por condução entre os compartimentos mostradas nas Equações 4.47 a 4.49.

$$\dot{Q}_{núcleo \rightarrow músculo} = 2\pi l r_{núcleo} k''_{núcleo} (T_{núcleo} - T_{músculo}) \quad (4.47)$$

$$\dot{Q}_{músculo \rightarrow gordura} = 2\pi l r_{músculo} k''_{músculo} (T_{músculo} - T_{gordura}) \quad (4.48)$$

$$\dot{Q}_{gordura \rightarrow pele} = 2\pi l r_{gordura} k''_{gordura} (T_{gordura} - T_{pele}) \quad (4.49)$$

Na qual  $l$  é a altura do cilindro representativo do corpo humano;  $T_{núcleo}$  a temperatura do núcleo;  $T_{músculo}$  a temperatura do músculo;  $T_{gordura}$  a temperatura do compartimento de gordura;  $T_{pele}$  a temperatura da pele e as condutividades térmicas dos compartimentos são dadas pelas Equações 4.50 a 4.52.

$$k''_{núcleo} = \frac{k_{núcleo}}{r_{núcleo}} \quad (4.50)$$

$$k''_{músculo} = \frac{k_{músculo}}{r_{músculo} - r_{núcleo}} \quad (4.51)$$

$$k''_{gordura} = \frac{k_{gordura}}{r_{gordura} - r_{músculo}} \quad (4.52)$$

Na qual  $k_{núcleo}$ ,  $k_{músculo}$  e  $k_{gordura}$  são as condutividades térmica das camadas, extraídas do modelo de Mady (2014) e  $r_{núcleo}$ ,  $r_{músculo}$  e  $r_{gordura}$  os raios de cada camada extraídos também de Mady (2014).

Para fazer uma comparação desses dois métodos distintos em mesma base entre as duas modelagens do fenômeno de condução é proposto aqui neste estudo o cálculo de uma resistência térmica de condução. A esquematização dessas resistências térmicas propostas é mostrada na Figura 4.18.

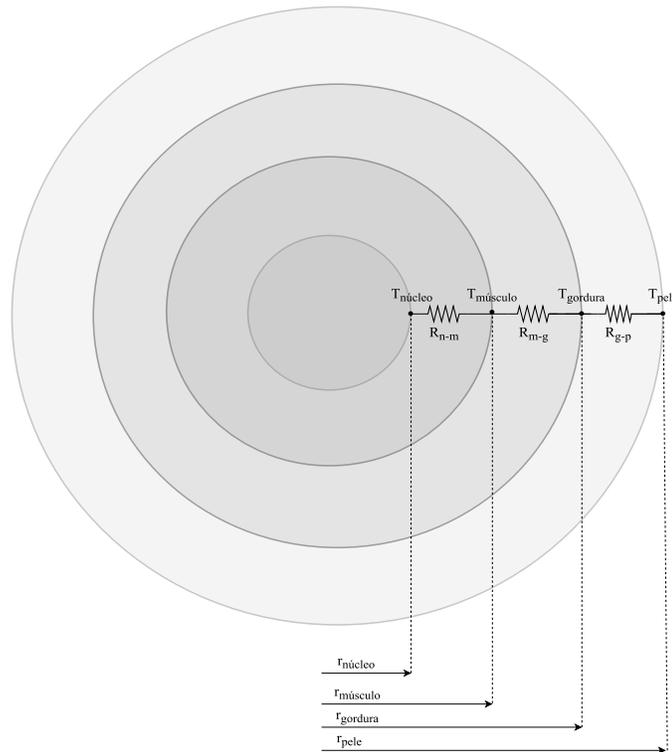


Figura 4.15: Resistências térmicas de condução propostas para o modelo simplificado do corpo humano utilizando a abordagem de Mady (2014).

A resistência térmica de condução das transferências de calor entre núcleo e músculo, músculo e gordura e gordura e pele propostas neste estudo para a abordagem de Mady (2014) são definidas pelas Equações 4.53 a 4.55, respectivamente.

$$R_{cond,n-m} = \frac{\ln(r_{músculo}/r_{núcleo})}{2\pi lk_{núcleo \rightarrow músculo}} \quad (4.53)$$

$$R_{cond,m-g} = \frac{\ln(r_{gordura}/r_{músculo})}{2\pi lk_{músculo \rightarrow gordura}} \quad (4.54)$$

$$R_{cond,g-p} = \frac{\ln(r_{pele}/r_{gordura})}{2\pi lk_{gordura \rightarrow pele}} \quad (4.55)$$

Já para a abordagem de Prek e Butala (2010), as resistências térmicas de condução propostas neste estudo, para as mesmas transferências de calor, são calculadas desconsiderando a geometria cilíndrica, como foi mostrado no Anexo A. A Figura 4.16 mostra a esquematização dessas resistências.

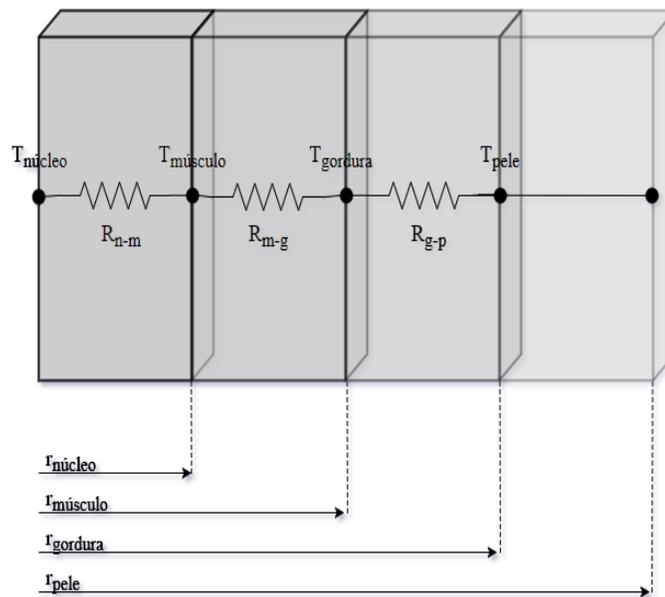


Figura 4.16: Resistências térmicas de condução propostas para o modelo simplificado do corpo humano utilizando a abordagem de Prek e Butala (2010).

Equações 4.56 a 4.58 mostram como é calculada cada resistência proposta neste estudo para a abordagem de Prek e Butala (2010).

$$R_{cond,n-m} = \frac{1}{k''_{núcleo} 2\pi r_{núcleo} l} \quad (4.56)$$

$$R_{cond,m-g} = \frac{1}{k''_{músculo} 2\pi r_{músculo} l} \quad (4.57)$$

$$R_{cond,g-p} = \frac{1}{k''_{gordura} 2\pi r_{gordura} l} \quad (4.58)$$

Além desses dois métodos, aqui neste estudo é proposto uma nova maneira de cálculo dessa energia transferida por condução entre as camadas internas do corpo humano. A proposta também é utilizar a equação de Fourier para calcular essa transferência de energia, entretanto os intervalos nos quais a mesma é integrada é um pouco diferente. A dedução desta nova abordagem é mostrada no Anexo B. A Figura 4.17 mostra os intervalos e esquematização das resistências térmicas para esta nova abordagem.

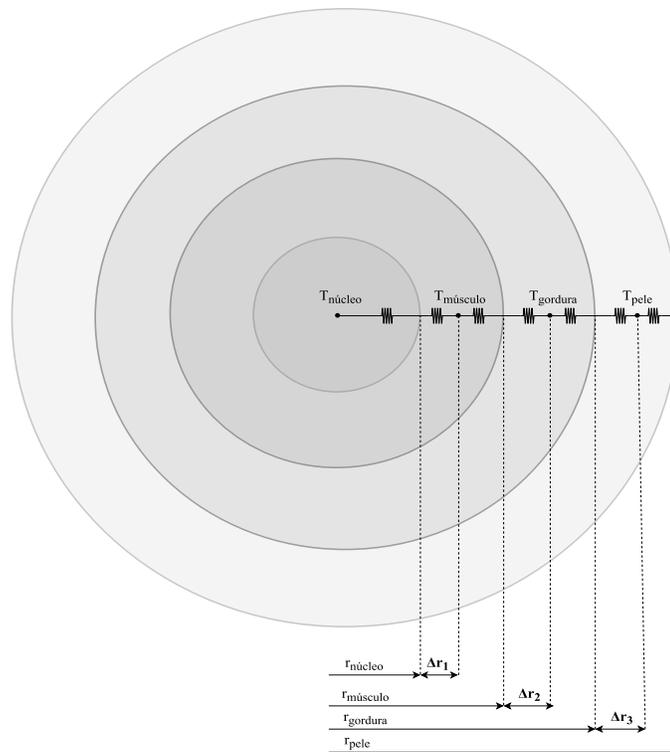


Figura 4.17: Resistências térmicas de condução propostas para o modelo simplificado do corpo humano utilizando a abordagem desenvolvida.

As Equações 4.59 4.60 e 4.61 mostram como é calculado o “calor” conduzido entre as camadas para esta nova abordagem desenvolvida.

$$\dot{Q}_{\text{núcleo} \rightarrow \text{músculo}} = \frac{2\pi l(T_{\text{núcleo}} - T_{\text{músculo}})}{\frac{1}{k_{\text{núcleo}}} \ln\left(\frac{r_{\text{núcleo}}}{r \rightarrow 0}\right) + \frac{1}{k_{\text{músculo}}} \ln\left(\frac{r_{\text{núcleo}} + \Delta r_1}{r_{\text{núcleo}}}\right)} \quad (4.59)$$

$$\dot{Q}_{\text{músculo} \rightarrow \text{gordura}} = \frac{2\pi l(T_{\text{músculo}} - T_{\text{gordura}})}{\frac{1}{k_{\text{músculo}}} \ln\left(\frac{r_{\text{músculo}}}{r_{\text{núcleo}} + \Delta r_1}\right) + \frac{1}{k_{\text{gordura}}} \ln\left(\frac{r_{\text{músculo}} + \Delta r_2}{r_{\text{músculo}}}\right)} \quad (4.60)$$

$$\dot{Q}_{\text{gordura} \rightarrow \text{pele}} = \frac{2\pi l(T_{\text{gordura}} - T_{\text{pele}})}{\frac{1}{k_{\text{gordura}}} \ln\left(\frac{r_{\text{gordura}}}{r_{\text{músculo}} + \Delta r_2}\right) + \frac{1}{k_{\text{pele}}} \ln\left(\frac{r_{\text{gordura}} + \Delta r_3}{r_{\text{gordura}}}\right)} \quad (4.61)$$

Na qual,  $k_{\text{núcleo}}$  é a condutividade térmica do núcleo;  $k_{\text{músculo}}$  a condutividade térmica do músculo;  $k_{\text{gordura}}$  a condutividade térmica da gordura;  $k_{\text{pele}}$  a condutividade térmica da pele;  $l$  é a altura do cilindro;  $T_{\text{núcleo}}$  a temperatura do compartimento do núcleo;  $T_{\text{músculo}}$  a temperatura do compartimento do músculo;  $T_{\text{gordura}}$  a temperatura do compartimento de gordura;  $T_{\text{pele}}$  a temperatura do compartimento da pele;  $r_{\text{núcleo}}$  o raio do compartimento do núcleo;  $r_{\text{músculo}}$  o raio do compartimento do músculo e  $r_{\text{gordura}}$  o raio do compartimento de gordura. Os valores de  $\Delta r_1$ ,  $\Delta r_2$  e  $\Delta r_3$  são calculados conforme as Equações 4.62, 4.63 e 4.64.

$$\Delta r_1 = \frac{r_{\text{músculo}} - r_{\text{núcleo}}}{2} \quad (4.62)$$

$$\Delta r_2 = \frac{r_{\text{gordura}} - r_{\text{músculo}}}{2} \quad (4.63)$$

$$\Delta r_3 = \frac{r_{\text{pele}} - r_{\text{gordura}}}{2} \quad (4.64)$$

A resistência térmica de condução para esta abordagem desenvolvida é mostrada nas Equações 4.65 4.66 e 4.67.

$$R_{cond,n-m} = \frac{\frac{1}{k_{núcleo}} \ln\left(\frac{r_{núcleo}}{r \rightarrow 0}\right) + \frac{1}{k_{músculo}} \ln\left(\frac{r_{núcleo} + \Delta r_1}{r_{núcleo}}\right)}{2\pi l} \quad (4.65)$$

$$R_{cond,m-g} = \frac{\frac{1}{k_{músculo}} \ln\left(\frac{r_{músculo}}{r_{núcleo} + \Delta r_1}\right) + \frac{1}{k_{gordura}} \ln\left(\frac{r_{músculo} + \Delta r_2}{r_{músculo}}\right)}{2\pi l} \quad (4.66)$$

$$R_{cond,g-p} = \frac{\frac{1}{k_{gordura}} \ln\left(\frac{r_{gordura}}{r_{músculo} + \Delta r_2}\right) + \frac{1}{k_{pele}} \ln\left(\frac{r_{gordura} + \Delta r_3}{r_{gordura}}\right)}{2\pi l} \quad (4.67)$$

A Tabela 4.3 mostra uma comparação para os valores de resistência térmica de condução e a Tabela 4.4 uma comparação de transferência de calor por condução para ambas abordagens apresentadas e também para a abordagem desenvolvida sob as condições ambientais de  $T = 30^\circ C$  e  $\phi = 50\%$ .

Tabela 4.3: Resistência térmica de condução para os modelos para  $T = 30^\circ C$  e  $\phi = 50\%$

Compartimentos	Resistência térmica (K/W)		
	Mady (2014)	Prek e Butala (2010)	Desenvolvido
Núcleo - Músculo	0,0763	0,1795	40,8693
Músculo - Gordura	0,0201	0,0617	0,0549
Gordura - Pele	0,0092	0,0392	0,0229

Tabela 4.4: Transferência de calor por condução para os modelos para  $T = 30^\circ C$  e  $\phi = 50\%$

Compartimentos	Calor transferido (W)		
	Mady (2014)	Prek e Butala (2010)	Desenvolvido
Núcleo - Músculo	7,2559	1,6658	0,0101
Músculo - Gordura	52,9051	30,6265	35,6589
Gordura - Pele	61,3658	40,8509	46,4515

É notada uma grande discrepância entre os valores da resistência térmica de condução entre as camadas utilizando o método utilizado por Mady (2014) e utilizando as equações adaptadas proposta nesse estudo para o método de Prek e Butala (2010). Já comparando-se este último com a abordagem desenvolvida neste estudo, nota-se valores mais coerentes entre eles, exceto no termo

referente à resistência térmica do núcleo para o músculo. Essa grande diferença neste valor ocorre porque a abordagem desenvolvida considera o intervalo de integração iniciando-se num raio que tende a zero. Além disso, na abordagem de Mady (2014) e na abordagem desenvolvida neste estudo, a geometria cilíndrica foi considerada no cálculo da resistência térmica do sistema antes do processo de integração da Equação de Fourier. Por fim, o método de Mady (2014) também considera uma condutividade média ponderada pelos volumes entre as camadas, enquanto que o método de Prek e Butala (2010) adaptado e o método desenvolvido não.

Analogamente, os valores obtidos para o calor transferidos entre as camadas do interior do corpo humano foram significativamente diferentes entre a abordagem de Mady *et al.* (2014) e de Prek e Butala (2010) adaptado. Por exemplo, para o calor transferido entre músculo e gordura, é observado uma diferença de aproximadamente 73 % entre a abordagem de Mady *et al.* (2014) em relação a abordagem de Prek e Butala (2010) adaptado, enquanto que entre a abordagem desenvolvida e este último essa diferença é de cerca de 16 %.

#### 4.4 Métodos

Tendo em vista que o foco desse trabalho é a comparação entre as diferentes abordagens, principalmente no que se refere ao balanço exegético, foi escolhido adotar todos os valores provenientes do balanço energético, mostrados na seção 3.4, obtidos por meio da metodologia utilizada por Mady *et al.* (2014).

Em relação aos parâmetros do ambiente, inicialmente foram considerados cenários específicos nos quais as temperaturas e umidades relativas são mostradas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Parâmetros do meio ambiente simulados

Temperaturas (°C)	Umidade relativa (%)		
20	10	50	90
25	10	50	90
30	10	50	90
35	10	50	90

Os indicadores de conforto térmico obtidos pelos métodos de de análise exergética de Mady *et al.* (2014), Prek e Butala (2010) e Shukuya *et al.* (2010) descritos na sessão 4.1 são mostrados na sessão de resultados e discussões.

Foi verificado uma inconsistência de unidades no termo da análise exergética do método de Prek e Butala (2010) referente à circulação sanguínea (Equação 4.17). Portanto, foi proposta uma nova equação para contabilizar a exergia desse fenômeno, como mostrado na Equação 4.68.

$$\Delta \dot{B}_{i,sangue} = \dot{m}_{sangue} c_{p,sangue} \left[ (T_{arterial} - T_i) - T_0 \ln \left( \frac{T_{arterial}}{T_i} \right) \right] \quad (4.68)$$

Posteriormente foi questionado se realmente a soma das irreversibilidades internas, que para o método de Prek e Butala (2010) é composta pela soma das irreversibilidades associadas ao “calor” transferido por condução nos tecidos (Equação 4.16) e pelo fluxo sanguíneo (Equação 4.68), poderia ser igualada à exergia associada ao “calor” produzido pelo metabolismo (Equação 4.18), abordagem utilizada em Prek (2006) e Prek (2005). Então, o modelo simplificado de Mady (2014) foi utilizado exclusivamente para comprovar se essa adaptação é válida. Para esta parte da análise, foram simulados inicialmente os mesmos cenários mostrados na Tabela 4.5. Posteriormente, essa análise foi estendida também para temperaturas menores ( $10 \leq T_{ar} \leq 20$  °C).

Após constatar-se que a modelagem dos termos de exergia relacionados às irreversibilidades poderia ser melhorada, o seguinte procedimento foi realizado:

1. De posse dos valores calculados para a exergia associadas ao calor transferido por condução nos tecidos (Equação 4.16) e pelo fluxo sanguíneo (Equação 4.68), foi proposto um novo termo:

$$\dot{B}_{interna} = \dot{B}_{cond,tecidos} + \dot{B}_{sangue} \quad (4.69)$$

2. Foi realizado um ajuste de curva utilizando o Método dos Mínimos Quadrados para propor uma correlação na qual este novo termo seria escrito como uma função que dependesse de parâmetros que fossem comuns aos modelos simplificado de Mady (2014) e mais robusto de Ferreira e Yanagihara (2009);

3. Foi considerado uma função linear de quatro variáveis de forma:

$$\begin{aligned} \dot{B}_{interna} = & a_0 + a_1\phi + a_2T_{ar} + a_3T_{núcleo} + a_4T_{pele} + a_5\phi T_{ar} + a_6\phi T_{núcleo} + a_7\phi T_{pele} \\ & + a_8T_{ar}T_{núcleo} + a_9T_{ar}T_{pele} + a_{10}T_{núcleo}T_{pele} + a_{11}\phi T_{ar}T_{núcleo} \\ & + a_{12}\phi T_{ar}T_{pele} + a_{13}\phi T_{núcleo}T_{pele} + a_{14}T_{ar}T_{núcleo}T_{pele} + a_{15}\phi T_{ar}T_{núcleo}T_{pele} \end{aligned} \quad (4.70)$$

4. Verificou-se, escolhendo-se o intervalo de temperatura de 20°C até 35°C, que esse ajuste poderia ser dividido em dois intervalos, i. e, duas funções diferentes descrevem o comportamento dessa curva. A primeira é aplicável à temperaturas inferiores a 25 °C e a segunda para temperaturas superiores.

5. A correlação obtida foi empregada no modelo do corpo humano de Ferreira e Yanagihara (2009), obtendo-se assim novos valores para a taxa de exergia destruída.

Além dessa alteração na modelagem nos termos de exergia associados às irreversibilidades internas, foi proposto também modificações nos termos da análise exérgica relativos ao fenômenos de convecção e radiação. Sendo o primeiro proposto porque, observando-se a equação apresentada em Prek e Butala (2010), percebeu-se que a modelagem do fenômeno pode estar equivocada, visto que a grandeza obtida não está de acordo com a definição de taxa de exergia (energia/tempo) devido à multiplicação do calor por um fator multiplicador, mostrado na Equação 4.71. Já o termo relacionado ao processo de radiação foi modificado porque a equação utilizada, obtida por Petela (1964), é válida para situações sob as quais o indivíduo estaria submetido diretamente a radiação solar uniforme, portanto esse termo não é adequado para aplicações de conforto térmico em ambientes internos, que é o foco desse estudo. Na equação desenvolvida por Petela (1964) observa-se o uso de um fator multiplicativo diferente do fator de Carnot utilizado no método de Mady *et al.* (2014), mostrado na Equação 4.72.

$$Fator_{conv} = T_{roupa} - T_{ar} - T_{ar} \ln \left( \frac{T_{roupa}}{T_{ar}} \right) \quad (4.71)$$

$$Fator_{rad} = 1 - \frac{4}{3} \frac{T_{ar}}{T_{roupa}} + \frac{1}{3} \left( \frac{T_{ar}}{T_{roupa}} \right)^4 \quad (4.72)$$

Uma comparação entre esses fatores multiplicadores, tanto no termo da convecção quanto da

radiação, é mostrada na seção de resultados.

Logo, as taxas de exergias associadas aos fenômenos de radiação e convecção foram recalculadas, segundo as Equações 4.73 e 4.74, respectivamente.

$$\dot{B}_r = \dot{Q}_r \left( 1 - \frac{T_{mr}}{T_{pele}} \right) \quad (4.73)$$

Em que  $\dot{Q}_r$  é a taxa de transferência de calor por radiação,  $T_{mr}$  é a temperatura média radiante e  $T_{pele}$  é a temperatura da pele.

$$\dot{B}_c = \dot{Q}_c \left( 1 - \frac{T_{ar}}{T_{pele}} \right) \quad (4.74)$$

Na qual  $\dot{Q}_c$  é a taxa de transferência de calor por convecção,  $T_{ar}$  é a temperatura do ambiente e  $T_{pele}$  é a temperatura da pele.

Ainda no método de análise exergética de Prek e Butala (2010), neste estudo foi proposto um novo termo denominado de Taxa de exergia transferida ao ambiente ( $B_{env}$ ) para que fosse possível compará-lo com os outros métodos. Nesse termo proposto, foram contabilizadas as transferências de exergia associadas à: radiação térmica, convecção térmica, difusão natural de água e transpiração, transferência de massa na superfície da pele e ao processo de respiração.

Já para a análise exergética realizada com o método de Shukuya *et al.* (2010), percebeu-se que o termo relacionado à água gerada no núcleo pelo metabolismo é responsável pelos altos valores encontrados para a taxa de exergia destruída. Então foi proposto que a produção de água devido ao metabolismo já está sendo considerada ao utilizar-se o valor de exergia associado à energia gerada pelo metabolismo transferida sob forma “calor”, visto que o termo do metabolismo em base energética já foi calculado baseado nas reações químicas metabólicas, que consideram a água nos produtos. Portanto, o termo de exergia relacionado a água líquida produzida no núcleo e no envoltório foram desconsiderados e uma nova taxa de exergia destruída foi calculada.

Em etapas seguintes, os indicadores obtidos utilizando os três métodos analisados ( $B_d$  e  $B_{env}$ ) foram correlacionados com outros indicadores de conforto térmico amplamente utilizados no estudo de conforto térmico, como por exemplo, o PMV (*Predicted Mean Vote*) e PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*). Esses indicadores de conforto térmico, que são mostrados

na (American Society of Heating e Engineers, 2005) e descritos nesse estudo na seção 3.3.2.1, foram calculados para o intervalo de temperatura onde sua aplicação é válida ( $25 \leq T_{ar} \leq 35^{\circ}\text{C}$ ). A Figura 4.18 mostra esses indicadores em função da temperatura e umidade relativa para alguns cenários.

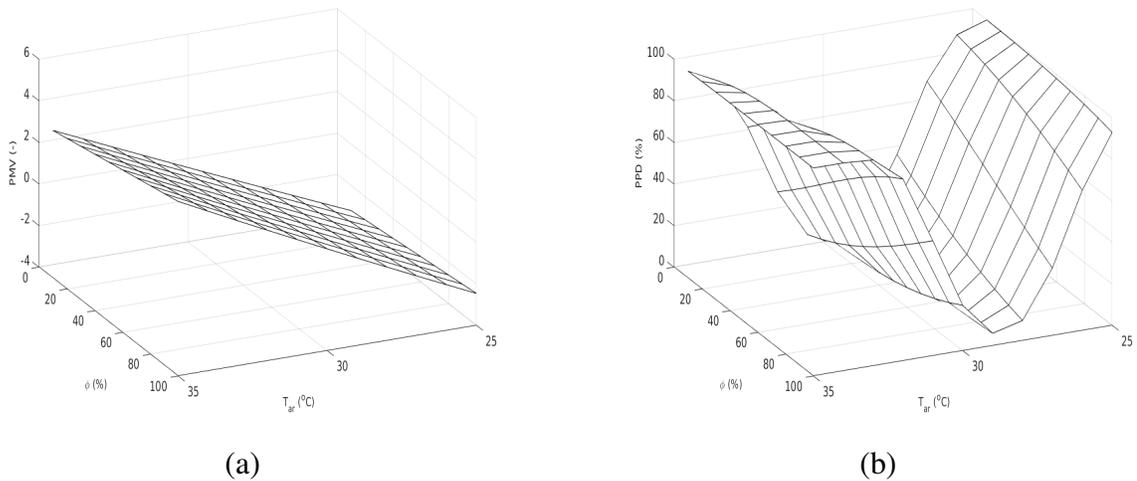


Figura 4.18: Resultados de indicadores de conforto térmico: (a) PMV. (b) PPD.

A relação entre esses indicadores e os indicadores obtidos por esse estudo neste mesmo intervalo de temperatura é mostrada no Capítulo 5.

Além disso, o modelo de Ferreira e Yanagihara (2009) leva em consideração um coeficiente de transferência de calor por convecção constante para cada parte do corpo, baseado nos dados do estudo experimental de de Dear *et al.* (1997) para um indivíduo em pé. Nas simulações realizadas na parte final desse estudo, correlações mostradas na American Society of Heating e Engineers (2005) que são utilizadas no cálculo do coeficiente convectivo de troca de calor foram implementadas ao modelo computacional representativo do sistema térmico do corpo humano de Ferreira e Yanagihara (2009). A Tabela 4.6 mostra as correlações que foram implementadas ao modelo.

Tabela 4.6: Variação do coeficiente convectivo com a velocidade do ar usada como base para variar o coeficiente dos diferentes membros do modelo proposto por Ferreira e Yanagihara (2009)

Equação	Limites	Condição	Fonte
$h_c = 8,3v_{ar}^{0,6}$ $h_c = 3,1$	$0,2 < v_{ar} < 4,0$ $0 < v_{ar} < 0,2$	Sentado com ar em movimento	Mitchell (1974)
$h_c = 2,7 + 8,7v_{ar}^{0,67}$ $h_c = 5,1$	$0,15 < v_{ar} < 1,5$ $0 < v_{ar} < 0,15$	Reclinado com ar em movimento	Colin e Houdas (1967)
$h_c = 8,6v_{ar}^{0,53}$	$0,5 < v_{ar} < 2,0$	Andando à uma velocidade $v$ num ambiente calmo	Nishi e Gagge (1970)
$h_c = 14,8v_{ar}^{0,69}$ $h_c = 4$	$0,15 < v_{ar} < 1,5$ $0 < v_{ar} < 0,15$	Pessoa em pé com ar em movimento	Desenvolvido a partir dos dados presentes em Seppanent et al. (1972)

A influência da variação do coeficiente convectivo de transferência de calor nos termos dos três métodos de análise exérgica utilizados nesse estudo, principalmente na exergia associada à convecção, exergia transferida ao ambiente e exergia destruída é mostrada no Capítulo 5.

Por fim, a variação da velocidade do ar no cálculo dos diferentes coeficientes convectivos também é analisada no Capítulo 5.

## 5 Resultados e discussões

Utilizando-se o modelo computacional representativo do sistema térmico do corpo humano de Ferreira e Yanagihara (2009), o balanço de energia foi resolvido e a distribuição de temperatura no corpo humano foi obtida ao longo do tempo até que o critério de regime permanente fosse atingido. Exemplos da distribuição de temperatura obtidos com o modelo de Ferreira e Yanagihara (2009) para a temperatura de 10, 30 e 35 °C e 50 % de umidade relativa são mostrados no Apêndice A.

Com a distribuição de temperatura, os termos do balanço exergético segundo o método de Mady *et al.* (2014) foram calculados e os outros dois métodos de análise exergética, Prek e Butala (2010) e Shukuya *et al.* (2010), foram então implementados ao modelo computacional do sistema térmico do corpo humano de Ferreira e Yanagihara (2009), fechando assim o cálculo da análise exergética dos três métodos e obtendo-se indicadores de conforto térmico, como por exemplo a taxa de exergia destruída e a taxa de exergia transferida ao ambiente. Cada termo dos três métodos de análise exergética são mostrados separadamente no Apêndice B.

Para os cenários mostrados na Tabela 4.5, as curvas de taxa de exergia destruída e de taxa de exergia transferida ao ambiente foram obtidas para cada um dos métodos de análise exergética utilizando o modelo do sistema térmico do corpo humano de Ferreira e Yanagihara (2009). A Figura 5.1 mostra esses resultados obtidos utilizando o método de Mady *et al.* (2014).

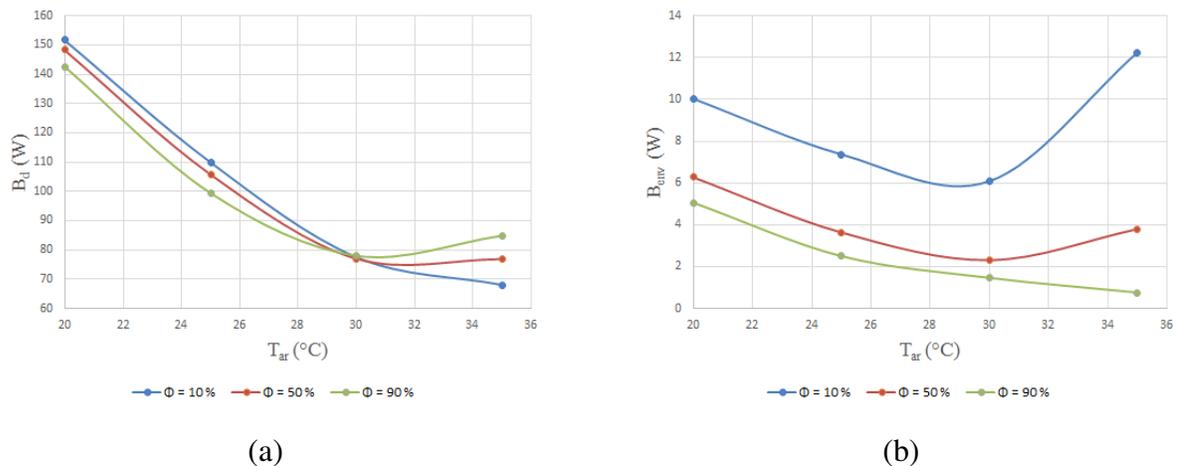


Figura 5.1: Resultados para cenários propostos na Tabela 4.4 utilizando o método de Mady *et al.* (2014): (a) Taxa de exergia destruída. (b) Taxa de exergia transferida ao ambiente.

Na Figura 5.1 (a) é observado que para temperaturas do ambiente até 30 °C, a taxa de exergia destruída para ambientes secos é maior do que em ambientes úmidos. Entretanto a umidade relativa do ar não é um parâmetro muito influente, quando comparado à influência da temperatura, pois no intervalo entre 20 a 30 °C a diferença máxima observada entre as curvas de umidade relativa é de aproximadamente 10 W na temperatura de 25 °C. Esse fato observado está em concordância com o que é exposto na ISO7730 (2005) de que a umidade relativa não é um parâmetro de grande impacto na sensação térmica, visto que um aumento de 10 % de umidade relativa e um aumento de 0,3 °C equivalem a uma mesma mudança na sensação térmica percebida pelo ser humano. Independentemente da umidade relativa, a taxa de exergia destruída diminui com o aumento da temperatura. Isso acontece pois, embora o termo de exergia associado a sudorese aumente para ambientes de temperatura mais elevada, percebe-se uma diminuição da exergia relacionada ao metabolismo e da exergia transferida ao ambiente, sendo esta última mostrada na Figura 5.1 (b). Em relação ao metabolismo, é esperado que ele diminua a medida que a temperatura se aproxima da temperatura de neutralidade térmica, visto que em baixas temperaturas há uma taxa de metabolismo adicional gerada devido a atuação do sistema de controle (produção de calafrios). Com relação à exergia transferida ao ambiente, à medida que a temperatura aumenta, a diferença de temperatura entre temperatura da pele e temperatura do ambiente diminui, sendo esse fator responsável pela redução dos termos referentes à convecção e radiação, por exemplo.

Já para temperaturas acima de 30 °C, nota-se que a tendência mencionada inicialmente se inverte, ou seja, em ambientes úmidos a taxa de exergia destruída se torna maior do que em ambientes secos. Isso acontece porque, para temperaturas elevadas, o corpo humano é totalmente dependente do mecanismo sudomotor para transferir energia para o ambiente, visto que as transferências por radiação e convecção são quase inexistentes, como é mostrado em Hardy e DuBois (1938a), Hardy *et al.* (1938b), Hardy *et al.* (1941), Hardy e DuBois (1940). Como em ambientes úmidos diferença de pressão parcial entre o vapor de água na superfície da pele e o vapor de água contido no ar ambiente é baixa, a exergia relacionada a sudorese cai acentuadamente, reduzindo assim a exergia transferida ao ambiente e contribuindo para o aumento da exergia destruída. Neste estado, pode-se dizer que o corpo está em hipertermia (devido a dificuldade de transferir energia para o ambiente, a energia está sendo acumulada no interior do corpo provocando o aumento da temperatura interna corporal). A condição de hipertermia também está causando o chamado efeito " $Q_{10}$ ", que quantifica a dependência entre a taxa das reações químicas metabólicas e a variação na temperatura dos tecidos corporais (Mountcastle, 1980). A taxa de metabolismo aumenta de 79,35 W para 85,49 W, para o caso do ambiente úmido, com temperatura igual a 30 e 35°C, respectivamente. Esse aumento no metabolismo consequentemente também contribui para o aumento da taxa de exergia destruída. Observa-se que a taxa de exergia destruída diminui com o aumento da temperatura somente para o

caso de ambiente seco pois o mecanismo da sudorese se mostra um eficiente meio de transferência de exergia, praticamente duplicando a taxa de exergia transferida ao ambiente entre 30 e 35 °C, como mostrado na Figura 5.1 (b).

A Figura 5.2 mostra esses resultados obtidos através do método de Prek e Butala (2010) com a adaptação dos termos de exergia das irreversibilidades internas mostradas na Equação 4.18.

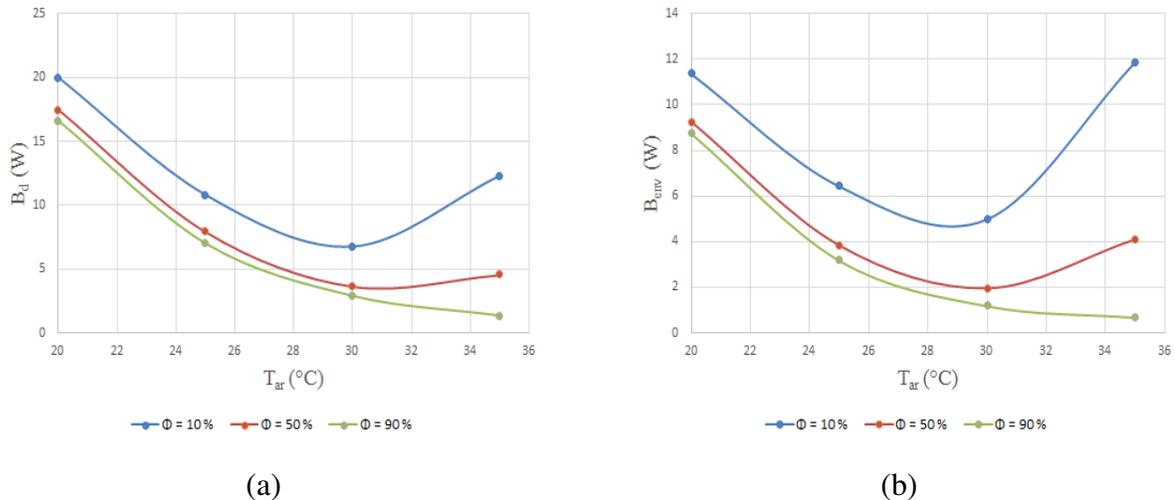


Figura 5.2: Resultados para cenários propostos na Tabela 4.4 utilizando o método de Prek e Butala (2010) com adaptações para exergia associada às irreversibilidades internas: (a) Taxa de exergia destruída. (b) Taxa de exergia transferida ao ambiente.

Na Figura 5.2 (a) foi observada a mesma tendência que os resultados obtidos pelo método de análise exérgica de Mady *et al.* (2014) para temperaturas de até 30 °C, embora o método de cálculo não leve em consideração a distinção entre exergias de alimentação e de saída. Entretanto, a taxa de exergia destruída é, de forma geral, uma ordem de grandeza inferior à obtida utilizando-se o método de Mady *et al.* (2014), mostrada na Figura 5.1 (a). Essa diferença entre os métodos ocorre devido ao termo de exergia associado às reações metabólicas, que é considerado pelo estudo de Mady *et al.* (2014) como uma exergia associada às reações químicas, enquanto que no estudo de Prek e Butala (2010) é considerada como uma exergia associada a uma diferença finita de temperatura, ou seja, o metabolismo é considerado como um fluxo de “calor”. Ainda na Figura 5.2 (a), nota-se que o aumento da temperatura causa a diminuição da taxa de exergia destruída, também devido a redução da exergia relacionada ao metabolismo, radiação e convecção. Entretanto, no método de Prek e Butala (2010) percebeu-se que, além do aumento dos termos relacionados à sudorese, ocorre o aumento da exergia relacionada ao processo da respiração associado ao aumento da temperatura. Na Figura 5.2 (b) é mostrado a taxa de exergia transferida ao ambiente proposta por

este estudo, visto que no método de análise exérgica original de Prek e Butala (2010) não existe a nomenclatura de exérgia transferida ao ambiente. Foram contabilizadas nesse termo proposto as transferências de exérgia associadas à: radiação térmica, convecção térmica, difusão natural de água e transpiração, transferência de massa na superfície da pele e ao processo de respiração.

Para temperaturas maiores do que 30°C, percebe-se que os métodos de cálculo da taxa de exérgia destruída apresentados até agora diferem completamente entre si. Nesse método, a taxa de exérgia destruída continua sendo maior para ambientes mais secos do que para ambientes úmidos. Como neste método não há uma subtração entre exérgia de alimentação e exérgias de saída, no ambiente úmido é observado que o rápido decréscimo da exérgia relacionada ao processo de sudorese (na temperatura de 35°C foi reduzida de 11,32 W para 0,60 W, no ambiente seco e úmido, respectivamente) ocasiona a redução da exérgia transferida ao ambiente, mostrada na Figura 5.2 (b), de forma a reduzir a taxa de exérgia destruída, e não aumentá-la como ocorria com o método de Mady *et al.* (2014). Para a faixa de temperatura compreendida entre 30 e 35°C, assim como nos resultados obtidos com o método de Mady *et al.* (2014), é observado um aumento da exérgia relacionada ao metabolismo (devido ao fenômeno de hipertermia) em ambientes úmidos, causados pela dificuldade que o sistema térmico tem em transferir energia interna do corpo para o ambiente. Porém, para o método de Prek e Butala (2010) o aumento do metabolismo afeta bem menos o cálculo da taxa de exérgia destruída, do que a redução da exérgia relacionada à sudorese.

Observa-se que a taxa de exérgia destruída aumenta com o aumento da temperatura para o caso de ambiente seco, ao contrario do que aconteceu com o método de Mady *et al.* (2014), pois no cálculo da exérgia destruída de Mady *et al.* (2014) a exérgia associada a sudorese possui um valor negativo, afinal é um termo de saída, logo, quanto maior for a sua magnitude, menor será a exérgia destruída e é esperado que o aumento da temperatura do ar intensifica o processo de sudorese. Já no método de Prek e Butala (2010), o termo de exérgia associada ao processo de sudorese, que é o termo mais relevante no cálculo da exérgia destruída para este intervalo, correspondendo a 92 % da exérgia destruída, permanece com sinal positivo, então o aumento de temperatura causa o aumento da sudorese, que por sua vez aumenta a taxa exérgia transferida ao ambiente, mostrada na Figura 5.2 (b) e conseqüentemente provoca o aumento da exérgia destruída (Figura 5.2 (a)).

Na etapa na qual foi utilizado o modelo do corpo humano simplificado de Mady (2014) considerando-se as exérgias associadas à condução de calor entre os tecidos e devido à circulação sanguínea, contabilizadas no método Prek e Butala (2010)) foi proposto um ajuste de curva linear para a obtenção de uma função para o cálculo da exérgia associada às irreversibilidades internas previamente mencionadas. Os coeficientes dessa função são mostrados para o intervalo de tempe-

ratura compreendido entre 10 e 25 °C e para o intervalo de temperatura de 25 a 35 °C na Tabela 5.1 e Tabela 5.2, respectivamente.

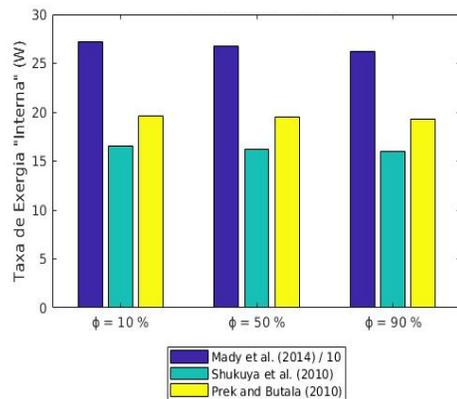
Tabela 5.1: Coeficientes obtidos para o intervalo de temperatura entre 10 e 25°C

$a_0$	-4168.5469	$a_8$	-1.6706
$a_1$	1542.8199	$a_9$	-2.8191
$a_2$	59.5520	$a_{10}$	-4.1868
$a_3$	114.2405	$a_{11}$	0.4537
$a_4$	153.6117	$a_{12}$	1.0800
$a_5$	-16.7942	$a_{13}$	1.7151
$a_6$	-41.5393	$a_{14}$	0.0776
$a_7$	-63.7240	$a_{15}$	-0.0291

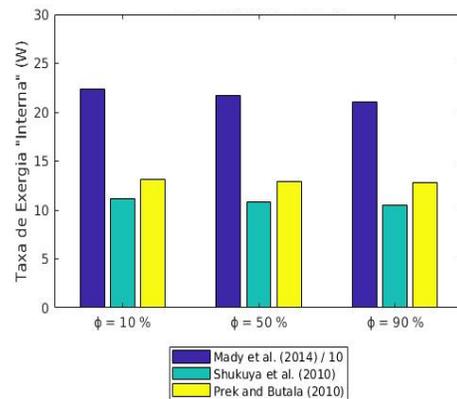
Tabela 5.2: Coeficientes obtidos para o intervalo de temperatura entre 25 e 35 °C

$a_0$	-2543.3047	$a_8$	-2.0739
$a_1$	-7930.3332	$a_9$	-2.1070
$a_2$	74.8994	$a_{10}$	-1.9612
$a_3$	70.3986	$a_{11}$	-6.0616
$a_4$	70.9339	$a_{12}$	-6.5406
$a_5$	226.5910	$a_{13}$	-6.1412
$a_6$	212.2434	$a_{14}$	0.0582
$a_7$	229.4364	$a_{15}$	0.17499

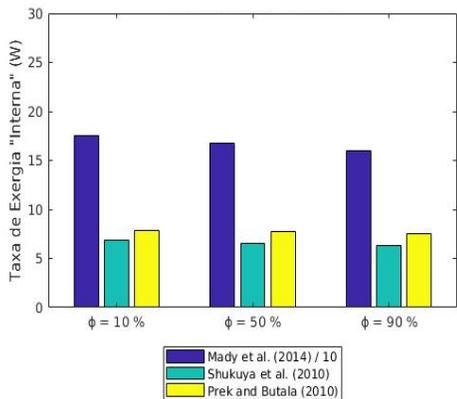
Os resultados obtidos utilizando o modelo do corpo humano simplificado de Mady (2014) considerando-se as exergias associadas à condução de calor entre os tecidos e devido à circulação sanguínea, contabilizadas no método Prek e Butala (2010)); a exergia associada à transferência de energia gerado pelo metabolismo sob forma de “calor”, utilizada no método Shukuya *et al.* (2010) (também inicialmente utilizada no modelo aproximado de Prek e Butala (2010)) e a exergia do metabolismo com base em reações químicas (utilizada no método de Mady *et al.* (2014)) são comparadas para os determinados cenários na Figura 5.3.



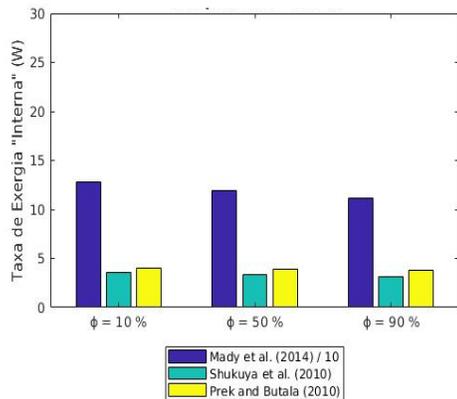
(a)



(b)



(c)



(d)

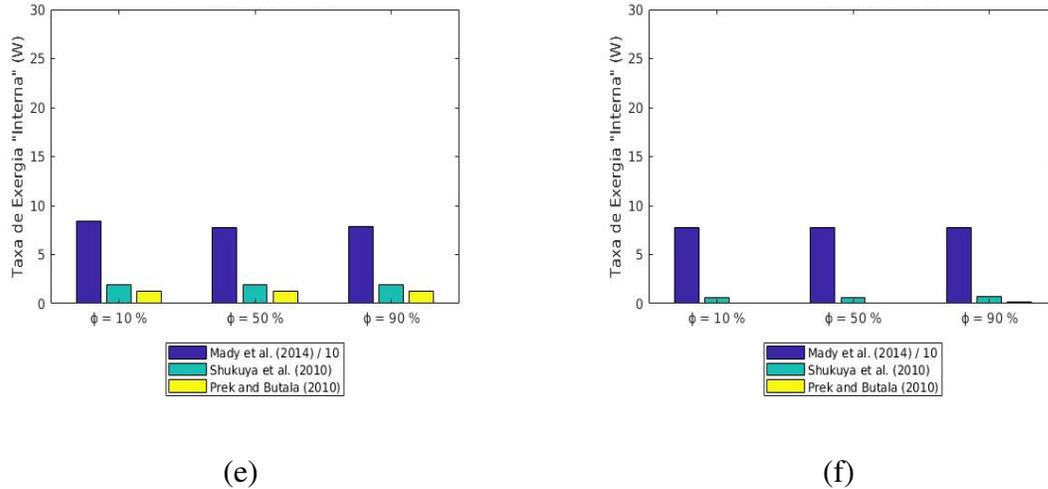


Figura 5.3: Comparação das taxa de exergia interna obtida para os três métodos. (a)  $T = 10^{\circ}\text{C}$ . (b)  $T = 15^{\circ}\text{C}$ . (c)  $T = 20^{\circ}\text{C}$ . (d)  $T = 25^{\circ}\text{C}$ . (e)  $T = 30^{\circ}\text{C}$ . (f)  $T = 35^{\circ}\text{C}$ .

Percebeu-se então que a aproximação feita para contabilizar as exergias associadas às irreversibilidades internas, proposta inicialmente para o método de análise exergética de Prek e Butala (2010), não foi satisfatória em alguns casos para o intervalo de temperatura analisado, principalmente para os valores de temperaturas elevados ( $T = 35^{\circ}\text{C}$ ), no qual o valor calculado pela a aproximação (barra verde) chega a apresentar um erro relativo de até 900 %, do que o calculado considerando os termos de exergia relacionado à condução nos tecidos e à corrente sanguínea (barra amarela). A exergia associada ao metabolismo calculada pelo método de Mady *et al.* (2014)(barra azul) considerando as exergias associadas as reações de oxidação dos nutrientes (também destacadas por outros estudos, como por exemplo Batato *et al.* (1990) e Mady e De Oliveira Junior (2013)), foi de pelo ao menos uma ordem de grandeza superior ao calculado pelos outros dois métodos, ressalta-se que o valor exibido nos gráficos de barra devem ser multiplicados por 10.

Com as modificações propostas após a análise dos termos de exergias associadas às irreversibilidades internas, a análise exergética foi recalculada e os novos resultados para a taxa de exergia destruída são comparados aos valores obtidos anteriormente com a aproximação mostrada na Equação 4.18 na Figura 5.4.

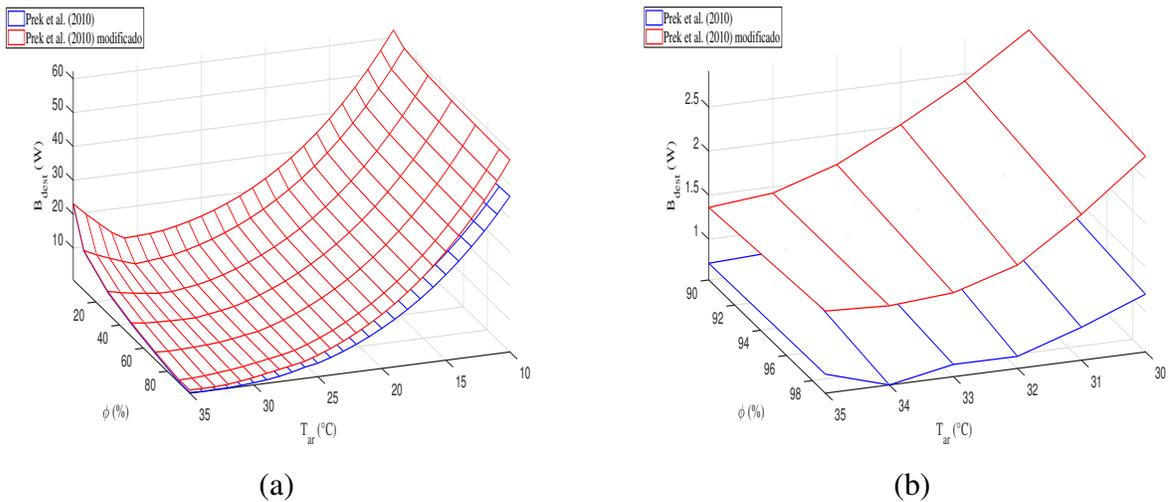


Figura 5.4: Comparação da exergia associada às irreversibilidades internas do método de Prek e Butala (2010). (a) Intervalo completo. (b) Altas temperaturas e umidades relativas.

Observando a Figura 5.4 (a) primeiramente pode-se chegar a conclusão que a aproximação de tratar as irreversibilidades internas como exergia associada a transferência de energia produzida pelo metabolismo sob forma de “calor” seria satisfatória para situações de temperaturas elevadas e a medida que a temperatura vai diminuindo a diferença entre os valores obtidos vão aumentando, nesse caso então a aproximação não seria satisfatória. Entretanto, observando-se isoladamente os resultados obtidos para cada temperatura comprovou-se que na realidade sempre há uma diferença considerável entre os termos aproximados e calculados, mas na representação visual da Figura 5.4 (a) essa diferença não fica explícita devido à grande diferença de ordem de grandeza entre os resultados obtidos em baixas temperaturas e altas temperaturas. Por isso, foi dado ênfase ao intervalo de temperatura entre 30 e 35 °C e umidade relativa de 90 a 100 %, Figura 5.4 (b) para que a diferença entre valor calculado e aproximado pudesse ser então observada.

A comparação entre os fatores multiplicativos utilizados nos termos de convecção e radiação do método de análise exérgica de Prek e Butala (2010) (Equações 4.18 e 4.19 da seção 4.3) e os valores de fator de Carnot é mostrada na Figura 5.5.

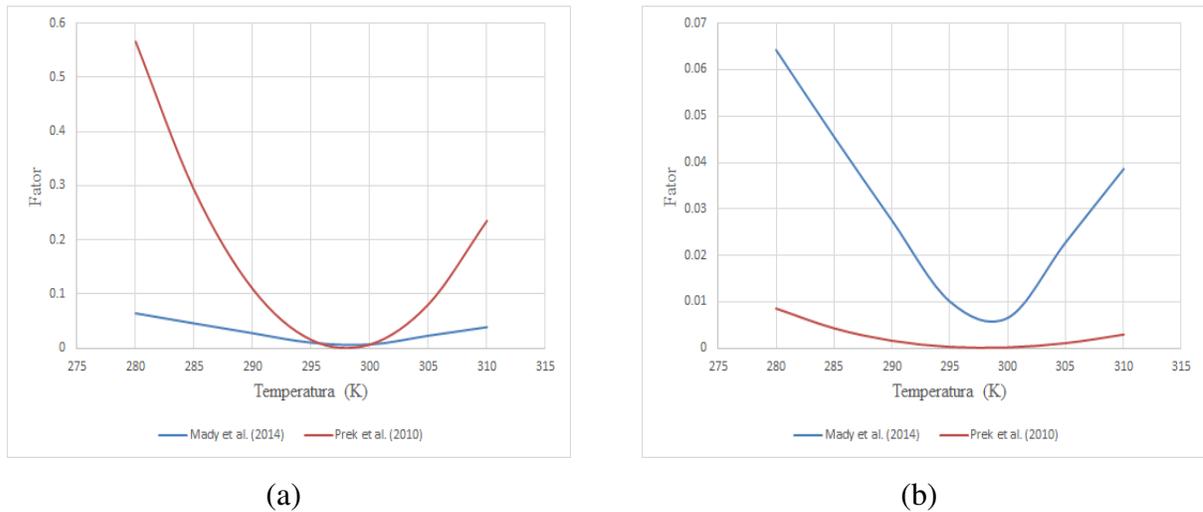


Figura 5.5: Comparação entre os fatores multiplicadores e o fator de Carnot para os termos de: (a) Convecção. (b) Radiação.

Nota-se com base na Figura 5.5 que os fatores multiplicadores utilizados nos termos de convecção e radiação na análise exérgica de Prek e Butala (2010), obtidos para temperaturas arbitrárias no intervalo de 10 a 35 °C, são diferentes dos fatores de Carnot, principalmente para os casos de temperaturas dos extremos. Esses fatores afetam o cálculo dos indicadores de conforto térmico obtidos pela análise de Prek e Butala (2010), justificando então a proposição da modificação dos termos de convecção e radiação desse método de análise exérgica.

A taxa de exérgia transferida ao ambiente foi então recalculada após as modificações propostas nos termos de exérgia associados à radiação e convecção. A Figura 5.6 mostra uma comparação entre os resultados obtidos para o cálculo da taxa de exérgia transferida ao ambiente para a abordagem original feita por Prek e Butala (2010) e para a abordagem feita com as modificações propostas (mostradas nas Equações 4.20 e 4.21 da seção 4.3).

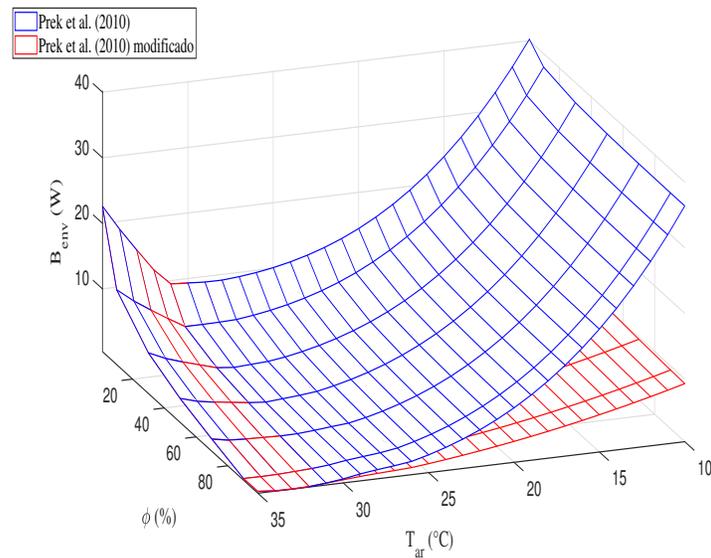


Figura 5.6: Resultados utilizando o método de Prek e Butala (2010) com termos de radiação e convecção modificados.

Observa-se que para altas temperaturas, independente da umidade relativa, os valores calculados pelas duas abordagens são praticamente os mesmos. Isso acontece pois nessa faixa de temperatura os fenômenos de radiação e convecção são quase inexistentes, visto que a diferença de temperatura entre a pele e o meio ambiente é muito pequena. Para temperaturas inferiores a 30 °C, a diferença entre as duas abordagens torna-se relevante e percebe-se que na análise exérgica modificada a radiação passa a ser mais influente e a convecção torna-se menos influente no cálculo da taxa de exergia transferida ao ambiente. Para o caso extremo de temperatura de 10 °C e umidade relativa de 50 %, a radiação e convecção correspondem à 43 % e 33 % da taxa de exergia transferida ao ambiente, respectivamente, enquanto que na abordagem original de Prek e Butala (2010) elas correspondem a aproximadamente 14 % e 75 %, respectivamente.

A Figura 5.7 (a) mostra a comparação entre a taxa de transferencia de exergia para o ambiente obtidas pelo uso dos métodos de análise exérgica de: Prek e Butala (2010), Mady *et al.* (2014) e Prek e Butala (2010) com modificações propostas para os termos de radiação e convecção. Na 5.7 (b) é enfatizada a semelhança entre o comportamento da curva obtido utilizando o método de Mady *et al.* (2014) e Prek e Butala (2010) com modificações nos termos de radiação e convecção.

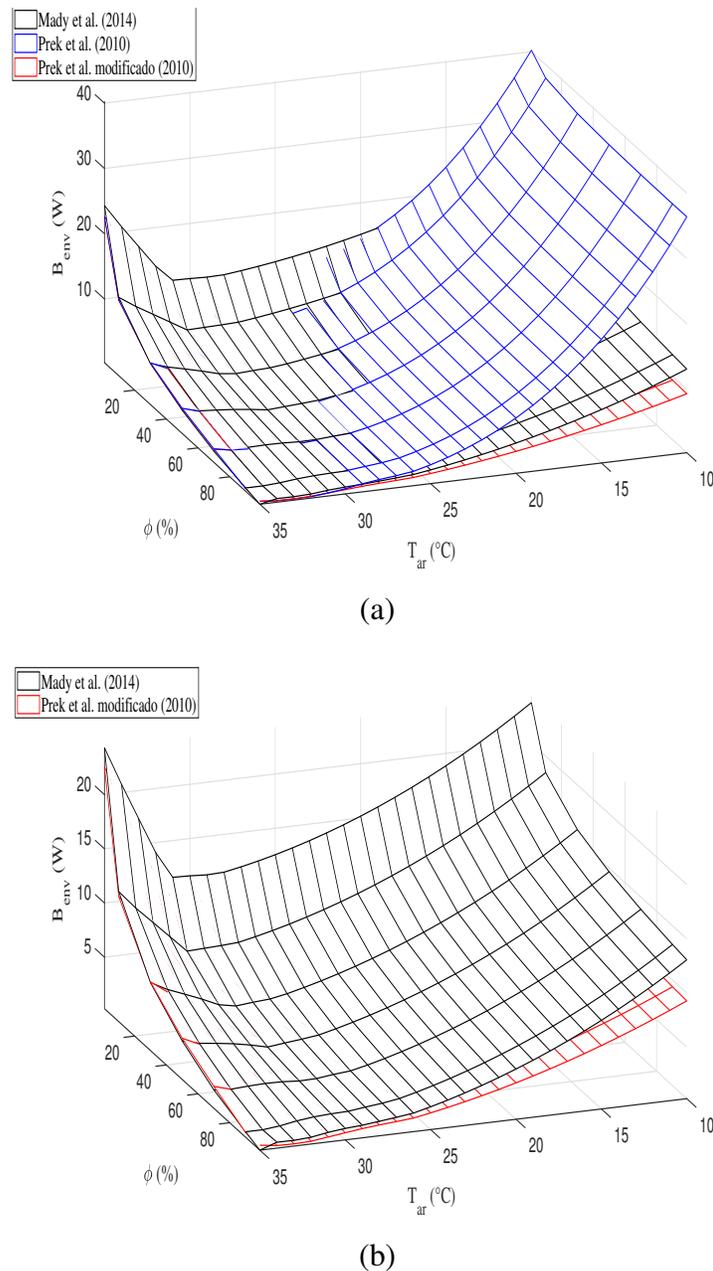


Figura 5.7: Comparação para taxa de exergia transferida ao ambiente nos modelos: (a) Mady *et al.* (2014), Prek e Butala (2010) e Prek e Butala (2010) modificado. (b) Mady *et al.* (2014) e Prek e Butala (2010) modificado.

Com a modificação proposta para os termos de radiação e convecção da análise exérgica de Prek e Butala (2010), percebe-se que os novos valores de taxa de transferência de exergia ao ambiente se aproximam cada vez mais dos valores que foi obtido no método de análise exérgica de Mady *et al.* (2014). Isso mostra que os métodos tem boa concordância entre si, embora os

fenômenos sejam tratados de maneira bem distinta.

Agora, aplicando o método de análise exergética de Shukuya *et al.* (2010) ao modelo do corpo humano de Ferreira e Yanagihara (2009), obteve-se as curvas de taxa de exergia destruída e de exergia transferida ao ambiente mostradas na Figura 5.8.

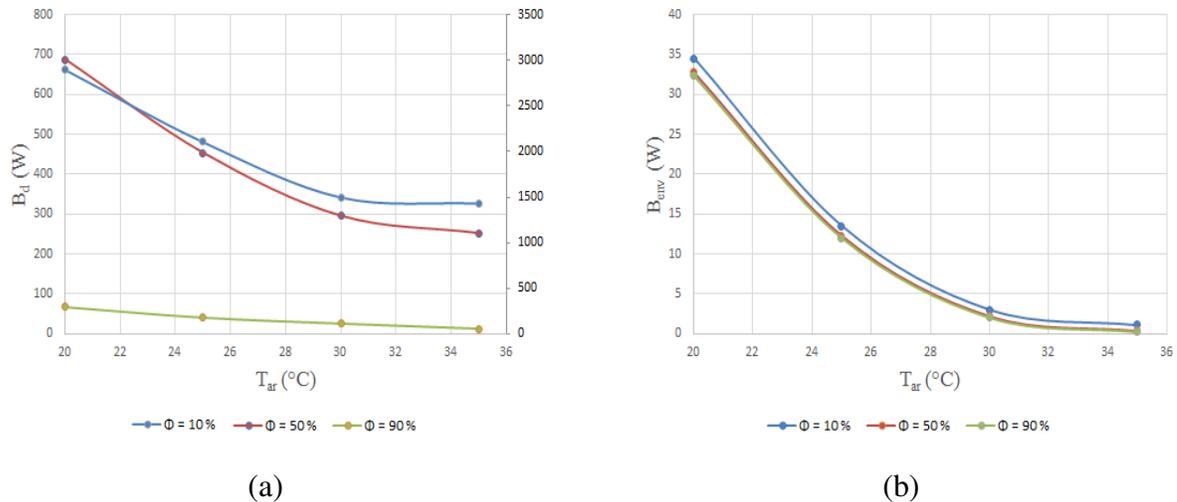


Figura 5.8: Resultados para cenários propostos na Tabela 4.4 utilizando o método de Shukuya *et al.* (2010): (a) Taxa de exergia destruída. (b) Taxa de exergia transferida ao ambiente.

O comportamento da curva obtida para o método de análise exergética de Shukuya *et al.* (2010) difere completamente dos outros dois métodos previamente discutidos, principalmente para ambientes secos. É observado que os valores de taxa de exergia destruída são de pelo ao menos uma ordem de grandeza maiores do que os valores obtidos utilizando-se os métodos de Mady *et al.* (2014) e Prek e Butala (2010). O fator que causa esse valor alto de exergia destruída é o termo de exergia associada à formação de água no núcleo devido ao metabolismo. Segundo Shukuya *et al.* (2010) esse termo deve ser considerado na análise exergética porque os átomos de hidrogênio presentes na matéria orgânica contida nos nutrientes metabolizados podem se combinar a átomos de oxigênio provenientes do processo de inspiração. Entretanto, outros autores, como por exemplo, Batato *et al.* (1990), Mady e De Oliveira Junior (2013) e Mady *et al.* (2014), contabilizaram a formação de água devido às reações metabólicas e não encontraram valores que influenciassem tanto assim na análise exergética.

Shukuya *et al.* (2010) enfatizaram que o ponto de mínima exergia destruída está associado a situação sob a qual o indivíduo estaria em conforto térmico, pelo ao menos para ambientes em

condições típicas de inverno. Entretanto, para o intervalo de temperatura mostrado na Figura 5.8 (a) é observado que o valor da taxa de exergia está sempre decrescendo com o aumento da temperatura, não sendo observado portanto um ponto de mínimo global.

A Figura 5.8 (b) mostra a taxa de exergia transferida ao ambiente, que é composta pelos termos associados à radiação emitida pela superfície da pele, convecção, sudorese e ao ar expirado. Era esperado que acontecesse uma mudança de comportamento quando a temperatura de neutralidade térmica fosse atingida, assim como foi observado nos métodos discutidos anteriormente. Entretanto, percebe-se que a taxa de exergia transferida ao ambiente continua sempre decrescendo, mesmo para temperaturas elevadas. Esperava-se que para altas temperaturas o mecanismo sudomotor causasse o aumento da taxa de exergia transferida ao ambiente, porém, percebe-se que a exergia associada à sudorese não somente diminui, como também é de ordem de grandeza inferior as outras componentes. Por exemplo, na temperatura de 35 °C e 50% de umidade relativa, a exergia associada ao processo de sudorese é de apenas 0,0000844 W, enquanto a exergia associada a radiação é de aproximadamente 0,25 W. Isso é contrário à todos os resultados disponíveis na literatura, como por exemplo, as análises experimentais pela Primeira Lei da Termodinâmica feitas por Hardy e DuBois (1938a) e Hardy e DuBois (1938b), no qual é ressaltado que a medida que a temperatura do ambiente é aumentada, as contribuições energéticas relacionadas à convecção e radiação se tornam quase inexistentes enquanto a contribuição devido ao processo de sudorese é dominante. Esse princípio é válido tanto para a análise energética quanto para a exérgica.

Na Figura 5.9 é mostrada uma comparação entre a taxa de exergia destruída calculada pelo método de Mady *et al.* (2014), Prek e Butala (2010) e Shukuya *et al.* (2010). Ressaltando ainda mais que o método proposto por Shukuya *et al.* (2010) pode não estar considerando os processos acontecendo no corpo humano de forma correta.

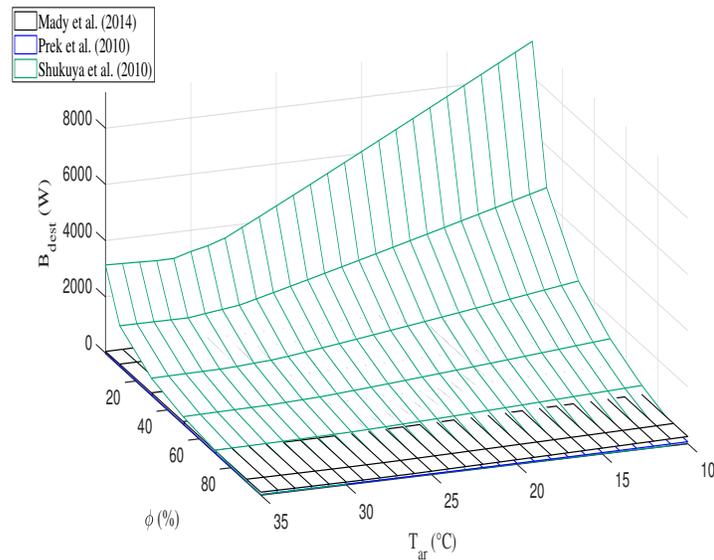


Figura 5.9: Comparação entre a taxa de exergia destruída obtidas pelos métodos de análise exérgica de: Prek e Butala (2010), Shukuya *et al.* (2010) e Mady *et al.* (2014).

Com a modificação proposta explicada na sessão anterior, os resultados obtidos para taxa de exergia destruída para o método de Shukuya *et al.* (2010) sem os termos de exergia relacionados a produção de água no núcleo e no envoltório são mostrados na Figura 5.10.

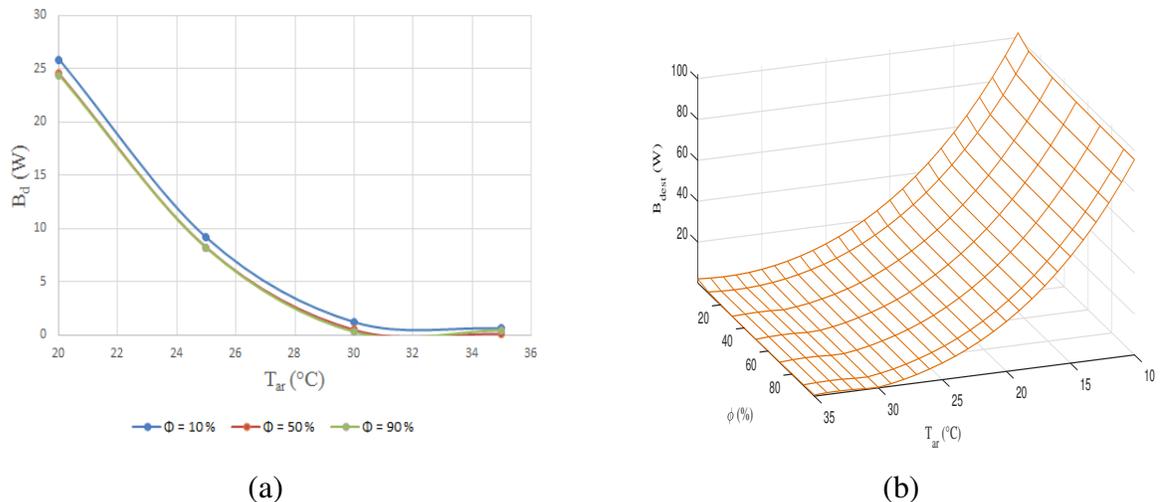


Figura 5.10: Resultados utilizando o método de análise exérgica de Shukuya *et al.* (2010) com modificação proposta. (a) Como função da temperatura do ar. (b) Como função da temperatura e da umidade relativa do ar.

Mesmo com as modificações propostas, o método ainda não apresenta resultados satisfató-

rios, visto que alguns valores de taxa de exergia calculada são menores do que zero. Para obter um resultado satisfatório para comparação com os outros métodos, trabalhou-se com os valores absolutos da taxa de exergia destruída calculada. O comportamento da curva de taxa de exergia destruída com as modificações propostas agora é similar ao que foi observado nos outros métodos para cenários com temperaturas inferiores a temperatura de neutralidade térmica, ou seja, é observado que a taxa de exergia destruída diminui com o aumento da temperatura.

Os valores de exergia destruída com essa modificação são mais semelhantes aos resultados obtidos utilizando o método de Prek e Butala (2010), pelo ao menos para ambientes com temperaturas e umidades relativas elevadas, como é mostrado na Figura 5.11.

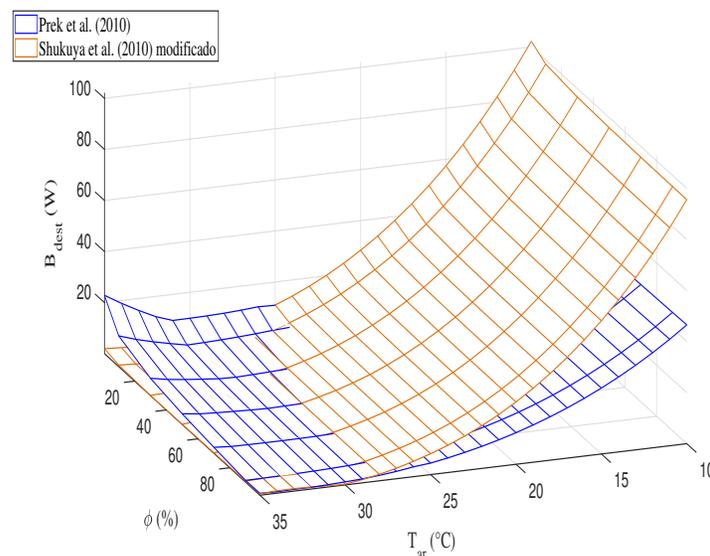


Figura 5.11: Comparação entre a taxa de exergia destruída calculada pelo método de Prek e Butala (2010) e pelo método de Shukuya *et al.* (2010) desconsiderando-se o termo de geração de água devido ao metabolismo.

A Figura 5.12 mostra a comparação da taxa de exergia destruída e de exergia transferida ao ambiente entre os três métodos, considerando o método de Shukuya *et al.* (2010) com as modificações propostas.

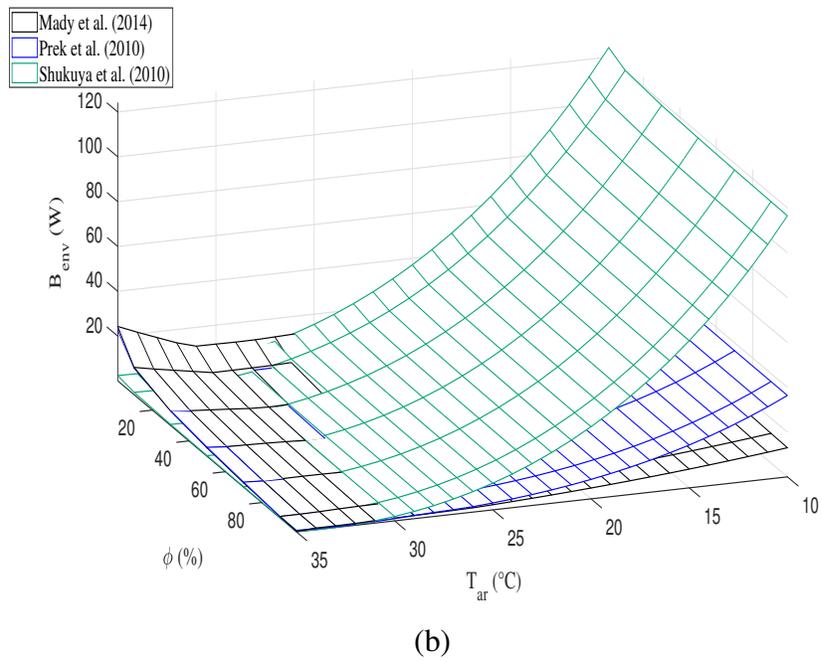
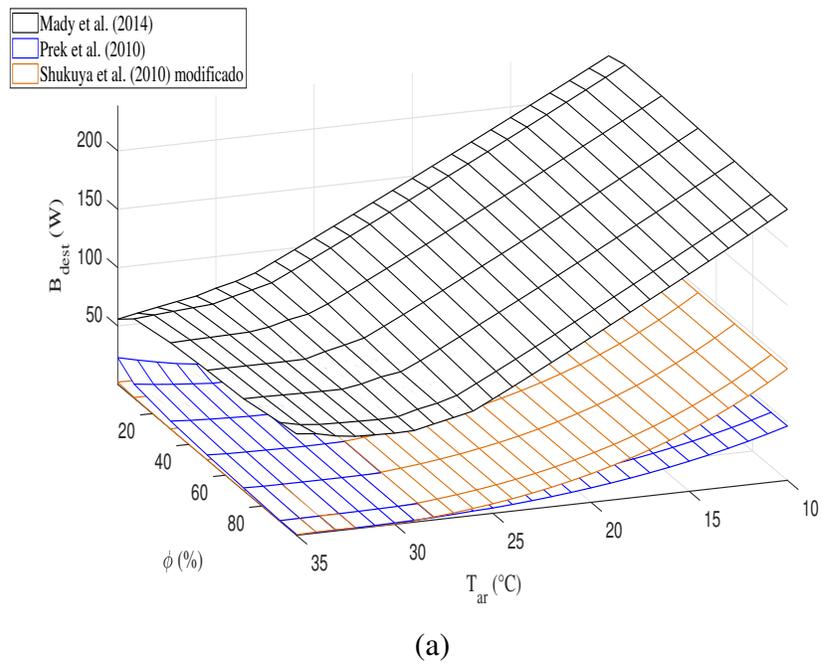
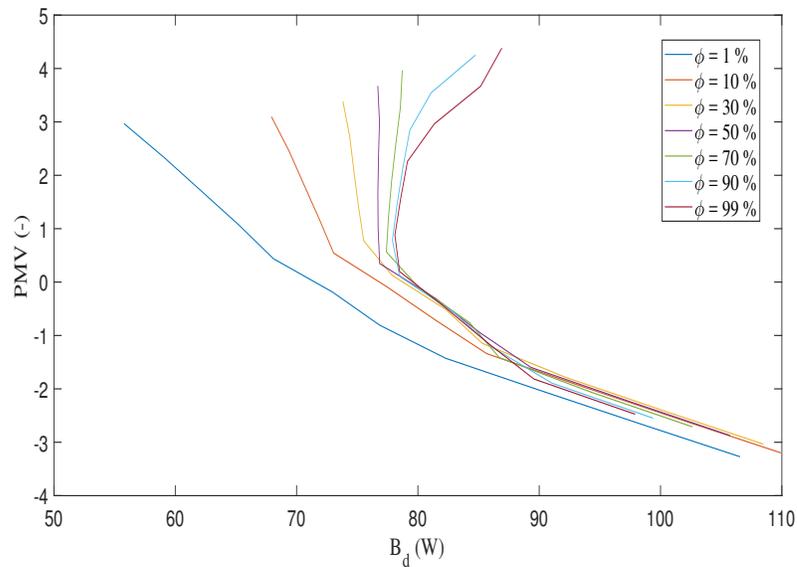


Figura 5.12: Resultados utilizando os três métodos de análise exergética, sendo o método de Shukuya *et al.* (2010) com modificação proposta. (a) Taxa de exergia destruída. (b) Taxa de exergia transferida ao ambiente.

Notou-se que embora os métodos de análise exergética de Mady *et al.* (2014) e Prek e Butala (2010) sejam bem diferentes, as taxas de exergia transferidas ao ambiente são semelhantes para temperaturas acima de 25 °C, independentemente da umidade relativa. Mesmo desconsiderando-se os termos de geração de água no núcleo e no envoltório, o comportamento da curva do método de Shukuya *et al.* (2010) ainda é significativamente diferente dos outros métodos para o intervalo de temperatura e umidade relativa considerados.

As Figuras 5.13 até a Figura 5.18 mostram a relação entre os indicadores de conforto térmico mostrados na American Society of Heating e Engineers (2005) (PMV e PPD) e os indicadores obtidos no presente estudo ( $B_d$  e  $B_{env}$ ) utilizando-se os três métodos de análise exergética. A Figura 5.13 mostra a relação entre o PMV e os indicadores  $B_d$  e  $B_{env}$  quando o método de análise exergética de Mady *et al.* (2014) é utilizado.



(a)

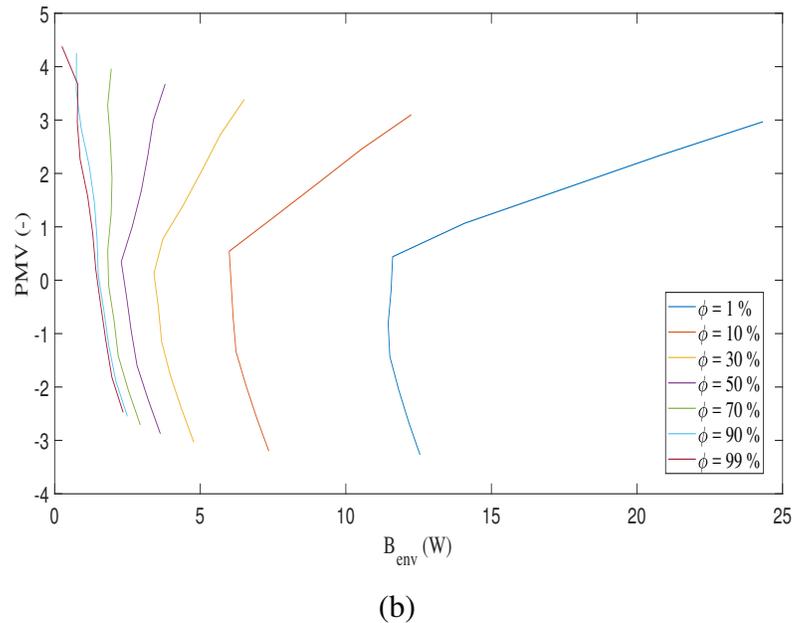
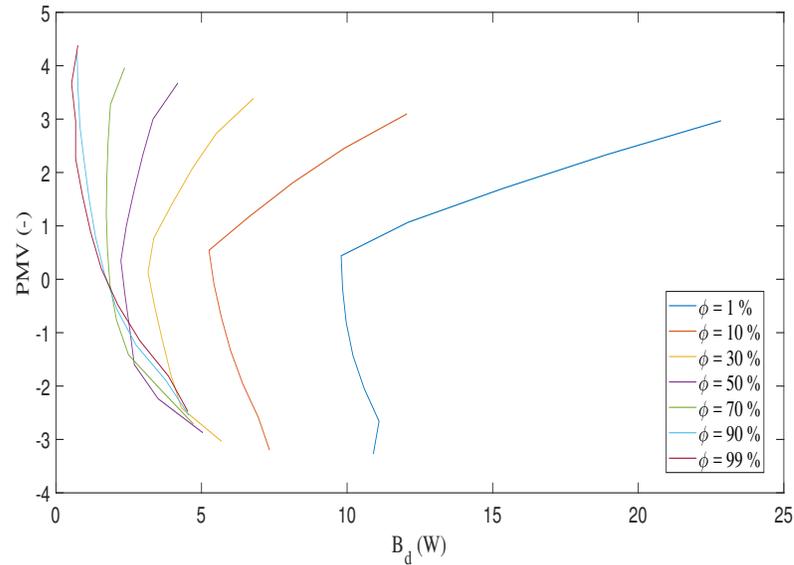


Figura 5.13: Relação entre o indicador PMV definidos na American Society of Heating e Engineers (2005) e: (a) a taxa de exergia destruída pelo método de Mady *et al.* (2014). (b) a taxa de exergia transferida ao ambiente pelo método de Mady *et al.* (2014).

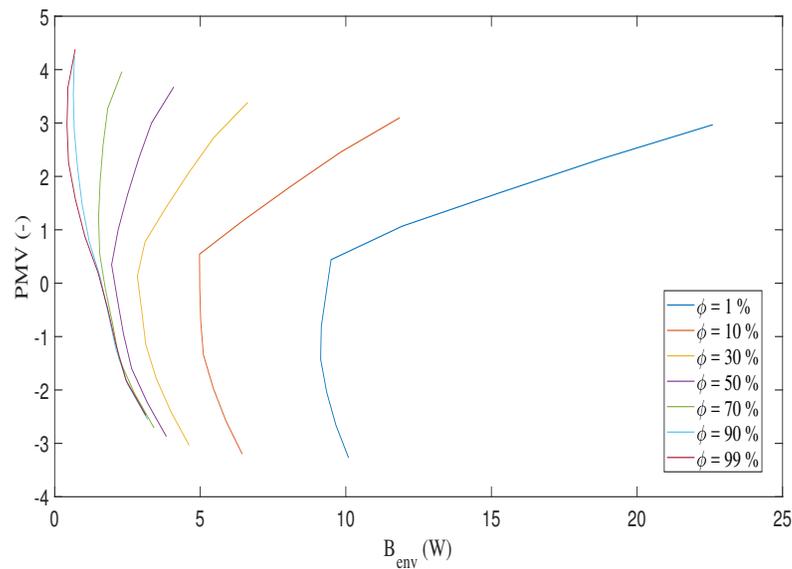
A condição de conforto térmico é comumente relacionada com um valor de PMV nulo na escala mostrada em American Society of Heating e Engineers (2005). Esse valor é denominado de neutralidade térmica. Observando-se a Figura 5.13 (a) percebe-se que o ponto de mínima exergia destruída não é suficiente para classificar a condição de conforto térmico. Somente para as curvas de umidade relativa do ar acima de 50 % o ponto de mínima exergia destruída coincide com valores de PMV próximos a zero. É também observado que para esses cenários, no intervalo de exergia destruída compreendido entre aproximadamente 80 e 90 W, um mesmo valor de exergia destruída pode estar relacionado tanto com sensação térmica de "frio"(PMV negativo) quanto de "calor"(PMV positivo). Além disso, para a faixa de PMV negativo, nota-se que a taxa de exergia destruída é quase independente da umidade relativa do ar.

Já na Figura 5.13 (b) um valor de PMV aproximadamente nulo está associado a uma taxa de exergia transferida ao ambiente mínima para ambientes com umidade relativa do ar inferior a 50 %. Além disso, observando-se a parte de PMV positivo, correspondente a sensação térmica de "calor", é observado uma grande variação de exergia transferida ao ambiente em ambientes secos. Enquanto isso, para a parte de PMV negativo a variação de exergia transferida ao ambiente é consideravelmente pequena para todas as curvas de umidade relativa do ar analisadas.

A Figura 5.14 mostra a relação entre o indicador de conforto térmico PMV e os indicadores obtidos no presente estudo ( $B_d$  e  $B_{env}$ ) utilizando-se o método de análise exergética de Prek e Butala (2010).



(a)



(b)

Figura 5.14: Relação entre o indicador PMV definido na American Society of Heating e Engineers (2005) e: (a) a taxa de exergia destruída pelo método de Prek e Butala (2010). (b) a taxa de exergia transferida ao ambiente pelo método de Prek e Butala (2010).

As curvas mostradas na Figura 5.14 (a) e Figura 5.14 (b) apresentam o mesmo comportamento, embora  $B_d$  e  $B_{env}$  representem fenômenos distintos. Entretanto, é importante lembrar que o método de Prek e Butala (2010) originalmente não faz a distinção entre exergia de alimentação e exergia de saída, portanto, o cálculo de  $B_{env}$  foi proposto pelo presente estudo, conforme mostrado na seção 4.4. O único fator que difere o cálculo de  $B_{env}$  e de  $B_d$  é que o último considera um termo a mais, que está associado às irreversibilidades internas do corpo humano. Portanto, o comportamento semelhante é esperado.

Para ambientes com umidade relativa do ar inferior a 50 % é observado um valor de PMV aproximadamente nulo associado tanto a taxa de exergia destruída mínima (Figura 5.14 (a)) quanto a taxa de exergia transferida ao ambiente mínima (Figura 5.14 (b)). Assim como foi observado na Figura 5.13 (b), notou-se que para valores positivos de PMV é observado uma grande variação de exergia transferida ao ambiente quando a umidade relativa do ar é baixa. Além disso, no método de Prek e Butala (2010) há também uma grande variação de exergia destruída nesses ambientes (Figura 5.14 (a)).

Ainda observando-se as Figuras 5.14 (a) e (b) é possível inferir que a taxa de exergia destruída e a taxa de exergia transferida ao ambiente tornam-se independentes da umidade relativa somente em ambientes cuja umidade relativa é alta, o que, para a taxa de exergia destruída, difere do resultado mostrado na Figura 5.13 quando foi utilizado o método de Mady *et al.* (2014) no qual a taxa de exergia destruída é quase independente da umidade relativa do ar na escala de PMV negativo.

A Figura 5.15 mostra a relação entre o indicador PMV definido na American Society of Heating e Engineers (2005) e a taxa de exergia destruída (Figura 5.15 (a)) e a taxa de exergia transferida ao ambiente (Figura 5.15 (b)). Ambas calculadas pelo método de Shukuya *et al.* (2010), lembrando-se que nos valores de taxa de exergia destruída apresentados nessa etapa do estudo já estão sendo desconsiderados os termos de exergia associados à geração de água devido ao metabolismo.

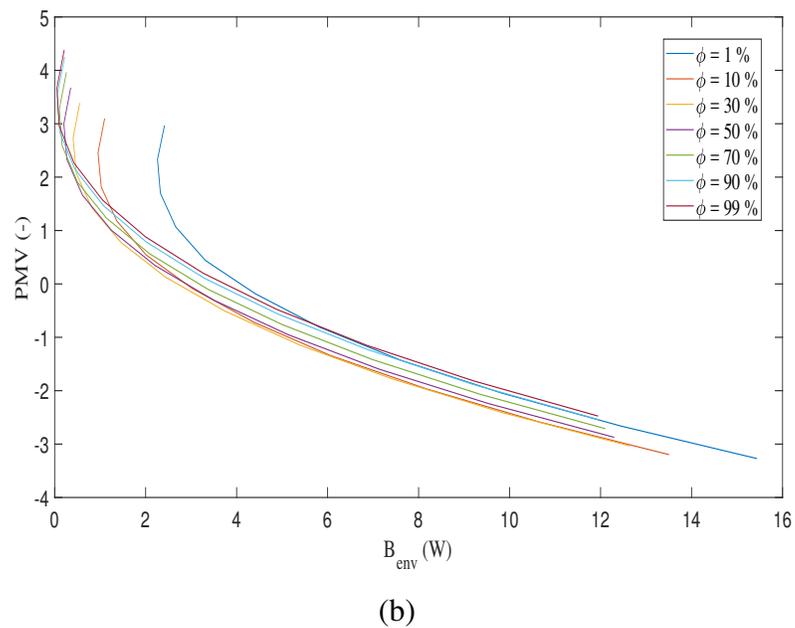
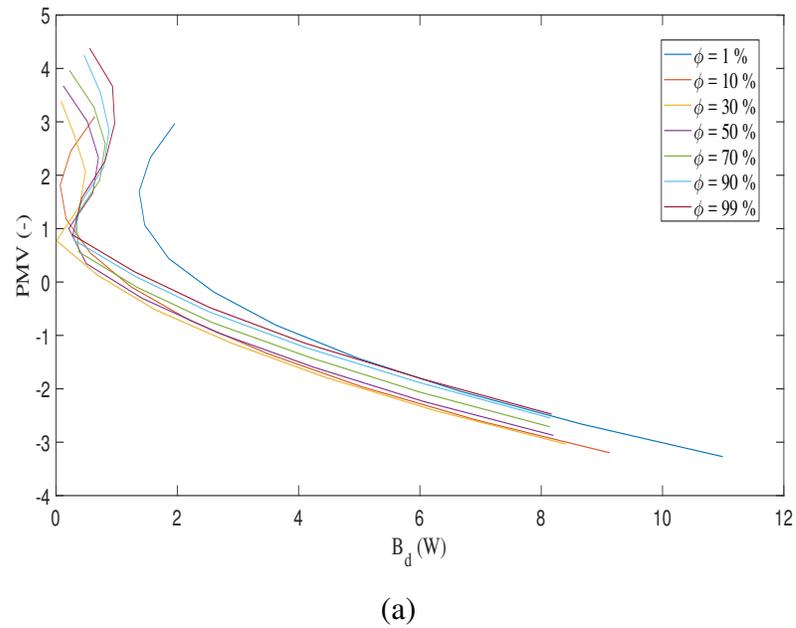
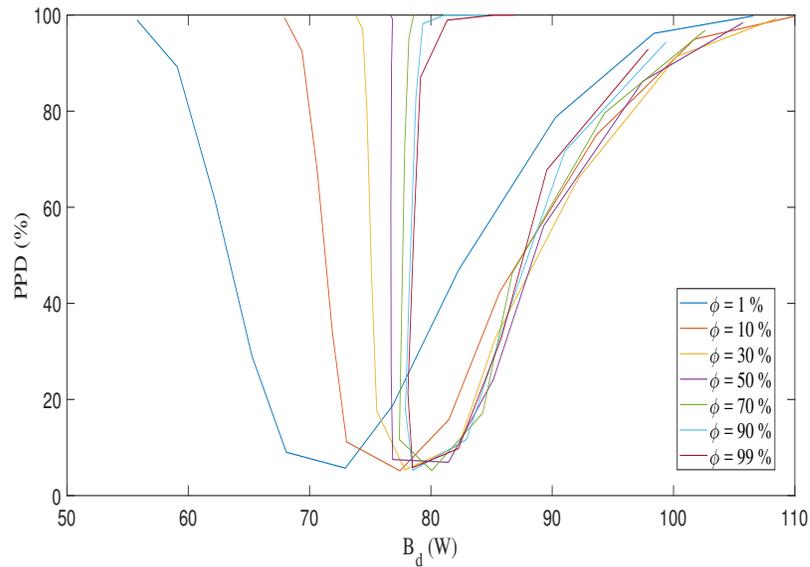


Figura 5.15: Relação entre o indicador PMV definido na American Society of Heating e Engineers (2005) e : (a) a taxa de exergia destruída pelo método de Shukuya *et al.* (2010). (b) a taxa de exergia transferida ao ambiente pelo método de Shukuya *et al.* (2010).

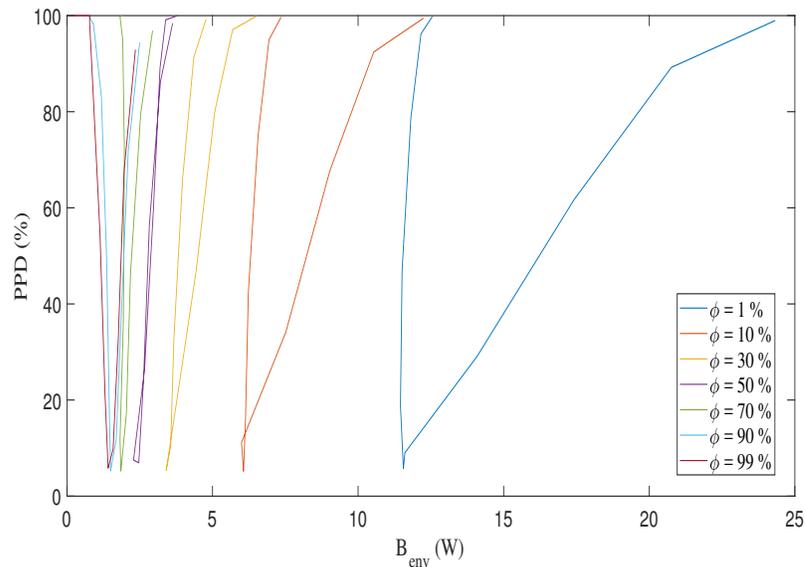
Nas Figuras 5.15 (a) e (b) é perceptível uma certa independência da taxa de exergia destruída e da taxa de exergia transferida ao ambiente em relação a umidade relativa do ar. Diferentemente

do que é mostrado em outros estudos, como por exemplo, Simone *et al.* (2011), o mínimo ponto de exergia destruída não corresponde à PMV na região de "levemente frio", mas sim a valores de PMV localizados na região de "levemente quente".

A Figura 5.16 mostra a curva do indicador PPD mostrado na American Society of Heating e Engineers (2005) em relação ao indicador da taxa de exergia destruída (Figura 5.16 (a)) e em relação a taxa de exergia transferida ao ambiente (Figura 5.16 (b)) obtidas pelo presente estudo utilizando o método de análise exérgica de Mady *et al.* (2014).



(a)



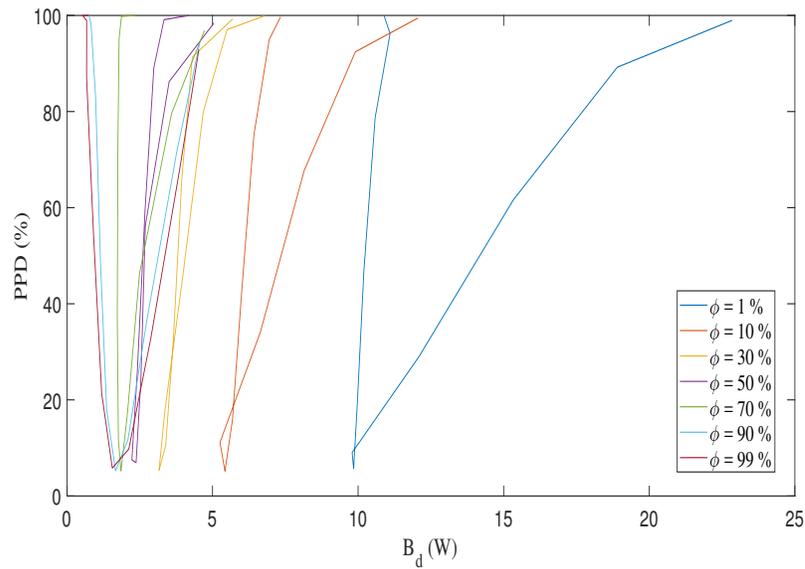
(b)

Figura 5.16: Relação entre o indicador PPD definidos na American Society of Heating e Engineers (2005) e . (a) a taxa de exergia destruída pelo método de Mady *et al.* (2014). (b) a taxa de exergia transferida ao ambiente pelo método de Mady *et al.* (2014).

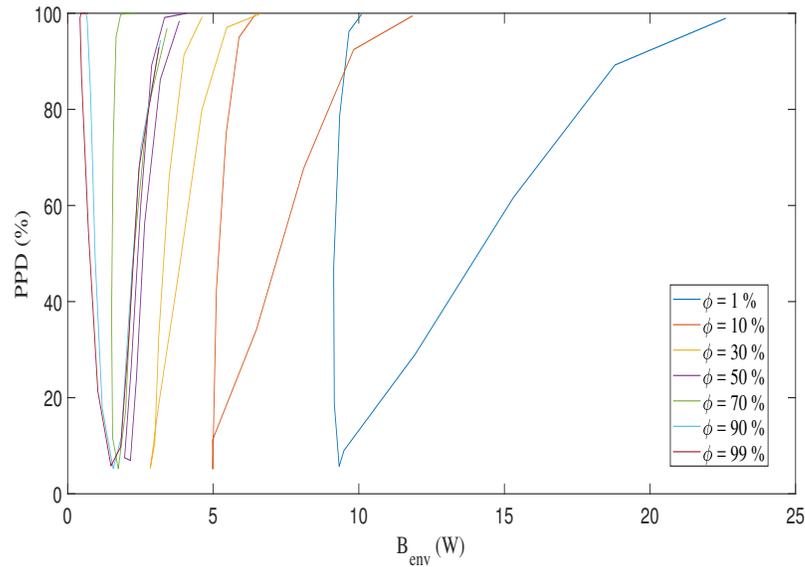
Observa-se na Figura 5.16 (a) que com a redução da umidade relativa, a taxa de exergia destruída torna-se cada vez mais dependente desta para valores de exergia destruída inferiores à 80 W, o que representaria ambientes cuja temperatura é alta. Além disso, é possível inferir que para

cada curva de umidade relativa há um valor ótimo de taxa de exergia destruída (Figura 5.16 (a)) e de taxa de exergia transferida ao ambiente (Figura 5.16 (b)) no qual a percentagem de pessoas insatisfeitas com as condições do ambiente é mínima (PPD = 5%)

A Figura 5.17 mostra a curva do indicador PPD em relação ao indicador da taxa de exergia destruída (Figura 5.17 (a)) e em relação a taxa de exergia transferida ao ambiente (Figura 5.17 (b)) obtidas pelo presente estudo utilizando o método de análise exérgica de Prek e Butala (2010).



(a)

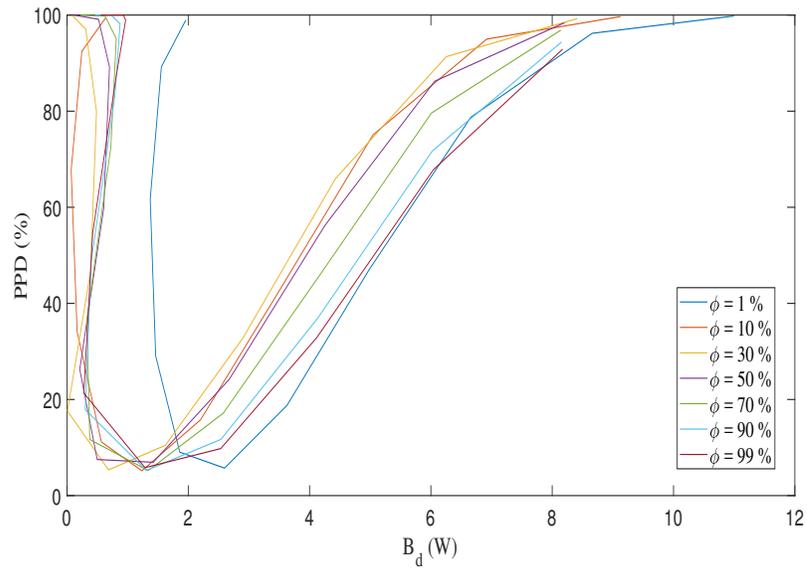


(b)

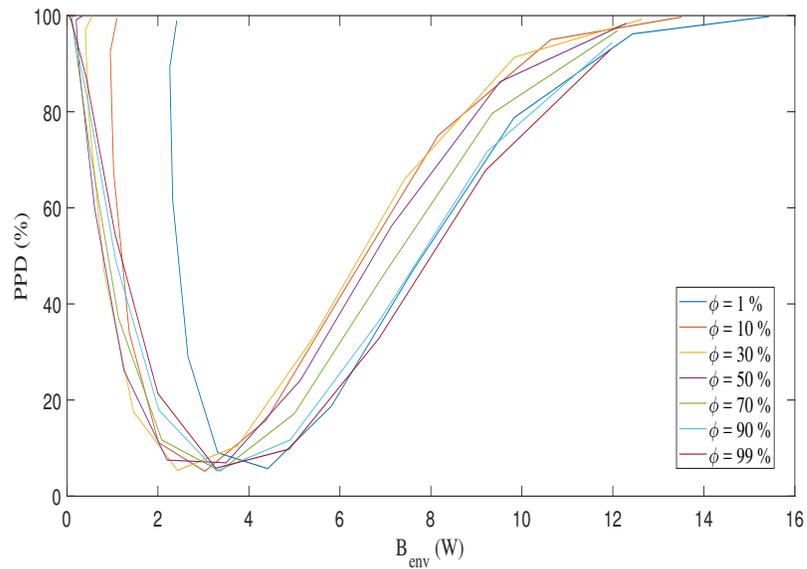
Figura 5.17: Relação entre o indicador PPD definidos na American Society of Heating e Engineers (2005) e: (a) a taxa de exergia destruída pelo método de Prek e Butala (2010). (b) a taxa de exergia transferida ao ambiente pelo método de Prek e Butala (2010).

Com a utilização do método de Prek e Butala (2010) é observado que a relação entre o PPD e a taxa de exergia destruída (Figura 5.17 (a)) e entre o PPD e a taxa de exergia transferida ao ambiente (Figura 5.17 (b)) é extremamente similar. Para ambas figuras, à medida que a umidade relativa do ar aumenta, é observada um redução da dependência entre ambas essas grandezas físicas em relação à umidade relativa, respectivamente. Além disso, também podemos inferir que para cada curva de umidade relativa, um único valor de taxa de exergia destruída e de taxa de exergia transferida ao ambiente coincidem com uma percentagem de pessoas insatisfeitas mínima.

A Figura 5.18 mostra a curva do indicador PPD em relação ao indicador da taxa de exergia destruída (Figura 5.18 (a)) e em relação a taxa de exergia transferida ao ambiente (Figura 5.18 (b)) obtidas pelo presente estudo utilizando o método de análise exergética de Shukuya *et al.* (2010). É importante destacar que na taxa de exergia destruída considerada nesse gráfico a chamada geração de água no núcleo e no envoltório devido ao metabolismo foram desconsiderados.



(a)



(b)

Figura 5.18: Relação entre o indicador PPD definido na American Society of Heating e Engineers (2005) e . (a) a taxa de exergia destruída pelo método de Shukuya *et al.* (2010). (b) a taxa de exergia transferida ao ambiente pelo método de Shukuya *et al.* (2010).

Assim como nos resultados mostrados anteriormente para os outros métodos de análise exer-gética analisados, as Figura 5.18 (a) e 5.18 (b) apresentam uma percentagem mínima de pessoas insatisfeitas com as condições ambientais para um único valor de exergia destruída e de exergia transferida ao ambiente. Entretanto, para o método de Shukuya *et al.* (2010) esse valor de exergia destruída e transferida ao ambiente são menos dependentes da umidade relativa do ar. É importante salientar que apesar do método ter sido o que resultou em comportamentos mais fora do esperado para "um ser humano comum", este trouxe uma correlação mais sólidas com os indicadores de conforto térmicos tradicionalmente utilizados.

As Figuras 5.19 até a Figura 5.24 mostram a influência da variação do coeficiente convectivo de troca de calor no cálculo da análise exer-gética. Para cada método analisado, é mostrado os resultados da taxa de exergia relacionada ao processo de convecção, da taxa de exergia transferida ao ambiente e da taxa de exergia destruída. A Figura 5.19 mostra esses resultados para o método de análise exer-gética de Mady *et al.* (2014). Cada curva representada na Figura 5.19 é referente a uma correlação específica empregada no cálculo do coeficiente de troca de calor por convecção entre a superfície da pele do individuo e o meio ambiente no qual ele está inserido. Por sua vez, cada correlação é aplicada à condições específicas e apresentam limites de aplicação baseados na velocidade do ar.

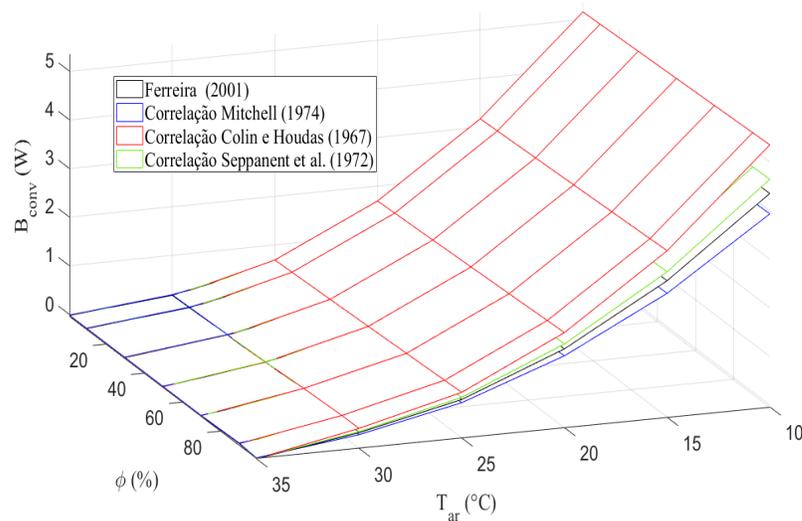


Figura 5.19: Exergia associada ao fenômeno de convecção utilizando o método de Mady *et al.* (2014) considerando-se coeficiente convectivo variável

Os resultados mostrados na Figura 5.19 foram gerados quando a velocidade do ar pode ser considerada nula. É importante destacar que mesmo que as correlações utilizadas para o cálculo

do coeficiente sejam supostamente aplicáveis à situações nas quais o ar esteja em movimento, elas estão definidas também caso a velocidade do ar seja nula, sendo que para este caso há um valor determinado (e constante) de coeficiente convectivo, como é mostrado na American Society of Heating e Engineers (2005). Por exemplo, para a correlação de Mitchell (1974) que é utilizada para indivíduo sentado com ar em movimento, o valor de coeficiente convectivo caso a velocidade do ar seja nula é igual a  $3,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Na Figura 5.19, para temperaturas elevadas, é verificado que a taxa de exergia associada ao processo de convecção não é influenciada significativamente pela utilização das diferentes correlações para o cálculo do coeficiente convectivo mostradas na American Society of Heating e Engineers (2005). A medida que a temperatura é reduzida, a influência do emprego das correlações para cálculo do coeficiente convectivo é mais expressiva. A taxa de exergia associada a convecção é superior à taxa calculada previamente utilizando os valores de coeficientes convectivos constantes mostrados em Ferreira (2001) quando aplica-se as correlações de Colin e Houdas (1967), utilizadas em condições nas quais o indivíduo encontra-se reclinado com ar em movimento, e de Seppanent et al. (1972), empregada quando o indivíduo está de pé com ar em movimento. Por exemplo, para o caso de temperatura do ar de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  e umidade relativa de  $90 \%$  é observado que utilizando-se a primeira correlação mencionada, a exergia associada à convecção corresponde à aproximadamente  $38 \%$  da taxa de exergia transferida ao ambiente, enquanto que utilizando a segunda correlação e também utilizando os valores constantes do estudo de Ferreira (2001) esta exergia corresponde a  $34$  e  $32 \%$ , respectivamente. A exergia associada ao processo de convecção calculada utilizando-se a correlação de Seppanent et al. (1972) resulta em valores mais próximos ao que foi obtido quando os valores constantes utilizados por Ferreira (2001) foram utilizados. Em ambos os casos, o indivíduo considerado está de pé.

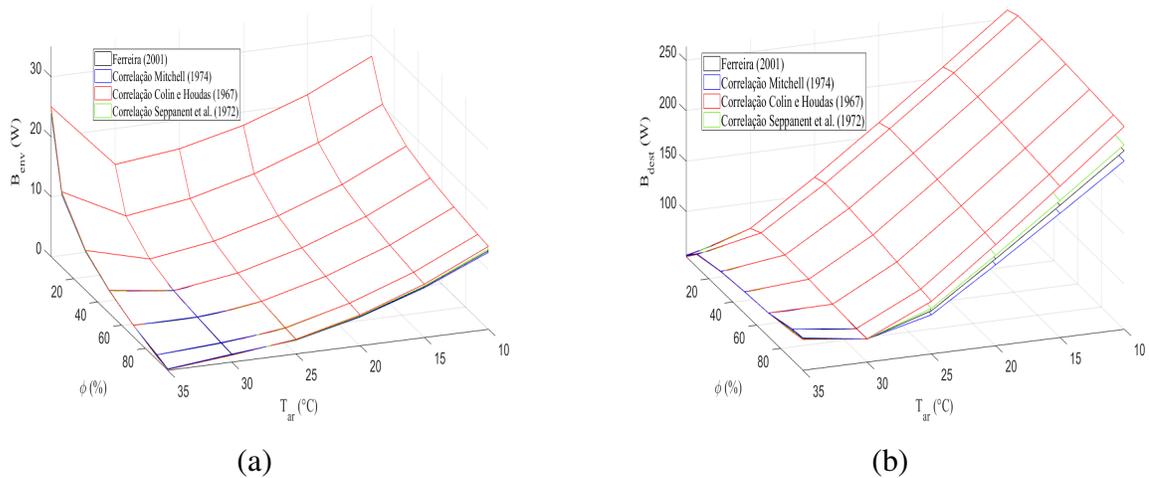


Figura 5.20: Comparação entre os indicadores de conforto térmico considerando-se coeficiente convectivo variável utilizando o método de Mady *et al.* (2014). (a) Taxa de exergia transferida ao ambiente. (b) Taxa de exergia destruída.

A taxa de exergia transferida para o ambiente está intrinsecamente relacionada com a taxa de exergia do processo de convecção quando a pessoa está em repouso. Ademais nas condições de conforto é um dos termos dominantes. Portanto, em grande parte do intervalo de temperatura e umidade relativa analisados a taxa de exergia transferida ao ambiente é também maior quando a correlação de Colin e Houdas (1967) é aplicada.

Na Figura 5.20 (b) era esperado que, como a taxa de exergia transferida por convecção e ao ambiente são maiores utilizando a correlação de Colin e Houdas (1967) do que utilizando os valores constantes de Ferreira (2001), a taxa de exergia destruída fosse menor. Entretanto, a mudança no coeficiente convectivo afeta não somente os termos relacionados ao fenômeno de convecção, mas também todo o programa computacional visto que a modificação do coeficiente convectivo e por sua vez a parcela energética da convecção altera, por exemplo, o perfil de temperatura e o critério de parada da rotina computacional (que é o balanço energético). Foi verificado que, comparando-se o caso no qual é utilizada a correlação de Colin e Houdas (1967) em relação ao caso de utilização dos coeficientes convectivos originais do estudo de Ferreira (2001), para a temperatura do ar de 10 °C e umidade relativa de 90 % observa-se um aumento de 5,8 % na taxa de exergia transferida ao ambiente, e isso causaria uma redução na taxa de exergia destruída. Entretanto, houve um aumento de 10 % na taxa de exergia associada ao metabolismo, acarretando um aumento da taxa de exergia destruída, que para o caso em análise é de 257,34 W em oposição aos 233,14 W sem a correlação (aumento de aproximadamente 10 %).

A Figura 5.21 mostra a taxa de exergia associada ao processo de convecção para o método de análise exérgica de Prek e Butala (2010) utilizando-se as diferentes correlações para o cálculo do coeficiente convectivo.

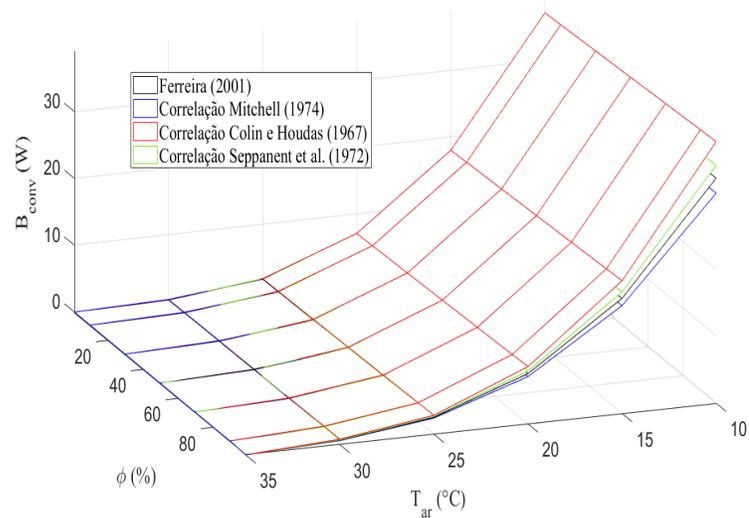


Figura 5.21: Exergia associada ao fenômeno de convecção utilizando o método de Prek e Butala (2010) considerando-se coeficiente convectivo variável

Assim como mostrado para o método de análise exérgica de Mady *et al.* (2014), utilizando-se o método de Prek e Butala (2010) a mesma relação foi encontrada: para as correlações de Colin e Houdas (1967) e de Seppanent et al. (1972) a taxa de exergia associada à convecção é superior à calculada com os valores de coeficientes convectivos constantes de Ferreira (2001).

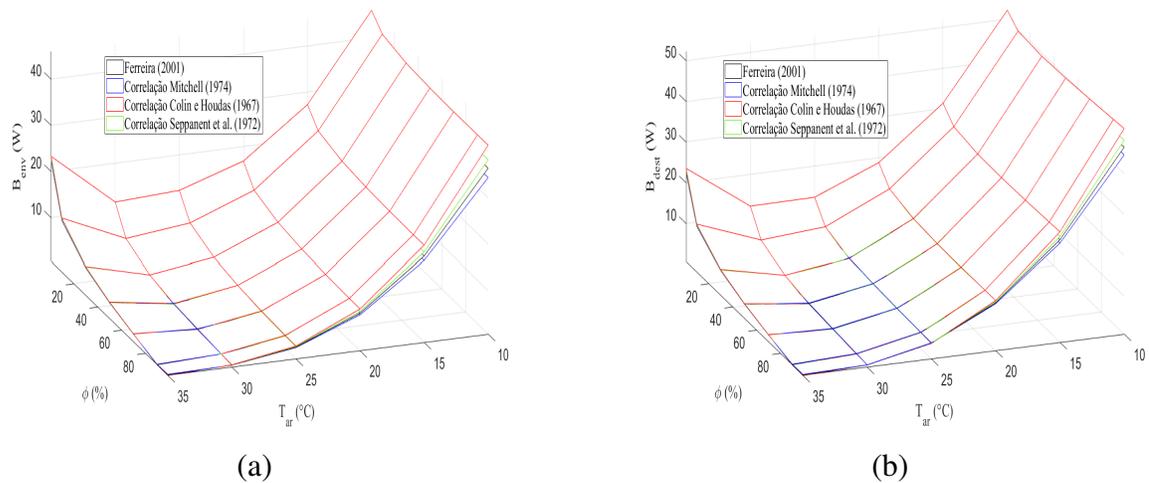


Figura 5.22: Comparação entre os indicadores de conforto térmico considerando-se coeficiente convectivo variável utilizando o método de Prek e Butala (2010). (a) Taxa de exergia transferida ao ambiente. (b) Taxa de exergia destruída.

A partir da observação da Figura 5.22 (a) conclui-se que, à medida que a temperatura diminui, a taxa de exergia transferida ao ambiente também é maior para os casos que utilizam as correlações de Colin e Houdas (1967) e de Seppanent et al. (1972) do que quando os valores originais de coeficiente convectivos do estudo de Ferreira (2001) são utilizados. Neste método de análise exérgica a influência do fenômeno de convecção é ainda mais expressiva na taxa de exergia transferida ao ambiente do que no método de Mady *et al.* (2014). Por exemplo, também para o caso de temperatura do ar de 10 °C e umidade relativa de 90 % é observado que a taxa de exergia relacionada a convecção corresponde a mais de 90 % da taxa de exergia transferida para o ambiente. Quando os valores originais de coeficiente convectivos do estudo de Ferreira (2001) são utilizados, a convecção corresponde à aproximadamente 92 % da exergia transferida ao ambiente, enquanto que utilizando-se a correlação de Colin e Houdas (1967) ela corresponde a cerca de 94 %.

Já na Figura 5.22 (b) observa-se que na maior parte dos cenários propostos a taxa de exergia destruída é maior quando a correlação de Colin e Houdas (1967) é utilizada. Nesse método a taxa de exergia destruída é a soma das taxas de exergias relacionadas aos diversos fenômenos que ocorrem no corpo humano, portanto, quando comparamos o caso no qual a correlação de Colin e Houdas (1967) é utilizada e o caso original com os coeficientes usados no trabalho de Ferreira (2001), ainda para o caso de temperatura do ar de 10 °C e umidade relativa de 90 %, percebe-se que um aumento de cerca de 16 % da exergia associada a convecção do primeiro resulta num aumento de 9,5 % da taxa de exergia destruída.

Além disso, com a utilização deste método, nota-se visualmente na Figura 5.22 (b) que, em uma faixa maior do que foi observado no método anterior (Figura 5.20 (b)), a taxa de exergia destruída quando utiliza-se a correlação de Mitchell (1974) é maior ( $25 \geq T_{ar} \geq 33$  e  $50\% \leq \phi \leq 100\%$ ). Embora essa diferença não seja significativa, esse resultado observado é interessante pois não é causado pelo aumento do termo relacionado à convecção.

Comparando-se a exergia associada a convecção, para o caso de temperatura do ar de 30 °C e umidade relativa de 70 %, quando a correlação de Mitchell (1974) é utilizada, com a obtida para este mesmo ambiente sem correlação, observou-se uma redução de aproximadamente 12,3 % neste termo. Na realidade o que ocorre neste caso em específico é que a redução dos termos da análise exérgica, quando as outras correlações são utilizadas para o cálculo de coeficiente convectivo em comparação ao caso sem correlação alguma, é bastante expressiva (chegando a uma redução de aproximadamente 45% no termo relacionado ao metabolismo quando utiliza-se a correlação de Colin e Houdas (1967)). Portanto, o aumento dos termos da análise exérgica relacionados ao metabolismo e sudorese utilizando a correção de Mitchell (1974) para cálculo do coeficiente convectivo, 13,1 % e 18,4 %, respectivamente, provocam esse efeito na Figura 5.22 (b). Esta relação de aumento e redução dos termos da análise exérgica quando emprega-se as três correlações destacadas até o momento com o caso sem correlação (Ferreira (2001)) é mostrada na Figura 5.23.

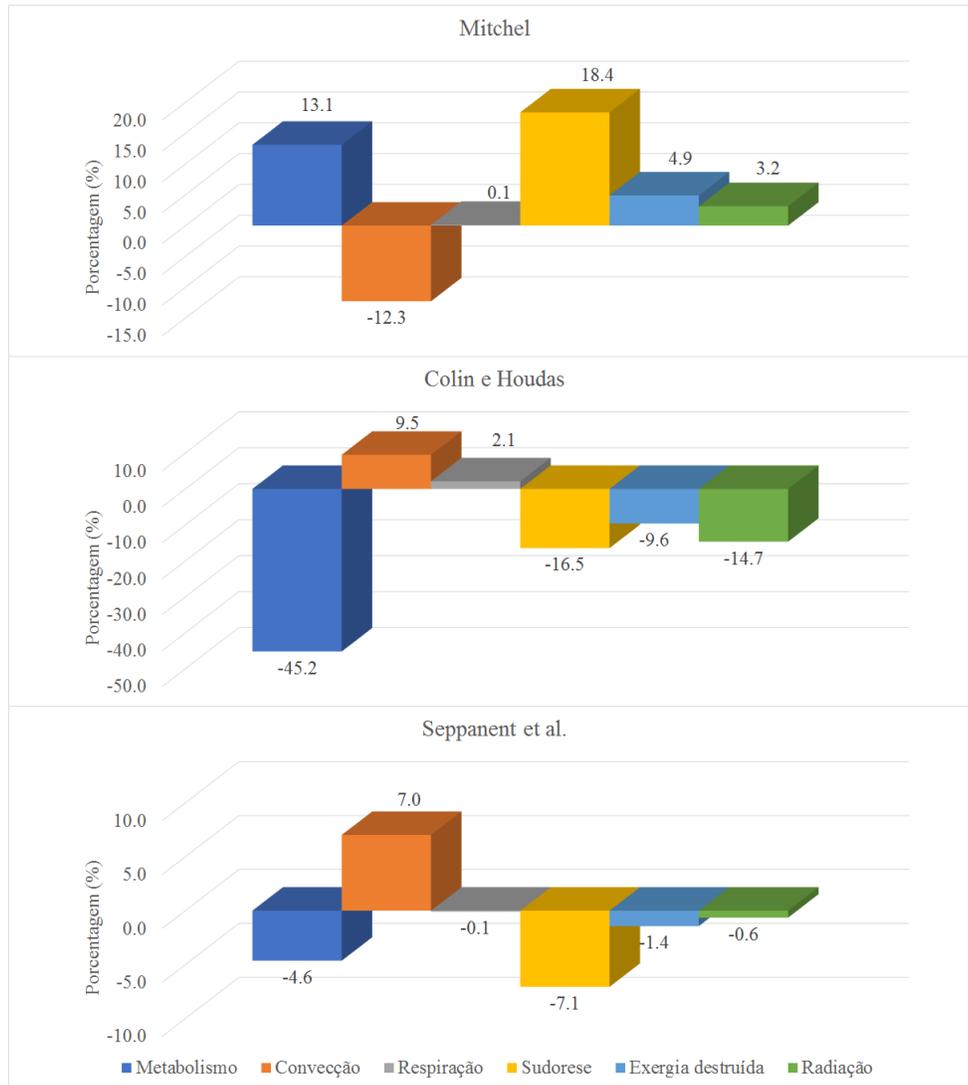


Figura 5.23: Comparação entre termos da análise exérgica de Prek e Butala (2010) considerando-se as correlações para o cálculo de coeficiente convectivo variável em relação ao caso sem correlação, originalmente mostrado em Ferreira (2001).

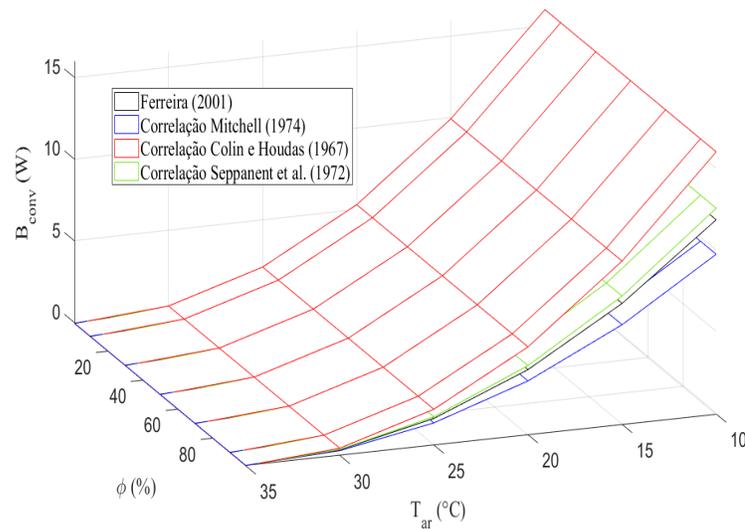


Figura 5.24: Exergia associada ao fenômeno de convecção utilizando o método de Shukuya *et al.* (2010) considerando-se coeficiente convectivo variável

Assim como mostrado para o método de análise exergética de Mady *et al.* (2014) e de Prek e Butala (2010), utilizando-se o método de Shukuya *et al.* (2010) a mesma relação foi encontrada: para as correlações de Colin e Houdas (1967) e de Seppanent et al. (1972) a taxa de exergia associada à convecção é superior à calculada com os valores de coeficientes convectivos constantes de Ferreira (2001). Entretanto, utilizando este método a diferença entre taxa de exergia associada ao fenômeno de convecção calculada utilizando-se a correlação de Colin e Houdas (1967) e a correlação de Seppanent et al. (1972) é mais expressiva do que foi observado nos outros dois métodos (Figuras 5.21 e 5.19). Por exemplo, para o caso de temperatura do ar de 10 °C e umidade relativa de 90 %, enquanto para o cálculo de  $B_{conv}$  aplicando-se o método de Prek e Butala (2010) a diferença observada entre correlação de Colin e Houdas (1974) e Correlação de Seppanent et al. (1972) foi de 0,70 W, para o método de análise exergética de Shukuya *et al.* (2010) essa diferença é de 3,4 W.

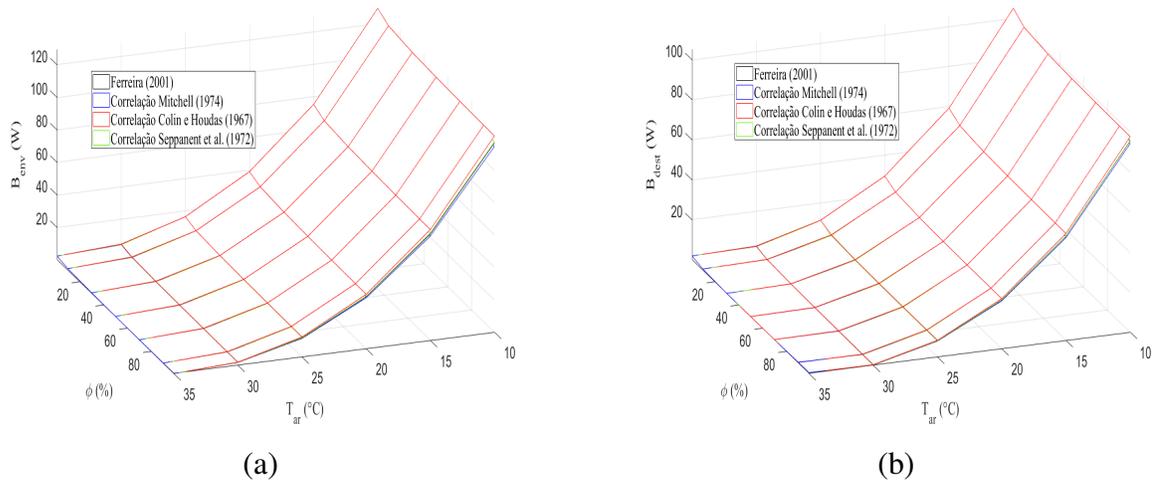


Figura 5.25: Comparação entre os indicadores de conforto térmico considerando-se coeficiente convectivo variável utilizando o método de Shukuya *et al.* (2010). (a) Taxa de exergia transferida ao ambiente. (b) Taxa de exergia destruída.

Analisando-se a Figura 5.25, podemos inferir então que o fenômeno de convecção tem pouca influência na taxa de exergia transferida ao ambiente (Figura 5.25 (a)) e na taxa de exergia destruída (Figura 5.25 (b)), visto que há pouca diferença entre as curvas das várias correlações utilizadas para o cálculo do coeficiente convectivo de transferência de calor. Por exemplo, a porcentagem dos fenômenos em relação à taxa de exergia transferida pro ambiente para o caso de temperatura do ar de 10 °C e umidade relativa de 90 % é mostrada na Figura 5.26.

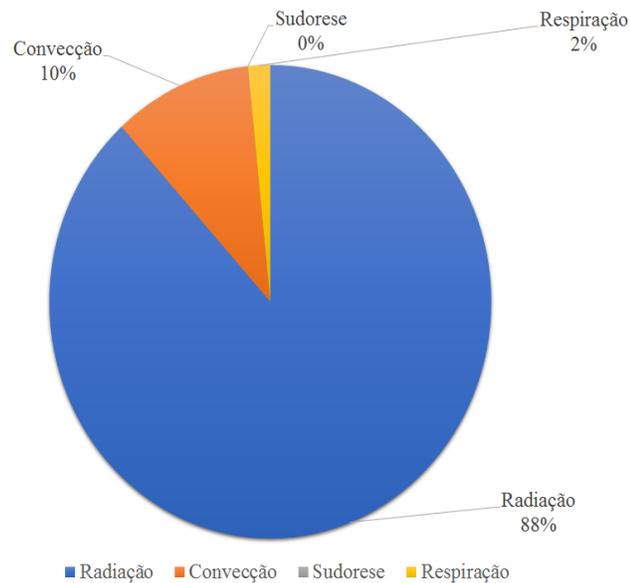


Figura 5.26: Comparação entre termos individuais da análise exérgica de Shukuya *et al.* (2010) em relação à taxa de exergia transferida ao ambiente.

Agora, a influência da velocidade do ar na análise exérgica é melhor analisada a partir da Figura 5.27 até a Figura 5.32. Nessa parte, as quatro correlações utilizadas para o cálculo do coeficiente convectivo de transferência de calor são utilizadas. São mostrados, para cada método de análise exérgica utilizado nesse estudo, a influência dessas correlações nas seguintes variáveis: taxa de exergia associada ao processo de convecção que ocorre na superfície da pele, taxa de exergia transferida ao ambiente e taxa de exergia destruída. A umidade relativa do ar em todos os cenários mostrados nessas figuras desta etapa é fixada em 50 %. A Figura 5.27 mostra a taxa de exergia do processo de convecção em função da velocidade do ar e da temperatura para as quatro correlações, utilizando o método de análise exérgica de Mady *et al.* (2014).

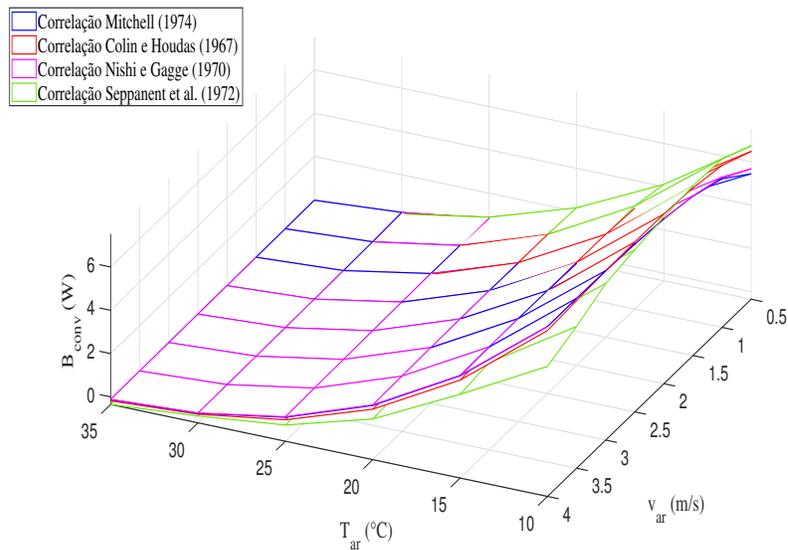


Figura 5.27: Exergia associada ao fenômeno de convecção utilizando o método de Mady *et al.* (2014) considerando-se a variação da velocidade no cálculo do coeficiente convectivo de transferência de calor

A partir da Figura 5.27 observa-se que para velocidades acima de 2,5 m/s há uma boa concordância entre os valores de taxa de exergia associada à convecção para três das correlações analisadas. Somente a correlação de Seppanent et al. (1972) apresenta valores com uma diferença significativa, sendo a maior diferença entre esses valores encontradas na temperatura de 10 °C e velocidade de 4 m/s, quando a correlação de Mitchell (1974) apresenta um valor de exergia de 7,5 W, enquanto que a correlação de Seppanent et al. (1972) apresenta 5,6 W. Entretanto, é importante ressaltar que as correlações de Colin e Houdas (1967), Nishi e Gagge (1970) e Seppanent et al. (1972) estão sendo utilizadas para esse intervalo de velocidade de forma extrapolada, pois o limite superior de velocidade no qual as correlações são válidas são de na realidade 2,0 m/s para a correlação de Nishi e Gagge (1970) e 1,5 m/s para as correlações de Colin e Houdas (1967) e Seppanent et al. (1972).

Para velocidades inferiores à 2,5 m/s o comportamento da curva na qual a correlação de Colin e Houdas (1967) é utilizada aproxima-se mais da curva na qual a correlação de Seppanent et al. (1972) é utilizada. A primeira correlação é empregada em casos nos quais o indivíduo encontra-se reclinado e a segunda em pé, ambas com o ar em movimento. Portanto, esses resultados mostram que a posição na qual o indivíduo encontra-se não é tão relevante. De forma geral, para o intervalo comum no qual a aplicação de todas as correlações é válida ( $0,5 \leq v_{ar} \leq 1,5 \text{ m/s}$ ), verifica-se que o aumento da velocidade do ar acarreta um aumento do termo de exergia da convecção, e isto

está de acordo com o que é apontado em estudos de Hardy *et al.* (1938b). Estudos da literatura, como por exemplo Hardy *et al.* (1938a), apontam que para um indivíduo realizando algum nível de atividade o termo de convecção em base energética sofre um aumento, portanto ao analisar a Figura 5.27 o fato de a correlação de Nishi e Gagge (1970), utilizada para indivíduos andando, acarretar valores semelhantes a outras correlações, como por exemplo a de Mitchell (1974) que é aplicável a indivíduos sentados pode causar uma certa desconfiança. Entretanto, nesse estudo o nível de atividade física do indivíduo simulado não foi alterado, portanto essa semelhança é justificável, visto que somente a correlação foi alterada, mas o indivíduo permanece em condições de repouso/basal (ou algo muito próximo dessa condição, apesar de estar em pé).

A Figura 5.28 (a) mostra a taxa de exergia transferida ao ambiente e a Figura 5.28 (b) mostra a taxa de exergia destruída, ambas em função da velocidade do ar e da temperatura para as quatro correlações, utilizando o método de análise exérgica de Mady *et al.* (2014).

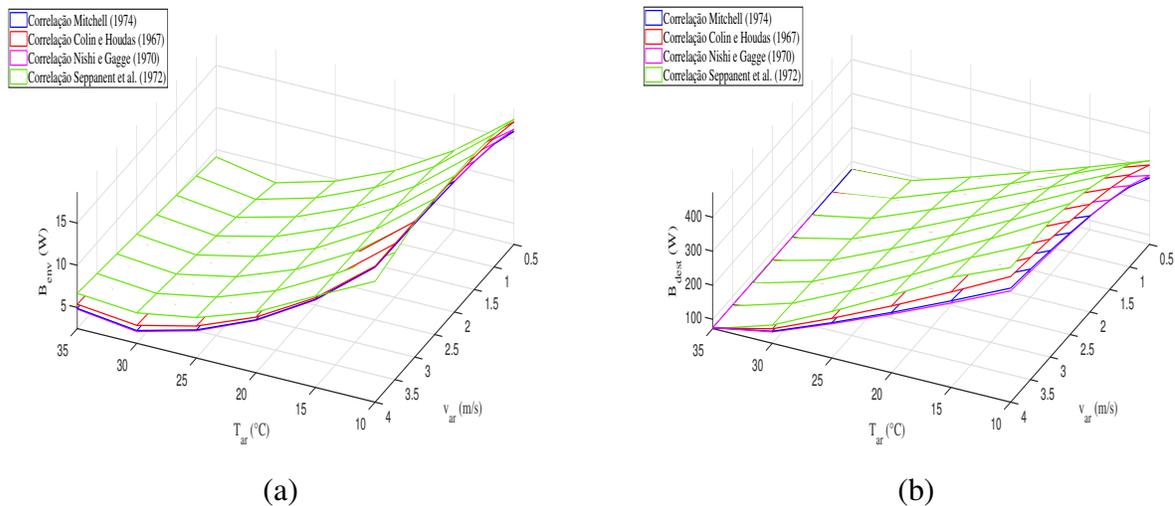


Figura 5.28: Comparação entre os indicadores de conforto térmico considerando-se a velocidade do ar variável utilizando o método de Mady *et al.* (2014). (a) Taxa de exergia transferida ao ambiente. (b) Taxa de exergia destruída.

As curvas de taxa de exergia transferida ao ambiente, Figura 5.28 (a), e taxa de exergia destruída, Figura 5.28 (b), apresentam comportamento similar para as quatro correlações utilizadas para o cálculo de coeficiente convectivo. Entre as correlações, a que mais difere é a curva da correlação de Seppanent et al. (1972), essa diferença é mais notável no intervalo de temperatura superior ao limite de aplicação da correlação ( $v_{ar} > 1,5m/s$ ). De forma geral, à medida que a velocidade do ar aumenta, a taxa de exergia transferida ao ambiente também aumenta, devido ao aumento principalmente do termo relacionado à convecção. Entretanto, esse aumento não é tão significativo,

por exemplo, para o caso de temperatura do ambiente de 10 °C e velocidade 0,5 m/s a exergia transferida ao ambiente quando utiliza-se a correlação de Nishi e Gagge (1970) é de 17,01 W, na velocidade igual a 4,0 m/s esse valor é de 18,61 W, ou seja, observa-se um aumento de apenas cerca de 9,4 %. Já para o mesmo exemplo, focando agora na taxa de exergia destruída, que é mostrada na Figura 5.28 (b), ocorre uma variação significativa da mesma, comparando-se o caso de velocidade 0,5 m/s e 4,0 m/s, de 306,17 W, ela torna-se 442,1 W, ou seja, um aumento de 44,4%. Essa variação significativa é causada principalmente devido a um aumento de 42,5% na exergia associada ao metabolismo. Na maior parte dos intervalos de temperatura e velocidade analisados a taxa de exergia destruída calculada pela correlação de Seppanent et al. (1972) foi maior, seguida pela calculada de acordo com as correlações de Colin e Houdas (1967), Mitchell (1974) e Nishi e Gagge (1970), respectivamente. Para essas duas últimas, foi verificado que para temperaturas inferiores a 1,6 m/s houve uma inversão na curva de taxa de exergia destruída, portanto a taxa de exergia destruída obtida utilizando a correlação de Nishi e Gagge (1970) tornou-se um pouco superior a obtida utilizando a correlação de Mitchell (1974) foi utilizada.

A Figura 5.29 mostra a taxa de exergia do processo de convecção em função da velocidade do ar e da temperatura para as quatro correlações, utilizando o método de análise exérgica de Prek e Butala (2010).

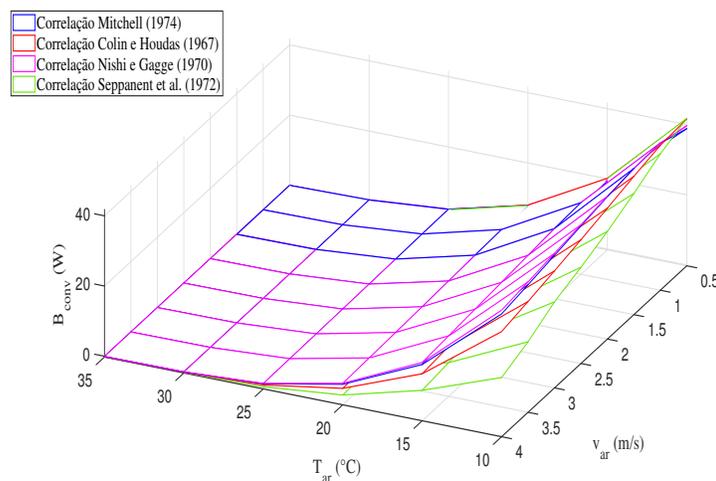


Figura 5.29: Exergia associada ao fenômeno de convecção utilizando o método de Prek e Butala (2010) considerando-se a variação da velocidade no cálculo do coeficiente convectivo de transferência de calor

Observando a Figura 5.29 percebe-se que de forma geral as correlações para o cálculo de coeficiente convectivo de Mitchell (1974) e Nishi e Gagge (1970) resultam em valores similares de taxa de exergia associada à convecção em todo intervalo analisado. Assim como no que foi

observado no método de Mady *et al.* (2014), a correlação de Seppanent *et al.* (1972) resultou em valores mais fora da tendência. Para as curvas das correlações de Mitchell (1974), Colin e Houdas (1967) e Nishi e Gagge (1970) é observado que na velocidade próxima a 1 m/s ocorre uma mudança de comportamento. Entre 0,5 e 1 m/s a taxa de exergia associada à convecção é maior quando calculada com a correlação de Colin e Houdas (1967), Nishi e Gagge (1970) e Mitchell (1974), respectivamente, com isso poderia ser inferido que a convecção seria maior para indivíduos reclinados, andando e por último, sentados. Entretanto, essa tendência muda para o restante dos valores de velocidade. Por exemplo, para velocidade igual a 1,5 m/s observa-se que as correlações de Mitchell (1974) e Nishi e Gagge (1970) estão associadas a valores de exergia de convecção aproximadamente igual a 41,43 W, enquanto que a correlação de Colin e Houdas (1967) apresenta agora valor inferior, de aproximadamente 39,18 W.

A Figura 5.30 (a) mostra a taxa de exergia transferida ao ambiente e a Figura 5.30 (b) mostra a taxa de exergia destruída, ambas em função da velocidade do ar e da temperatura para as quatro correlações, utilizando o método de análise exérgica de Prek e Butala (2010).

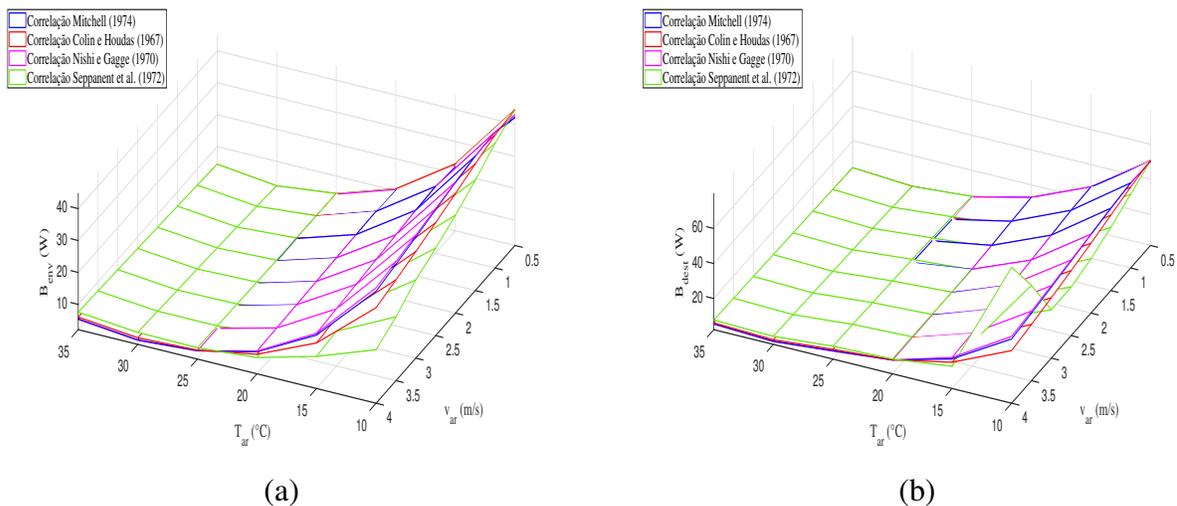


Figura 5.30: Comparação entre os indicadores de conforto térmico considerando-se a velocidade do ar variável utilizando o método de Prek e Butala (2010). (a) Taxa de exergia transferida ao ambiente. (b) Taxa de exergia destruída.

Ao contrário do que aconteceu quando aplicou-se o método de Mady *et al.* (2014), percebeu-se uma mudança de comportamento na exergia transferida ao ambiente mostrada na Figura 5.30 (a) não só com a velocidade, mas também com a temperatura. Para temperaturas acima de aproximadamente 25 °C a taxa de exergia transferida ao ambiente é maior para o caso no qual é utilizada a correlação de Seppanent *et al.* (1972), Colin e Houdas (1967), Mitchell (1974) e Nishi e Gagge

(1970), respectivamente. Já para temperaturas abaixo deste valor a tendência se inverte e a correlação de Nishi e Gagge (1970) agora está associada a uma maior exergia transferida ao ambiente enquanto que a de Seppanent et al. (1972) a uma menor exergia. Embora isso esteja perceptível na Figura 5.30 (a) para a velocidade de 4,0 m/s e como sabemos que nessa velocidade há uma certa incerteza, pois trata-se de uma extrapolação na utilização da correlação, o mesmo acontece em velocidades menores, como por exemplo 1,5 m/s. Assim como na Figura 5.29, uma mudança de comportamento ocorre para velocidade próxima a 1,0 m/s.

Observando a Figura 5.30 (b) percebe-se que a mesma mudança de comportamento observada na temperatura de 25 °C é também observada para a taxa de exergia destruída. Entretanto, na temperatura de 10 °C e velocidade do ar de 4,0 m/s observa-se um pico na curva da correlação de Seppanent et al. (1972). Esse pico pode ser desconsiderado para análise, pois esta correlação tem limite superior de velocidade de 1,5 m/s para sua aplicação. A mudança de comportamento em relação à velocidade que foi observada nas Figuras 5.30 (a) e 5.29 não foi observada na curva da taxa de exergia destruída. Os valores de exergia destruída obtido com as quatro correlações convergem para um mesmo valor na temperatura de 10 °C e velocidade de 0,5 m/s (aproximadamente 50,85 W).

A Figura 5.31 mostra a taxa de exergia do processo de convecção em função da velocidade do ar e da temperatura para as quatro correlações utilizadas na obtenção do coeficiente convectivo de transferência de calor, utilizando o método de análise exérgica de Shukuya *et al.* (2010).

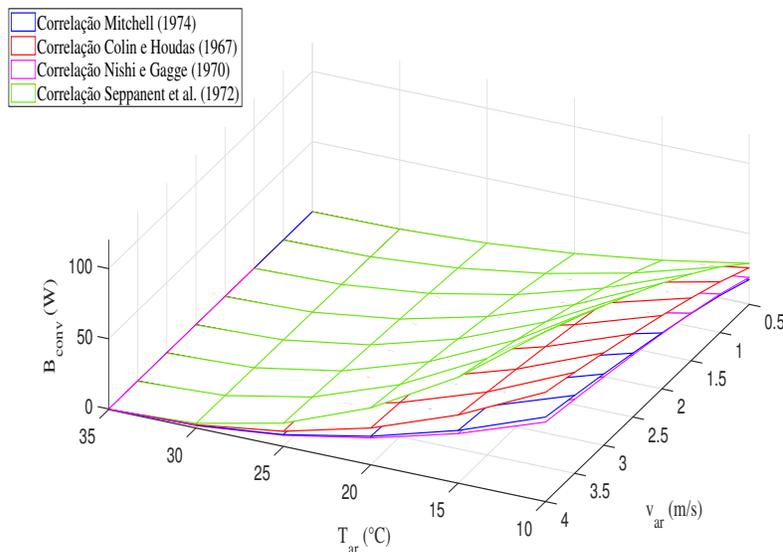


Figura 5.31: Exergia associada ao fenômeno de convecção utilizando o método de Shukuya *et al.* (2010) considerando-se a variação da velocidade no cálculo do coeficiente convectivo de transferência de calor

As curvas da taxa de exergia associada com o processo de convecção das quatro correlações apresentam um comportamento similar, como mostrado na Figura 5.31, à medida que a temperatura aumenta, o fenômeno da convecção aumenta e portanto a exergia associada a ele aumenta. O mesmo acontece também com o aumento da velocidade do ar. Embora em diversos pontos desse estudo tenha sido feitas críticas ao método de análise exérgica de Shukuya *et al.* (2010), em relação à aplicação dessas correlações para o cálculo do coeficiente convectivo de troca de calor, ele é o método que está mais em concordância com o que era esperado e exposto na literatura. Em todo o intervalo de velocidade analisado, a taxa de exergia da convecção calculada utilizando a correlação para o cálculo do coeficiente convectivo de Mitchell (1974) e de Nishi e Gagge (1970) são similares, por exemplo, para uma temperatura de 10 °C e velocidade de 0,5 m/s, observa-se que a exergia associada à convecção calculadas pelas correlações de Seppanent *et al.* (1972), Colin e Houdas (1967), Mitchell (1974) e Nishi e Gagge (1970) são de, respectivamente, 28,74 W, 25,59 W, 18,66 W e 17,15 W.

A Figura 5.32 (a) mostra a taxa de exergia transferida ao ambiente e a Figura 5.32 (b) mostra a taxa de exergia destruída, ambas em função da velocidade do ar e da temperatura para as quatro correlações, utilizando o método de análise exérgica de Shukuya *et al.* (2010).

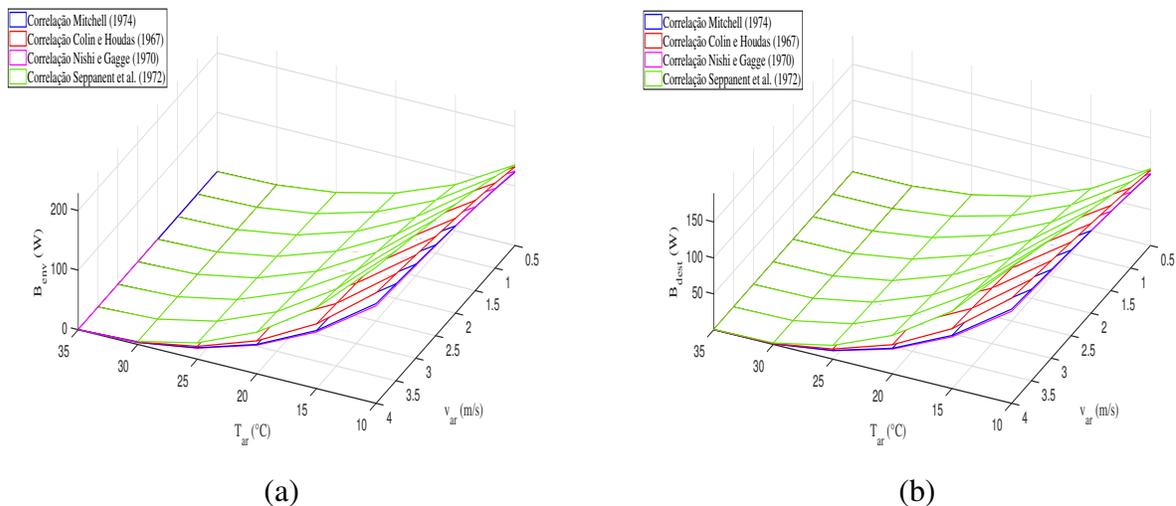


Figura 5.32: Comparação entre os indicadores de conforto térmico considerando-se a velocidade do ar variável utilizando o método de Shukuya *et al.* (2010). (a) Taxa de exergia transferida ao ambiente. (b) Taxa de exergia destruída.

A mesma tendência observada anteriormente na Figura 5.31 é observada também nas curvas de taxa de exergia transferida ao ambiente, mostradas na Figura 5.32 (a), este era o comportamento esperado. Já na Figura 5.32 (b), no cálculo da taxa de exergia destruída era esperado, assim como

foi citado no caso do método de Mady *et al.* (2014) na Figura 5.27 (b), que a taxa de exergia destruída diminuísse com o aumento da taxa de exergia transferida ao ambiente. Entretanto, a curva de correlação de maior exergia transferida para o ambiente (a correlação de Seppanent *et al.* (1972) é também a curva de maior taxa de exergia destruída. Nesse caso, é importante lembrar que, para o cálculo dessa exergia destruída mostrada na Figura 5.32 (b) , além de o termo de geração de água devido ao metabolismo ter sido desconsiderado, também foi necessário aplicar o módulo no valor de exergia destruída obtida a partir da subtração entre a exergia associada às reações metabólicas e a exergia transferida ao ambiente. Portanto, se torna complexo fazer essa associação entre exergia transferida ao ambiente e exergia destruída.

## 6 Conclusões

A análise exergética foi aplicada ao corpo humano para a obtenção de indicadores de conforto térmico. Por meio da análise desses indicadores, intervenções no ambiente podem ser propostas de modo a propiciar um ambiente no qual o indivíduo se encontre em condições de conforto térmico e isso é importante até para otimizar sua performance. Destacam-se alguns aspectos discutidos nesse estudo, como por exemplo:

- A atuação de mecanismos do sistema de controle do corpo humano exercem certa influência nos indicadores de conforto térmico. Por exemplo, a taxa de exergia destruída está diretamente relacionada a taxa de metabolismo. Notou-se que em ambientes de baixa temperatura a taxa de exergia destruída é alta, e isso é um reflexo, dentre outros fatores, da atuação do sistema de controle através da produção de calafrio, que gera um metabolismo adicional para compensar pela maior transferência de energia ao ambiente;
- Percebeu-se que para temperaturas acima da temperatura de neutralidade térmica, a curva de taxa de exergia destruída obtida utilizando o método de análise exergética de Mady *et al.* (2014) apresentou uma mudança de comportamento que não foi observada nos outros métodos. Isso ocorre porque no método de Mady *et al.* (2014) é feita uma distinção entre termos de alimentação (que recebem sinal positivo) e de saída (que recebem sinal negativo). Como para temperaturas acima da temperatura de neutralidade térmica é observado um aumento significativo do termo de saída relacionado ao mecanismo sudomotor do sistema de controle, observa-se que a taxa de exergia transferida ao ambiente tende a aumentar e que devido ao sinal negativo, isso deve provocar a diminuição da taxa de destruição de exergia. Entretanto, para ambientes úmidos o corpo apresenta dificuldade de transferir energia (e consequentemente, exergia) para o ambiente, devido à supressão do mecanismo sudomotor. Portanto, reforça-se que na análise exergética do corpo humano é importante que haja o estudo não somente da influência de parâmetros ambientais ou de parâmetros fisiológicos do corpo, ambos devem ser analisados conjuntamente.
- Foi notado que nos resultados obtidos inicialmente pelo método de Prek e Butala (2010), as curvas de taxa de exergia destruída e de taxa de exergia transferida ao ambiente apresentaram o mesmo comportamento, mesmo estes sendo fenômenos distintos. Isso aconteceu porque a diferença entre elas foi inicialmente somente o termo de exergia associada às irreversibilidades internas, que foi aproximada por um termo de exergia associada a transferência de

energia devido ao “calor” gerado pelas reações metabólicas. Portanto, esse termo foi responsável somente por deslocar a curva de exergia transferida ao ambiente no eixo das ordenadas.

- A aproximação feita para a exergia associada às irreversibilidades internas mencionada logo acima foi comparada com a proposta original de Prek e Butala (2010) de que os termos de irreversibilidades internas são subdivididos em dois termos: um relacionado à condução de calor no interior do corpo e outro a transferência de energia devido à circulação sanguínea. Para um modelo no qual as camadas que compoem o corpo humano são homogêneas, esses termos foram modelados com sucesso. Porém, para o modelo mais robusto de Ferreira e Yanagihara (2009), a grande heterogeneidade de tecidos nas camadas dificulta essa modelagem, portanto o termo que foi aproximado por um ajuste de curva ainda trata-se de uma aproximação, que leva em conta o modelo fenomenológico do interior do corpo humano, mas que ainda pode ser aprimorada em trabalhos futuros.
- O método de Prek e Butala (2010) apresenta alguns termos que são passíveis de discussão devido à incompatibilidades de unidades causadas pelo equacionamento que muito provavelmente não está descrevendo os fenômenos que ocorrem no corpo humano corretamente. Porém, com algumas poucas modificações lógicas foi possível recalculá-lo e comprovou-se que ele apresentou boa concordância com um dos outros métodos da literatura, o método de análise exérgica de Mady *et al.* (2014).
- Já o método desenvolvido por Shukuya *et al.* (2010) apresentou algum fator que afeta diretamente sua precisão em todas as análises apresentadas nesse estudo, pois a ordem de grandeza do indicador calculado difere de todos os outros métodos utilizados. Entretanto ele vem sendo amplamente utilizado em pesquisas desenvolvidas na vertente de estudo do conforto térmico. Mesmo com modificações lógicas, como a desconsideração dos termos associados à geração de água devido ao metabolismo, os resultados obtidos ainda são duvidosos, visto que houveram casos para os quais a taxa de exergia destruída foi negativa, o que viola a Segunda Lei da Termodinâmica, visto que a geração de entropia (e conseqüentemente a destruição de exergia) é sempre positiva para qualquer processo.
- Além disso, a correlação de que o ponto de mínima exergia destruída coincide com o ponto de conforto térmico que comumente é utilizada na literatura não é suficiente, pois há cenários nos quais embora a exergia destruída seja mínima, o corpo não está em condição de conforto térmico, como por exemplo é mostrado na curva de taxa de exergia destruída obtida pelo método de análise exérgica de Mady *et al.* (2014) para temperatura e umidade relativa elevadas.

- Observando-se as curvas de PMV *versus* taxa de exergia destruída foi possível notar que enquanto para o método de análise exergética de Mady *et al.* (2014) o ponto de mínima exergia destruída coincide com valores de PMV próximos a zero (neutralidade térmica, que é condição de conforto térmico no estudo) somente para casos de umidade relativa do ar maiores do que 50 %, o método de Prek e Butala (2010) resultou numa tendência inversa (menores umidade relativa, ponto de mínimo  $B_d$  próximos a PMV nulo).
- Para o método de Mady *et al.* (2014), na faixa de PMV negativo a taxa de exergia destruída é quase independente da umidade relativa do ar.
- A curva de PMV *versus* taxa de exergia destruída e taxa de exergia transferida ao ambiente apresentaram comportamento idêntico. Para umidade relativa do ar acima de 50 % verifica-se que em valores próximos a PMV=0 a taxa de exergia destruída e transferida ao ambiente são ambas mínimas.
- O método de Shukuya *et al.* (2010) resultou em curvas de PMV *versus* taxa de exergia destruída e taxa de exergia transferida ao ambiente que são de forma geral mais independentes da umidade relativa do ar. O valor de mínima taxa de exergia destruída encontrado neste estudo está localizado na faixa de PMV correspondente a sensação térmica de "levemente quente". Isto discorda do que foi mostrado em Simone *et al.* (2011), que faz a associação de mínima taxa de exergia destruída com sensação térmica de "levemente frio".
- Analisando-se a curva de PPD *versus* taxa de exergia destruída e taxa de exergia transferida ao ambiente para todos os métodos aplicados é possível notar que para cada curva de umidade relativa, há somente um único valor de exergia destruída e de exergia transferida ao ambiente que está associado a uma mínima percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD=5 %).
- Após a implementação das correlações utilizadas para o cálculo do coeficiente convectivo de transferência de calor foi observado pouca influência da variação do mesmo na taxa de exergia associada ao processo de convecção, taxa de exergia transferida ao ambiente e taxa de exergia destruídas para altas temperaturas, visto que nessas condições o fenômeno de convecção não é tão relevante comparado com as outras formas de transferência de energia.
- Para condições de velocidade do ar nula, foi observado, para todos os métodos de análise exergética, que maiores valores de taxa de exergia associada à convecção são obtidos para quando são utilizadas as correlações de cálculo de coeficiente convectivo de: Colin e Houdas (1967), Seppanent *et al.* (1972), valores constantes utilizados por Ferreira (2001) e Mitchell (1972), respectivamente.

- De forma geral, foi verificado para todos os métodos de análise exergética utilizados que a correlação que acarretava maior taxa de exergia associada ao processo de convecção também acarretava uma maior taxa de exergia transferida ao ambiente. Entretanto, o mesmo não é válido para a taxa de exergia destruída.
- O termo de exergia associado ao processo de convecção é menos significativo para o cálculo da taxa de exergia transferida ao ambiente e exergia destruída quando o método de Shukuya *et al.* (2010) foi aplicado.
- Variando-se a velocidade do ar, foi verificado um aumento da taxa de exergia associada ao processo de convecção. Isso está em conformidade com o que estudos bem consolidados, como por exemplo, Hardy *et al.* (1938b) apontam.
- Para casos de velocidade do ar variável utilizando-se o método de análise exergética de Mady *et al.* (2014) foi observado, para todas as correlações de cálculo do coeficiente convectivo, que a influência da velocidade do ar é mais relevante na taxa de exergia destruída do que na taxa de exergia transferida ao ambiente. Entretanto, a variação mais significativa da taxa de exergia destruída de acordo com a variação de velocidade está associada mais a um aumento na exergia relacionada às reações metabólicas do que a exergia associada com o processo de convecção. Diretamente a velocidade do ar não influencia a exergia do metabolismo, entretanto com esse estudo observou-se que ela afeta indiretamente essa variável.
- De forma geral, foi observado para todos os métodos de análise exergética utilizados que a taxa de exergia associada ao processo de convecção calculadas utilizando-se as correções de cálculo de coeficiente convectivo de Mitchell (1974) e de Nishi e Gagge (1970) são similares. Embora elas sejam indicadas para situações distintas, a primeira para indivíduos sentados e a segunda para indivíduos andando, nesse estudo o nível de atividade do indivíduo não foi alterado, portanto os valores similares são justificáveis.
- Utilizando-se o método de Prek e Butala (2010) notou-se que uma mudança de comportamento na curva da exergia transferida ao ambiente não só com a velocidade, mas também com a temperatura (em temperatura de aproximadamente 25 °C).
- Nesta etapa da análise da influência da velocidade e utilização de correlações para o cálculo de coeficiente convectivo notou-se que o método de análise exergética de Shukuya *et al.* (2010) foi o que apresentou comportamentos mais similares entre as diferentes correlações utilizadas no caso da taxa de exergia associada à convecção obtida. Este método também está de acordo com resultados esperados indicados na literatura para todas as correlações

utilizadas: à medida que a temperatura do ar diminui e velocidade do ar do ambiente aumenta, aumenta-se também o processo de convecção e conseqüentemente a exergia associada a ele.

- Entretanto, uma associação entre taxa de exergia associada à convecção, taxa de exergia transferida ao ambiente e taxa de exergia destruída não foi feita para o método de análise de Shukuya *et al.* (2010) pois tendo em vista que foi necessário aplicar-se valores absolutos às taxas de exergia destruída calculadas para não haver violação da Segunda Lei da Termodinâmica nos resultados aqui apresentados tornou-se complexo fazer a associação entre essas grandezas.

## Referências

ALBUQUERQUE-NETO, C. **Um modelo do transporte de monóxido de carbono no sistema respiratório do corpo humano**. 2005. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, R. e ENGINEERS, A.C. **2005 ASHRAE Handbook: Fundamentals**. ASHRAE Handbook Fundamentals Systems-International Metric System. ASHRAE, 2005.

AOKI, I. Entropy flow and entropy production in the human body in basal conditions. **Journal of theoretical biology**, v. 141, n. 1, 11–21, 1989.

AOKI, I. Effects of exercise and chills on entropy production in human body. **Journal of theoretical biology**, v. 145, n. 3, 421 – 428, August 1990.

AOKI, I. Entropy principle for human development, growth and aging. **Journal of Theoretical Biology**, v. 150, n. 2, 215 – 223, 1991.

BATATO, M.; BOREL, L.; DERIAZ, O. e JEQUIER, E. Analyse exergetique théorique et expérimentale du corps humain. **Entropie: énergétique et dynamique des systèmes complexes : la revue internationale des sciences et techniques enénergétique, génie chimique, génie biologique**, v. 153/154, 1, 1990.

BEJAN, A. **Advanced engineering thermodynamics**. A Wiley-Interscience publication. Wiley, 1988. ISBN 9780471830436.

DE DEAR, R.J.; ARENS, E.; HUI, Z. e OGURO, M. Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments. **International Journal of Biometeorology**, v. 40, n. 3, 141–156, May 1997.

DJONGYANG, N.; TCHINDA, R. e NJOMO, D. Thermal comfort: A review paper. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, 2626 – 2640, 2010.

DOVJAK, M.; SHUKUYA, M. e KRAINER, A. Connective thinking on building envelope - human body exergy analysis. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 90, 1015 – 1025, 2015.

DU BOIS, D. e DU BOIS, E. Clinical calorimetry: Tenth paper a formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. **Archives of Internal Medicine**, v. 17, n. 6-2, 863–871, 1916.

DUBOIS, E.F. Heat loss from the human body: Harvey lecture, december 15, 1938. Bulletin of the New York Academy of Medicine, 15(3), 143-173, March 1939.

DUBOIS, E.F.; EBAUGH, F. G., J.; HARDY, J.D.; SODERSTROM, G.F. e STEVENS, E.I. Basal heat production and elimination of thirteen normal women at temperatures from 22°C. to 35°C. **Journal of Nutrition**, v. 48, 257–293, 1952.

FANGER, P. **Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering**. Danish Technical Press, 1970. ISBN 9788757103410.

FANGER, P. **Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering**. R.E. Krieger Publishing Company, 1982. ISBN 9780898744460.

FANGER, P.O. Thermal comfort : analysis and applications in environmental engineering. 1972.

FERREIRA, M.S. **Um modelo do sistema térmico do corpo humano**. 2001. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

FERREIRA, M. e YANAGIHARA, J. A transient three-dimensional heat transfer model of the human body. v. 36, 718–724, 08 2009.

GAGGE, A.; FOBELETS, A. e BERGLUND, L. **A standard predictive index of human response**

**to the thermal environment**, v. 92:2B. Jan 1986.

GAGGE, A.; STOLWIJK, J. e NISHI, Y. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. v. 77, 01 1971.

GUYTON, A. e HALL, J.E. **Tratado de fisiologia Medica**. Elsevier, 2006. ISBN 9788535216417.

HARDY, J.D. e DUBOIS, E.F. Basal metabolism, radiation, convection and vaporization at temperatures of 22 to 35°C. **Journal of Nutrition**, v. 15, 477–497, June 3 1938a.

HARDY, J.D. e DUBOIS, E.F. The technic of measuring radiation and convection. **Journal of Nutrition**, v. 15, 461–475, May 30 1938b.

HARDY, J.D. e DUBOIS, E.F. Differences between men and women in their response to heat and cold. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 26, n. 6, 389–398, 1940.

HARDY, J.D.; MILHORAT, A.T. e DUBOIS, E.F. The effect of exercise and chills on heat loss from the nude body. **Journal of Nutrition**, v. 16, 477–92, 1938a.

HARDY, J.D.; MILHORAT, A.T. e DUBOIS, E.F. The effect of forced air currents and clothing on radiation and convection. **Journal of Nutrition**, v. 15, 583–505, 1938b.

HARDY, J.D.; MILHORAT, A.T.; DUBOIS, E.F. e SODERSTROM, G.F. Basal metabolism and heat loss of young women at temperatures from 22 °c. to 35 °c. clinical calorimetry no. 54. **Journal of Nutrition**, v. 21, 383–404, 1941.

ISO7730. **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**. International Standard, Geneva, 2005.

KOTAS, T. **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**, v. 59. 01 1985.

MADY, C.; BATISTA HENRIQUES, I. e DE OLIVEIRA JUNIOR, S. Exergy analysis of human body and lifespan: a first approach. 11 2013.

MADY, C. e DE OLIVEIRA JUNIOR, S. Human body exergy metabolism. v. 16, 73, 06 2013.

MADY, Carlos Eduardo Keutenedjian. **Desenvolvimento termodinâmico do corpo humano e seus subsistemas: aplicações à medicina, desempenho esportivo e conforto térmico.** 2014. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo.

MADY, C.E.K.; FERREIRA, M.S.; YANAGIHARA, J.I. e DE OLIVEIRA, S. Human body exergy analysis and the assessment of thermal comfort conditions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 77, 577–584, 2014.

MARTINEZ GARCIA, M.; DE OLIVEIRA JUNIOR, S. e MADY, C. Human body exergy analysis as a function of body fat and muscle percentage. applications to thermal comfort conditions. 11 2016.

MOUNTCASTLE, V. **Medical Physiology**. N. v. 1 in Medical Physiology. C. V. Mosby Company, 1980.

PENNES, H.H. Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm. **Journal of Applied Physiology**, v. 1, n. 2, 93–122, 1948.

PETELA, R. Exergy of heat radiation. v. 86, 187, 01 1964.

PREK, M. Thermodynamic analysis of human heat and mass transfer and their impact on thermal comfort. v. 48, 731–739, 02 2005.

PREK, M. Thermodynamical analysis of human thermal comfort. v. 31, 732–743, 04 2006.

PREK, M. e BUTALA, V. Principles of exergy analysis of human heat and mass exchange with the indoor environment. v. 53, 5806–5814, 12 2010.

PREK, M. e BUTALA, V. Comparison between fanger's thermal comfort model and human exergy loss. **Energy**, v. 138, n. Supplement C, 228 – 237, 2017.

PRIGOGINE, I. e WIAME, J.M. Biologie et thermodynamique des phénomènes irréversibles. **Experientia**, v. 2, n. 11, 451–453, Nov 1946.

RUPP, R.F.; VÁSQUEZ, N.G. e LAMBERTS, R. A review of human thermal comfort in the built environment. **Energy and Buildings**, v. 105, 178 – 205, 2015.

SCHRÖDINGER, E. **What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell**. Cambridge University Press, 1944.

SHUKUYA, M.; SAITO, M.; ISAWA, K.; IWAMATSU, T. e ASADA, H. Human-body exergy balance and thermal comfort. **Working Report of IEA ECBS Annex**, v. 49, 2010.

SIMONE, A.; KOLARIK, J.; IWAMATSU, T.; ASADA, H.; DOVJAK, M.; SCHELLEN, L.; SHUKUYA, M. e OLESEN, B.W. A relation between calculated human body exergy consumption rate and subjectively assessed thermal sensation. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 1, 1 – 9, 2011.

SZARGUT, J.; MORRIS, D. e STEWARD, F. **Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes**. Hemisphere Publishing Corporation, 1988. ISBN 9783540188643.

TALEGHANI, M.; TENPIERIK, M.; KURVERS, S. e VAN DEN DOBBELSTEEN, A. A review into thermal comfort in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, 201 – 215, 2013.

TOKUNAGA, K. e SHUKUYA, M. Human-body exergy balance calculation under un-steady state conditions. **Building and Environment**, v. 46, n. 11, 2220 – 2229, 2011.

TRIBESS, A. Conforto térmico, 2012. Notas de Aula PME 5405.

WU, X.; ZHAO, J.; OLESEN, B. e FANG, L. A novel human body exergy consumption formula to determine indoor thermal conditions for optimal human performance in office buildings. v. 56,

48 – 55, 01 2013.

## ANEXO A – Dedução do termo condução de calor adaptado para o modelo desenvolvido por Prek e Butala (2010)

$$Q = -kA \frac{dT}{dr} \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{Q}{A} = Q'' = -k \frac{dT}{dr} \quad (\text{A.2})$$

$$Q'' \int dr = -k \int dT \quad (\text{A.3})$$

$$Q''(r_e - r_i) = -k(T_e - T_i) \quad (\text{A.4})$$

$$Q'' = \frac{k}{(r_e - r_i)}(T_i - T_e) \quad (\text{A.5})$$

$$Q'' = k''(T_i - T_e) \quad (\text{A.6})$$

Portanto, percebe-se que no processo de integração mostrado na Equação A.3 a área transversal ao fluxo de condução não foi considerada. Como no modelo representativo do corpo humano a geometria é cilíndrica, isso torna-se uma aproximação. Posteriormente foi considerado que a área transversal seria calculada como  $A = (2\pi l r_j)$ , na qual,  $l$  é a altura do cilindro representativo do corpo humano e  $r_j$  o raio da camada na qual ocorre a transferência de calor.

## ANEXO B – Dedução do termo condução de calor para o modelo desenvolvido neste estudo

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dr} \quad (\text{B.1})$$

$$\dot{Q} \int_{r_i}^{r_e} \frac{1}{k} \frac{dr}{r} = -(2\pi l) \int_{T_i}^{T_e} dT \quad (\text{B.2})$$

$$\dot{Q} = \frac{-2\pi l(T_e - T_i)}{\frac{1}{k_{intervalo}} \ln \frac{r_e}{r_i}} \quad (\text{B.3})$$

$$\dot{Q} = \frac{2\pi l(T_i - T_e)}{\frac{1}{k_{intervalo}} \ln \frac{r_e}{r_i}} \quad (\text{B.4})$$

Portanto, percebe-se que no processo de integração mostrado na Equação B.2 a geometria cilíndrica da área transversal ao fluxo de condução foi considerada. É muito importante verificar que dependendo do intervalo de raio analisado, a condutividade térmica do tecido será diferente.

**APÊNDICE A – Distribuição temporal de temperaturas do corpo humano obtidas com o modelo de (FERREIRA E YANAGIHARA, 2009)**

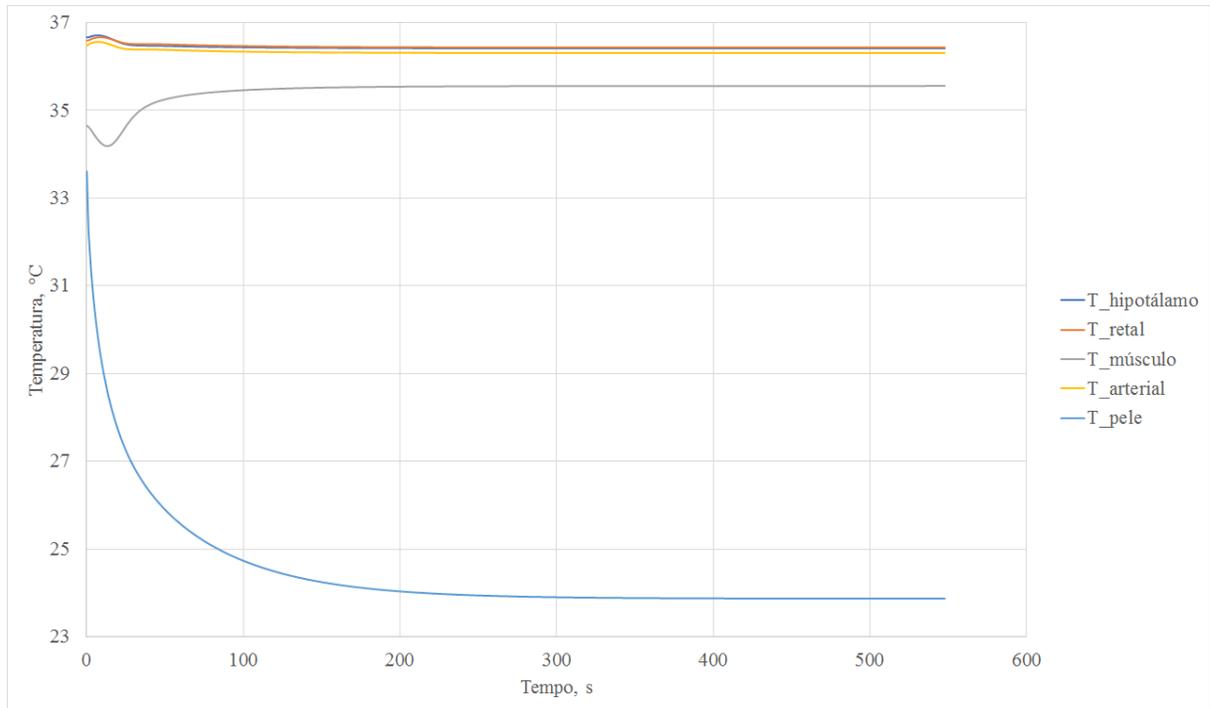


Figura A.1: Distribuição temporal de temperatura para o caso de  $T_{ar} = 10 \text{ °C}$  e  $\phi = 50 \%$ .

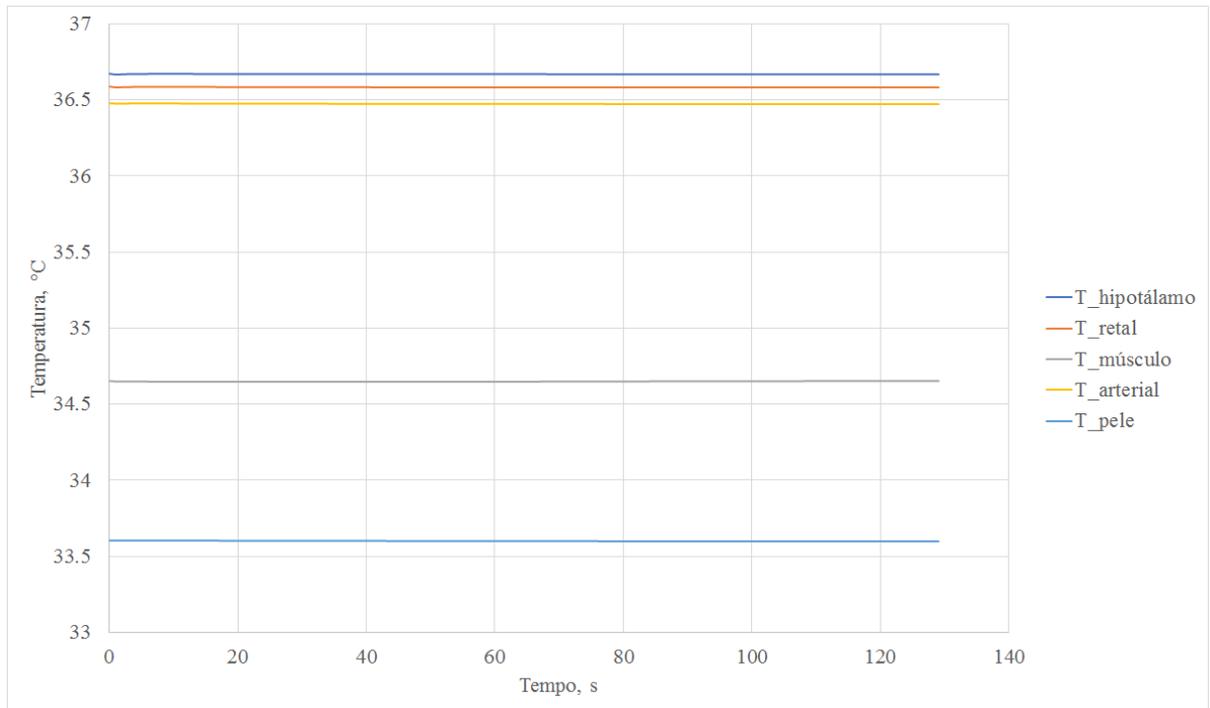


Figura A.2: Distribuição temporal de temperatura para o caso de  $T_{ar} = 30\text{ °C}$  e  $\phi = 50\%$ .

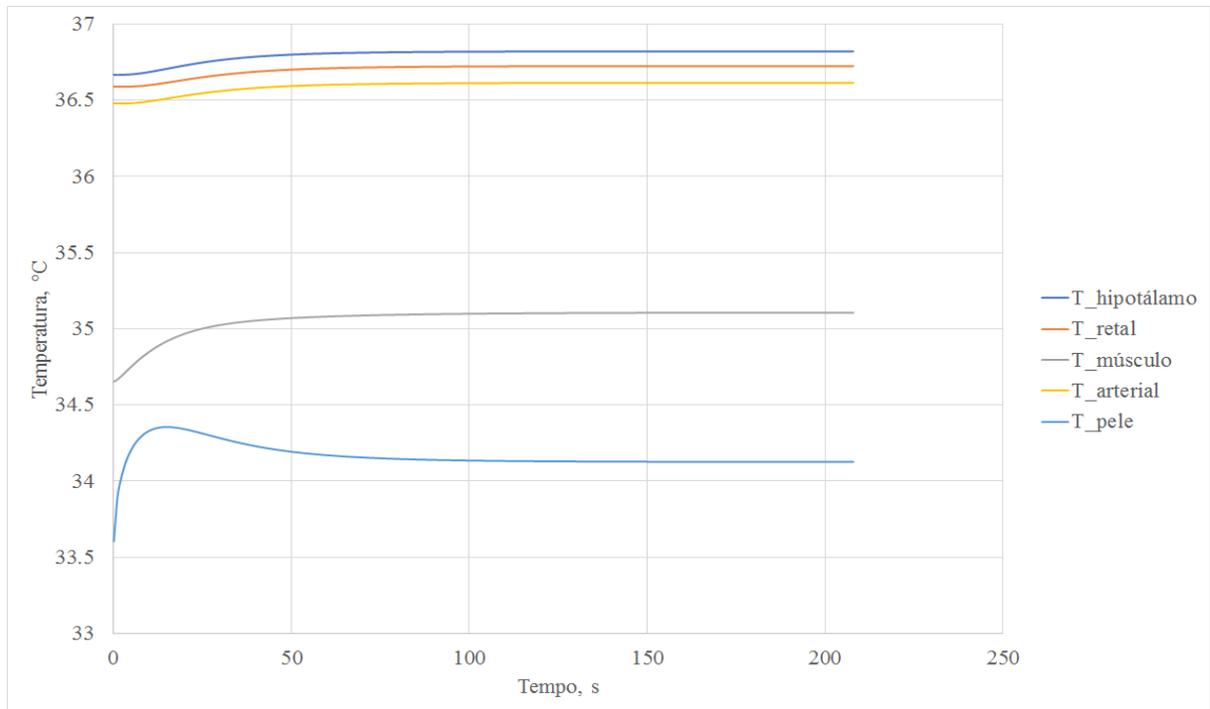


Figura A.3: Distribuição temporal de temperatura para o caso de  $T_{ar} = 35\text{ °C}$  e  $\phi = 50\%$ .

## APÊNDICE B – Taxas de exergia obtidas para cada fenômeno de transferência de energia e massa

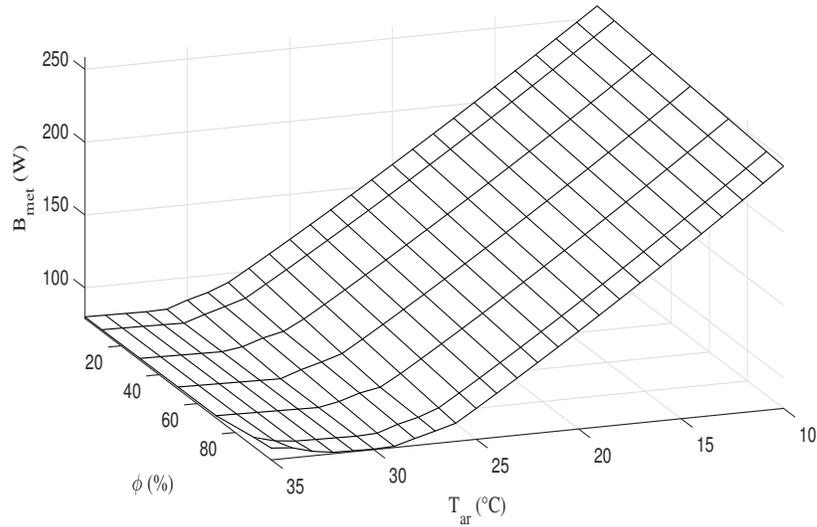


Figura B.1: Taxa de exergia associada ao metabolismo para o método de (MADY *et al.*, 2014).

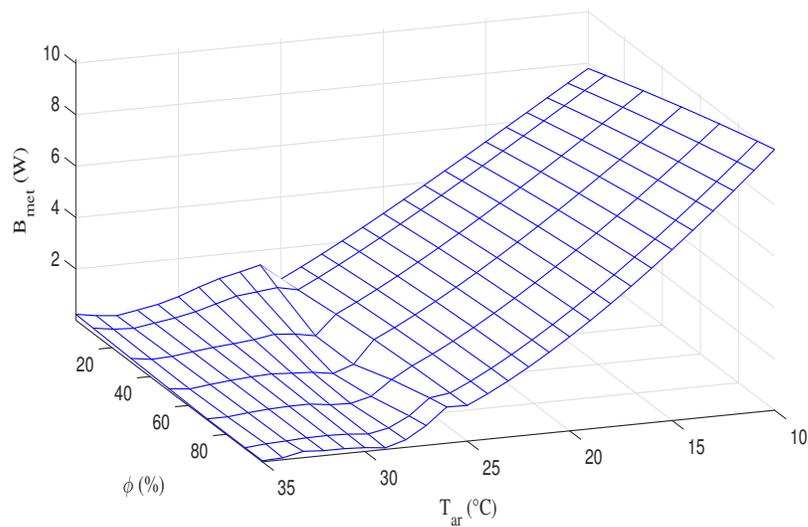


Figura B.2: Taxa de exergia associada ao metabolismo para o método de (PREK E BUTALA, 2010).

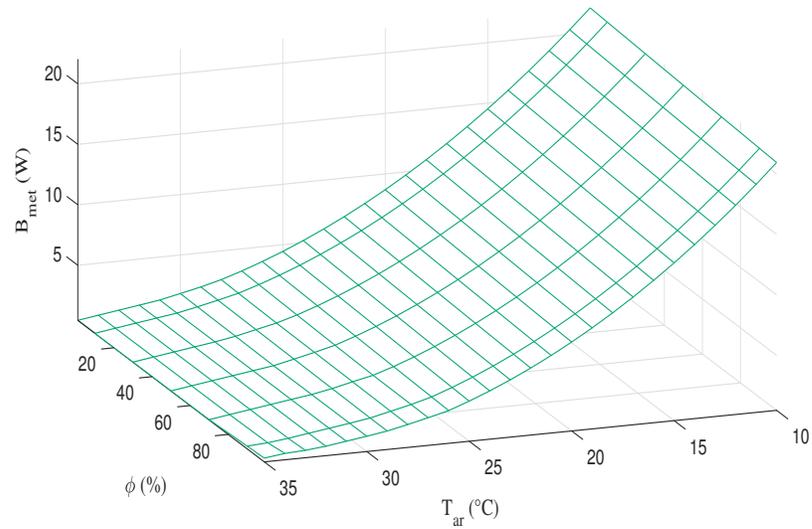


Figura B.3: Taxa de exergia associada ao metabolismo para o método de (SHUKUYA *et al.*, 2010).

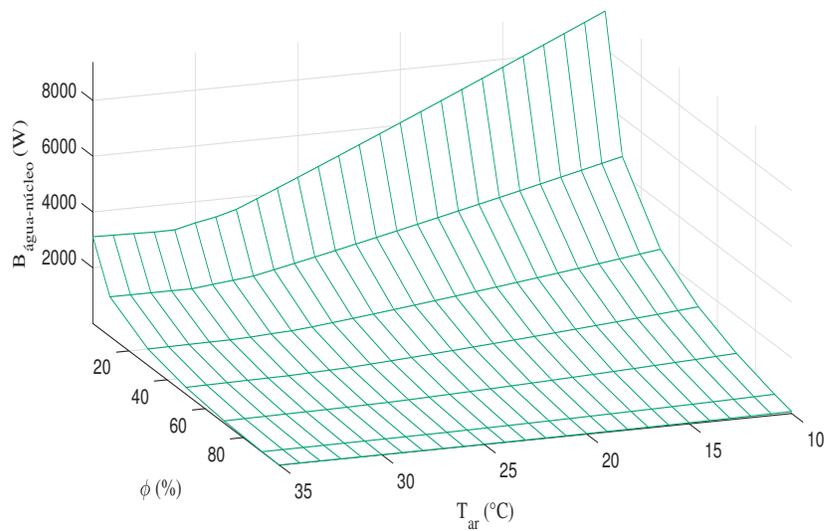


Figura B.4: Taxa de exergia associada a geração de água no núcleo devido ao metabolismo para o método de (SHUKUYA *et al.*, 2010).

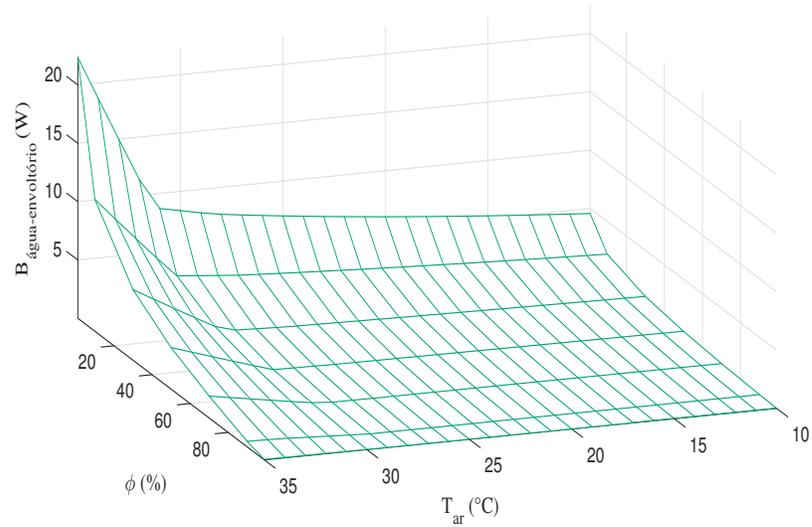


Figura B.5: Taxa de exergia associada a geração de água no envoltório devido ao metabolismo para o método de (SHUKUYA *et al.*, 2010).

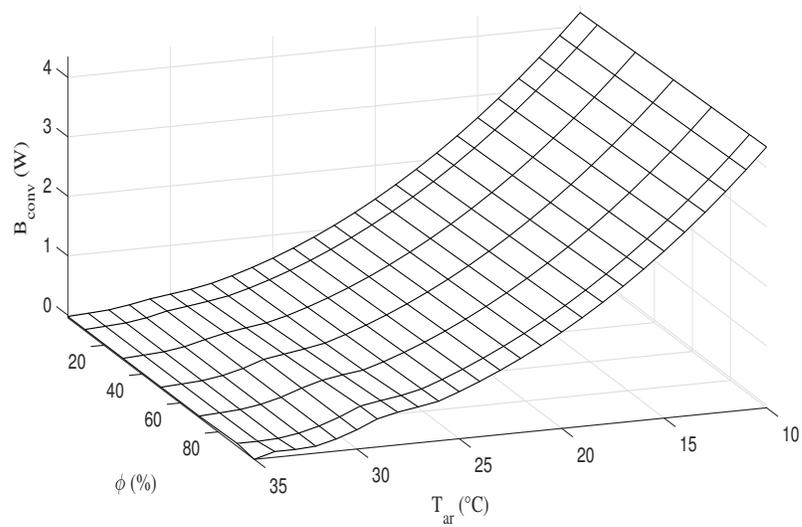


Figura B.6: Taxa de exergia associada a convecção para o método de (MADY *et al.*, 2014).

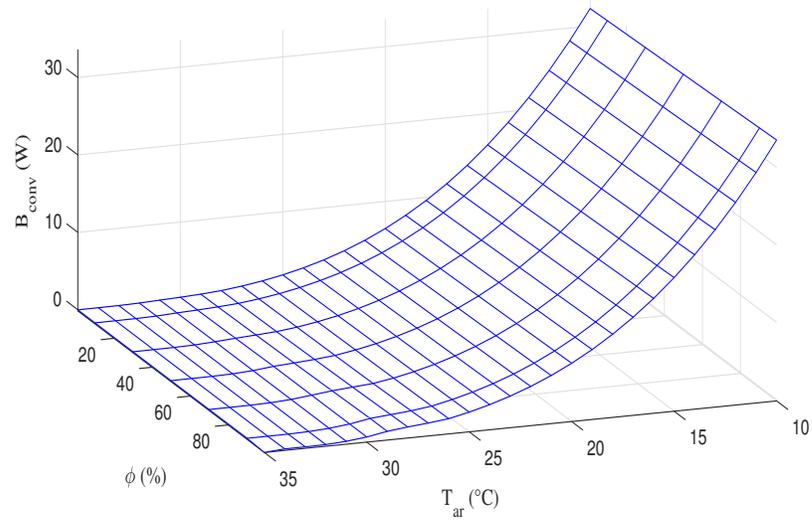


Figura B.7: Taxa de exergia associada a convecção para o método de (PREK E BUTALA, 2010).

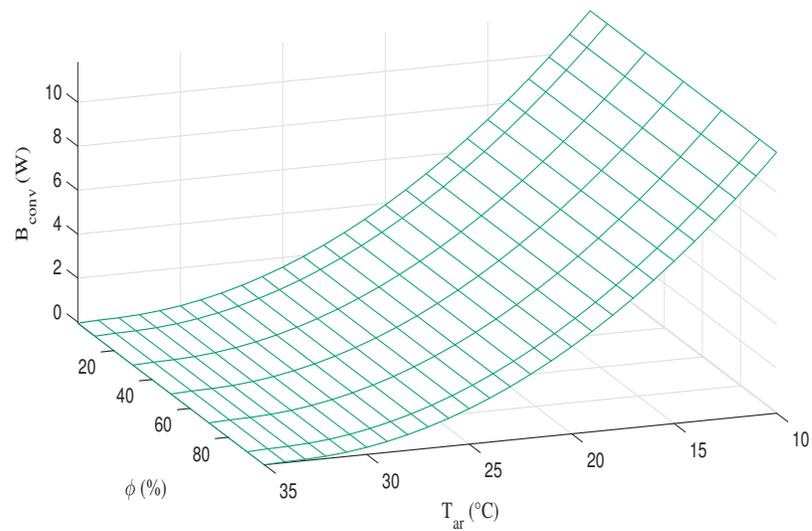


Figura B.8: Taxa de exergia associada a convecção para o método de (SHUKUYA *et al.*, 2010).

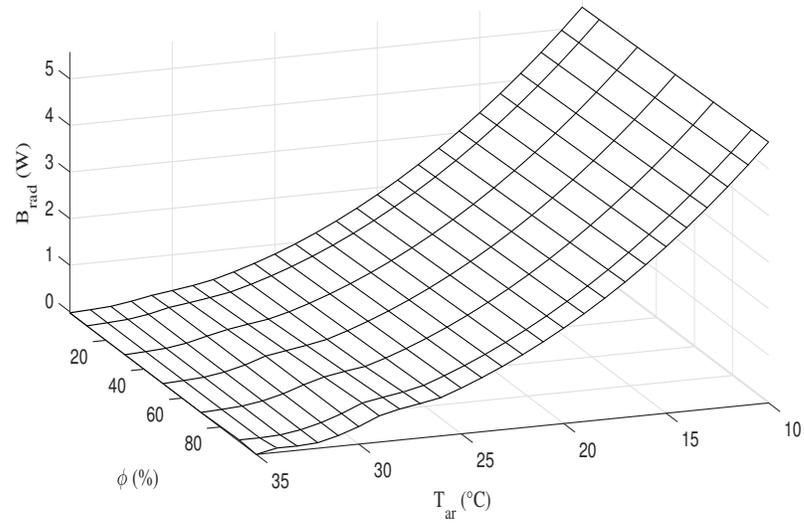


Figura B.9: Taxa de exergia associada a radiação para o método de (MADY *et al.*, 2014).

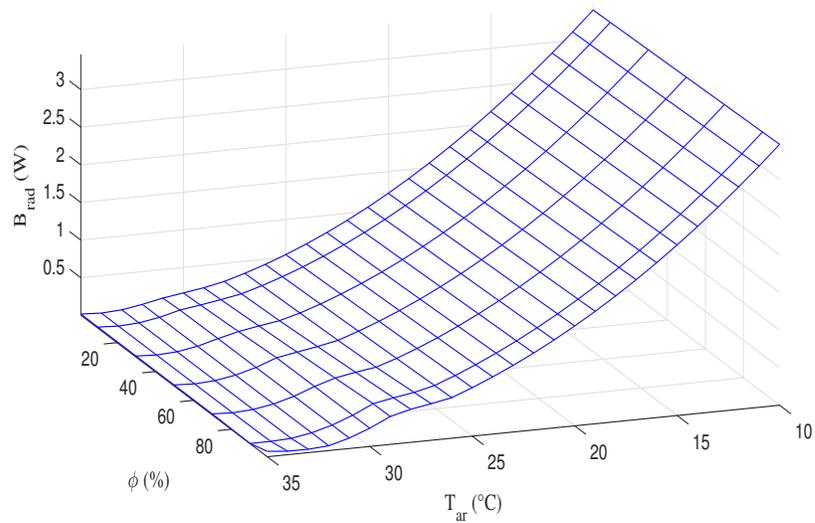


Figura B.10: Taxa de exergia associada a radiação para o método de (PREK E BUTALA, 2010).

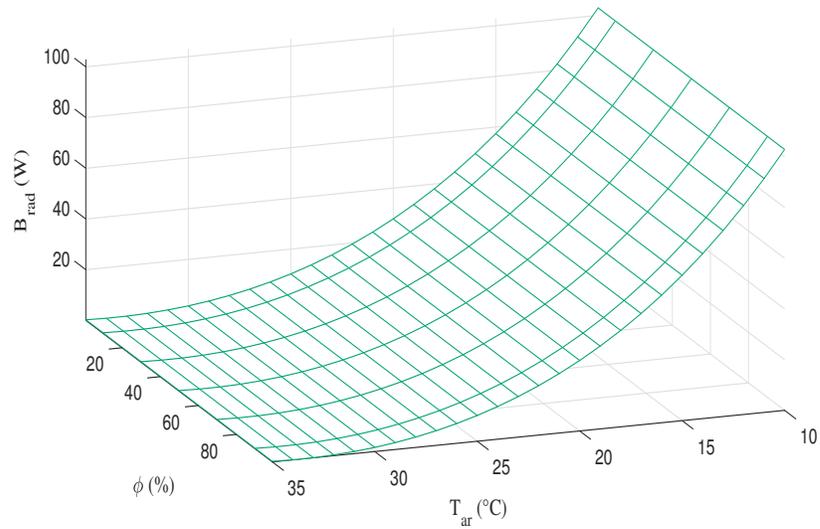


Figura B.11: Taxa de exergia associada a radiação para o método de (SHUKUYA *et al.*, 2010).

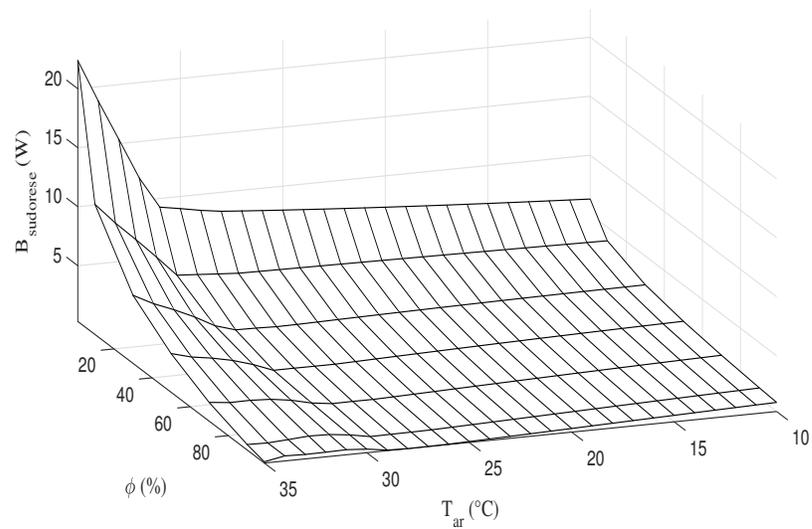


Figura B.12: Taxa de exergia associada ao processo de sudorese para o método de (MADY *et al.*, 2014).

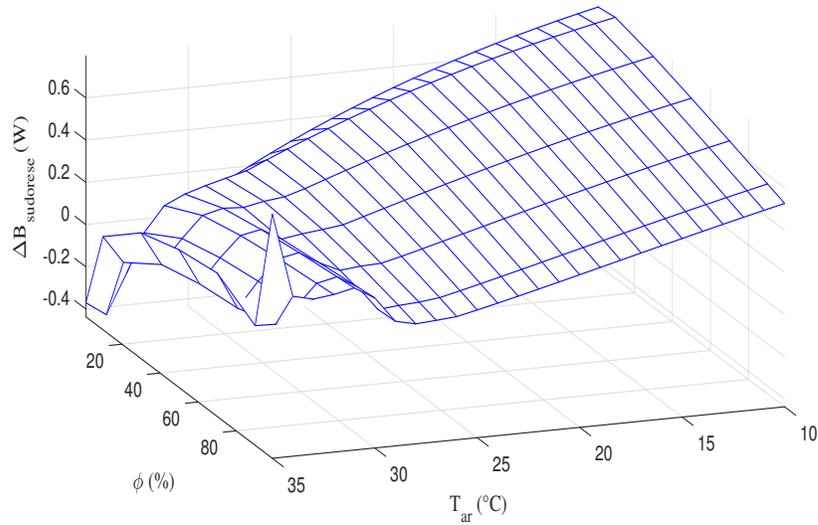


Figura B.13: Taxa de exergia associada ao processo de sudorese para o método de (PREK E BUTALA, 2010).

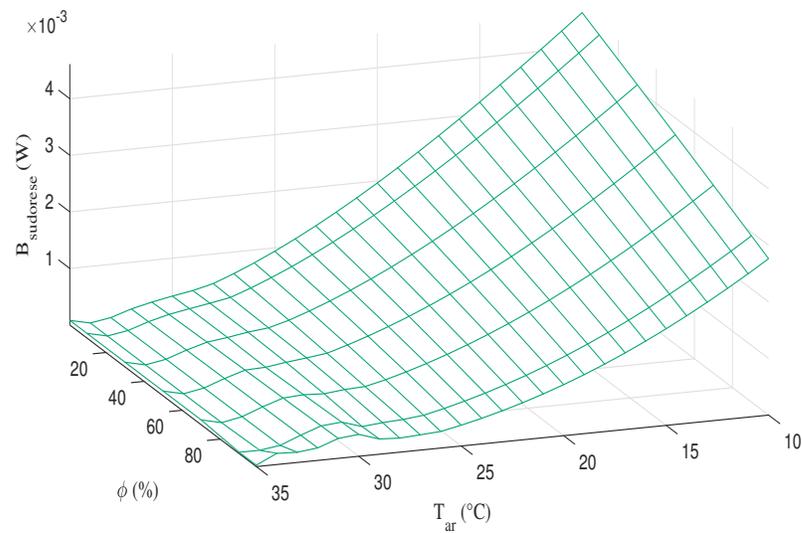


Figura B.14: Taxa de exergia associada ao processo de sudorese para o método de (SHUKUYA *et al.*, 2010).

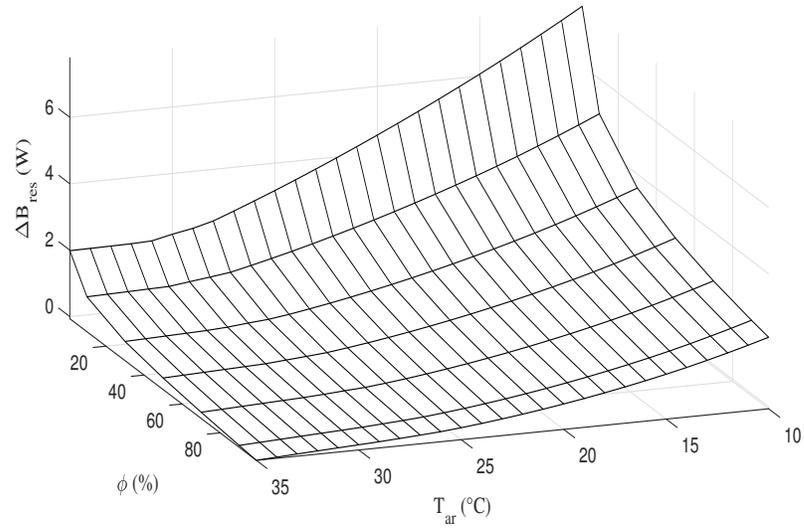


Figura B.15: Taxa de exergia associada ao processo de respiração para o método de (MADY *et al.*, 2014).

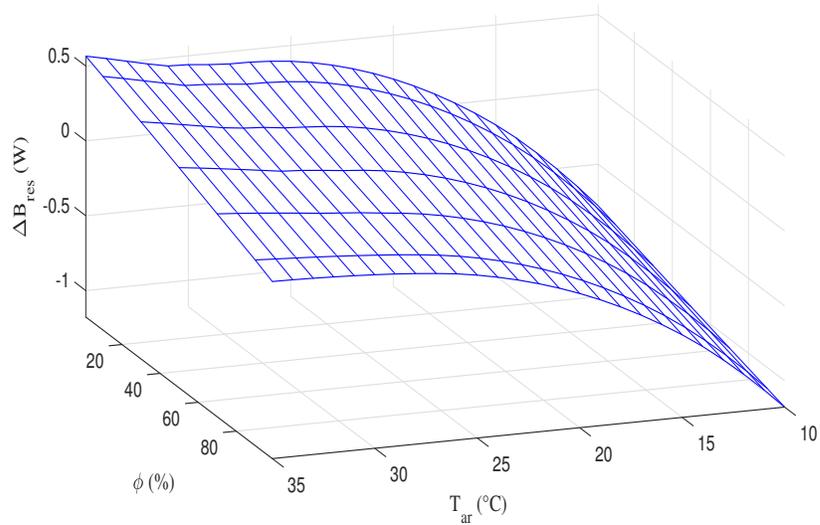


Figura B.16: Taxa de exergia associada ao processo de respiração para o método de (PREK E BUTALA, 2010).

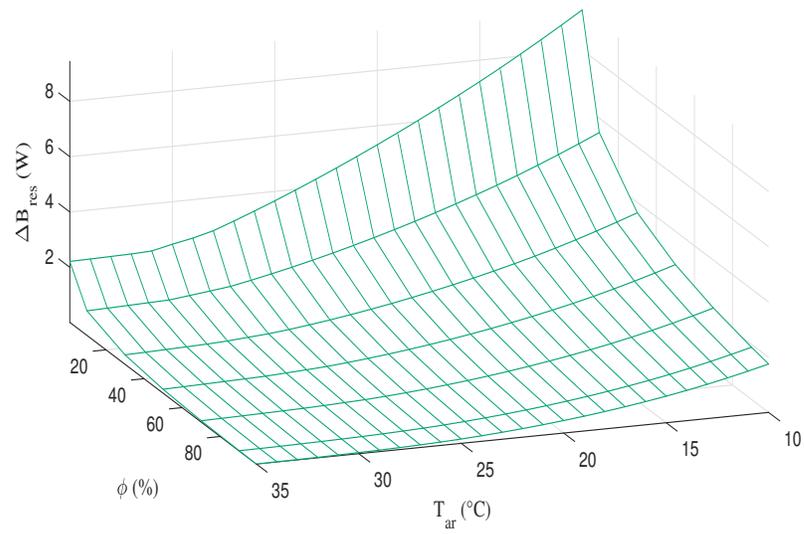


Figura B.17: Taxa de exergia associada ao processo de respiração para o método de (SHUKUYA *et al.*, 2010).