

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA EXERGIA NO CONFORTO TÉRMICO DO CORPO HUMANO: UMA REVISÃO INTEGRATIVA

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA EXERGENTE SOBRE EL CONFORTO TÉRMICO DEL CUERPO HUMANO: UNA REVISIÓN INTEGRATIVA

ANALYSIS OF EXERGY INFLUENCE ON HUMAN BODY THERMAL COMFORT: AN INTEGRATIVE REVIEW

Welington Bezerra de Sousa*

welingtonbezerra@yahoo.com.br

Maria Carmem Batista de Alencar*

carmemsjp@hotmail.com

Daniel Casimiro da Silveira *

danielcasimirodasilveira@yahoo.com.br

Henry Witchael Dantas Moreira*

henry.cz@hotmail.com

Ketinlly Yasmine Nascimento Martins*

yasmynefisio@hotmail.com

* Universidade Federal de Campina Grande, Cajazeiras/PB – Brasil

RESUMO

O conceito de exergia em sistemas biológicos, como o corpo humano, tem sido amplamente utilizado, como forma de entender melhor o seu funcionamento. Este trabalho tem como objetivo promover uma revisão de literatura sobre a análise da influência da exergia no conforto térmico em sistemas biológicos do corpo humano. Trata-se de análise do estado de conhecimento por meio da revisão de literatura em fontes bibliográficas dos Periódicos Capes e Google Acadêmico, no período de 2013-2018. Os descritores utilizados foram: “exergia”, “sistemas biológicos”, “conforto térmico” e “termodinâmica”. Nos quadros aqui expostos estão os títulos dos trabalhos, autores, periódicos e ano de publicação. Em seguida, uma discussão do contexto apresentado. Com base nas leituras conclui-se que, os conceitos e a eficiência da segunda lei da termodinâmica, como exergia, trabalho reversível e irreversibilidade, são relevantes para os diversos aspectos da vida diária.

Palavras-chave: Exergia. Sistemas biológicos. Conforto térmico. Termodinâmica. Eficiência exérgica.

RESUMEN

El concepto de exergía en los sistemas biológicos, como el cuerpo humano, se ha utilizado ampliamente como una forma de comprender mejor su funcionamiento. Este artículo pretende promover una revisión de la literatura sobre el análisis de la influencia de la exergía en el confort térmico en los sistemas biológicos del cuerpo humano. Este es un análisis del estado del conocimiento a través de la revisión de la literatura en las fuentes bibliográficas de Capes Periodicals y Google Scholar, en el

período 2013-2018. Los descriptores utilizados fueron: "exergia", "sistemas biológicos", "confort térmico" y "termodinámica". Las tablas presentadas aquí incluyen los títulos de los trabajos, autores, revistas y año de publicación. Luego una discusión del contexto presentado. Sobre la base de las lecturas, se concluye que los conceptos y la eficiencia de la segunda ley de la termodinámica, como la exergia, el trabajo reversible y la irreversibilidad, son relevantes para los diversos aspectos de la vida diaria.

Palabras-clave: Exergia. Sistemas biológicos. Confort termal. La termodinámica. Eficacia exergetica.

ABSTRACT

The concept of exergy in biological systems, such as the human body, has been widely used as a way to better understand its functioning. This paper aims to promote a literature review on the analysis of the influence of exergy on thermal comfort in biological systems of the human body. This is an analysis of the state of knowledge through literature review in bibliographic sources of Capes Periodicals and Google Scholar, in the period 2013-2018. The descriptors used were: "exergia", "biological systems", "thermal comfort" and "thermodynamics". The tables presented here include the titles of the works, authors, journals and year of publication. Then a discussion of the context presented. Based on the readings it is concluded that the concepts and efficiency of the second law of thermodynamics, such as exergy, reversible work and irreversibility, are relevant to the various aspects of daily life.

Keywords: Exergy. Biological systems. Thermal comfort. Thermodynamics. Exergetic efficiency.

INTRODUÇÃO

O princípio básico da primeira lei da termodinâmica tem como parâmetro a quantidade de energia e afirma que a energia não pode ser criada nem destruída, e a segunda lei da termodinâmica destaca a qualidade de energia, mais especificamente a degradação da energia durante um processo.

A partir das leis supracitadas questiona-se sobre o estado de conhecimento atual sobre o tema, na literatura vigente. Portanto discute-se nesse artigo de revisão integrativa, a exergia ou disponibilidade, que é o máximo de trabalho útil que pode ser obtido do sistema em um determinado estado em um ambiente específico.

Considerando tais conceitos, este trabalho visa promover uma revisão de literatura sobre a análise da influência da exergia no conforto térmico em sistemas biológicos do

corpo humano. A primeira aplicação de análise exergética ao corpo foi feita por Batato et al. (1990). Seu principal resultado indica que o metabolismo exergético é muito próximo do energético e que a eficiência exergética do corpo, para condições basais, é próxima de zero. Um modelo completo do corpo baseado na Segunda Lei da Termodinâmica foi proposto por Rahman (2007). A partir de seu modelo, o autor calculou os valores de entropia gerada para diferentes níveis de atividade física. Assim como em Aoki (1990), os dados obtidos por Rahman (2007) indicam uma relação direta entre atividade física e geração de entropia.

Segundo Mady (2013) que desenvolveu um modelo completo para análise exergética do corpo, que foi aplicado posteriormente à condição de atividade física, concluindo que a eficiência exergética do corpo aumenta de acordo com o nível de atividade física. Já Ferreira (2001), afirma que a exergia destruída e a eficiência exergética do corpo foram calculadas em função das constantes do sistema de controle, cujos valores validados para o modelo a partir de dados experimentais corresponderam aos pontos de mínima exergia destruída e máxima eficiência exergética.

Dessa forma essa revisão de literatura torna-se fundamental para entendermos que o funcionamento do corpo humano ocorre devido a um conjunto de processos que inevitavelmente apresentam irreversibilidade.

METODOLOGIA

Trata-se de um estudo sobre o estado do conhecimento, com coleta de dados realizada a partir de fontes secundárias, por meio de levantamento bibliográfico. Para o levantamento dos artigos na literatura realizou-se uma busca na base de dados Periódicos do Google Acadêmico e Capes, a partir de acesso institucional da Universidade Federal de Campina Grande, o que ofereceu maior extensão aos resultados bibliográficos, bem como acesso a textos completos. Foram utilizados, para busca dos artigos, os seguintes descritores e suas combinações nas línguas portuguesa e inglesa: “exergia”, “sistemas biológicos”, “conforto térmico” e “termodinâmica”. Os critérios de inclusão definidos para a seleção dos artigos foram: artigos publicados em português, inglês e espanhol; artigos na íntegra que retratassem a temática referente à revisão integrativa e artigos publicados e indexados nos referidos bancos de dados nos últimos dez anos. Foram

incluídos ainda, teses e dissertações.

A análise dos estudos selecionados, em relação ao delineamento de pesquisa, pautou-se tanto na análise quanto na síntese dos dados extraídos dos artigos, com abordagem descritiva, possibilitando observar, contar, descrever e classificar os dados, com o intuito de reunir o conhecimento produzido sobre o tema explorado na revisão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A amostra fundamental para essa revisão, foi constituída de duas teses e duas dissertações pelos critérios de inclusão já devidamente mencionados neste trabalho, entre os anos de 2013 e 2018. Os quadros de síntese abaixo representam as especificações de cada um dos artigos. Dessa forma, pode-se perceber a relevância da exergia no comportamento do conforto térmico do corpo humano, em detrimento da concepção fragmentada do conhecimento, com relação a primeira e segunda lei da termodinâmica, entropia e exergia.

Quadro 01. Síntese da dissertação de Henriques, USP – 2013.

Título do trabalho	Autores	Periódico	Palavras-chave	Ano de publicação
Desempenho exergético do corpo humano e de seu sistema respiratório em função de parâmetros ambientais e da intensidade de atividade física	HENRIQUES, Izabela Batista	Google Acadêmico/ Capes	Análise exergética. Corpo humano. Sistema respiratório. Atividade física. Parâmetros ambientais.	2013

Fonte: Próprios autores

Segundo Henriques (2013), a análise exergética é aplicada ao corpo humano a fim de determinar o comportamento exergético padrão do corpo e do seu sistema respiratório para um indivíduo saudável em diferentes condições ambientais e intensidades de atividade física. Para isso, são calculadas as taxas de exergia destruída e as eficiências exergéticas do pulmão e do corpo como um todo para diferentes altitudes, períodos de aclimação, temperaturas, umidades relativas e intensidades de atividade física. São utilizados modelos do corpo e do sistema respiratório disponíveis na literatura, assim como um modelo exergético do corpo. Para a análise exergética do sistema respiratório é proposto um modelo exergético baseado no modelo de transferência de calor e massa presente na literatura. A análise exergética é aplicada a dois volumes de controle: o corpo e o sistema respiratório, que compreende as vias aéreas e os pulmões. No primeiro volume de controle ocorre transferência de exergia para o ambiente através de convecção e radiação, assim como fluxos de exergia através da respiração e evaporação, além da geração de exergia pelo

metabolismo exergético. No volume de controle relativo ao sistema respiratório, os fluxos de exergia estão associados ao ar inspirado e expirado e ao sangue venoso e arterial. A transferência de exergia ocorre através do calor gerado pelo metabolismo e do trabalho dos músculos respiratórios. Há também uma variação da exergia relativa ao metabolismo exergético do pulmão.

Quadro 02: Síntese da tese de Mady, USP - 2014.

Título do trabalho	Autores	Periódico	Palavras-chave	Ano de publicação
Desempenho termodinâmico do corpo humano e seus subsistemas. aplicações à medicina, desempenho esportivo e conforto térmico.	MADY, Carlos Eduardo Keutenedjian	Google Acadêmico	Exergia destruída. Análise exergética. Corpo humano.	2014

Fonte: Próprios autores

Conforme Mady (2014), a análise exergética é aplicada ao ser humano para avaliar a qualidade dos processos de conversão de energia no corpo e seus sistemas, assim como nos processos bioquímicos do metabolismo. Sabe-se que a vida tem um início, um desenvolvimento e um fim, ou seja, um típico exemplo de processo irreversível. Como tanto a idade cronológica como a entropia gerada são grandezas positivas (caminham no mesmo sentido), esta última passa a ser denominada de “flecha do tempo” (*arrow of time*).

Pelo exposto, entende-se que a partir da aplicação da Segunda Lei da Termodinâmica, torna-se possível desenvolver e aplicar índices baseados no conceito de exergia destruída/entropia gerada e rendimento exergético para diferentes áreas do conhecimento como medicina (comparação de técnicas de hipotermia), esportes (teste ergoespirométrico) e engenharia (conforto térmico). Para tal, propõe-se um modelo do corpo humano que leva em conta a transferência de exergia para o ambiente, a qual é causada pela radiação, convecção, vaporização e respiração. O metabolismo exergético é calculado com base na variação da exergia de três reações de oxidação: carboidratos, lipídeos e aminoácidos. Para condições ambientais transientes, calcula-se a variação temporal da exergia do corpo, e ainda, o máximo trabalho que o corpo pode executar a partir da hidrólise do ATP (adenosina trifosfato). O corpo humano aproveita aproximadamente 60% da exergia dos macronutrientes ingeridos na forma de ATP, 5% é dissipada na forma de calor e a restante destruída.

Quadro 03: Síntese da dissertação de Ribeiro, UNICAMP – 2018.

Título do trabalho	Autores	Periódico	Palavras-chave	Ano de publicação
---------------------------	----------------	------------------	-----------------------	--------------------------

Revista Valore, Volta Redonda, 5, e-5016, 2020

Análise exergetica do sistema térmico do corpo humano para avaliação de conforto térmico.	RIBEIRO, Thatiana Jéssica da Silva.	Google Acadêmico/ Capes	Análise Exergetica. Sistemas Biológicos. Corpo Humano. Conforto Térmico.	2018
---	-------------------------------------	-------------------------	--	------

Fonte: Próprios autores

Para Ribeiro (2018), 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, por tanto, 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 exergetica. Diversos modelos representativos do corpo humano têm sido desenvolvidos e a análise exergetica aplicadas à esses modelos possibilitam a avaliação da qualidade dos processos de conversão de energia que acontecem nele.

A análise exergetica 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.

Quadro 04: Síntese da tese de Henriques, USP – 2018.

Título do trabalho	Autores	Periódico	Palavras-chave	Ano de publicação
Impacto de patologias no desempenho termodinâmico do corpo humano.	HENRIQUES, Izabela Batista	Google Acadêmico	Análise exergetica. Corpo humano. Metabolismo. Coração. Câncer.	2018

Fonte: Próprios autores.

Em seu trabalho de doutorado, Henriques (2018), aborda que o conceito de exergia é utilizado na proposição de um indicador de idade exergetica que permita observar alterações da expectativa de vida de um indivíduo a partir da exergia destruída durante seu ciclo de vida. Para tal, a análise exergetica é aplicada ao corpo humano e a volumes de controle menores dentro do corpo

para diferentes cenários nos quais ocorram alterações nas reações metabólicas, a fim de determinar a taxa de exergia destruída em função da idade cronológica.

Com a informação supramencionada, é calculado o indicador de idade exergética, podendo comparar a taxa de progressão da vida do indivíduo nas diferentes condições avaliadas com base na ideia de que há um valor máximo de exergia destruída acumulada durante a vida.

Ao tomar os efeitos do tabagismo e da obesidade é possível avaliar o impacto na morbidade, e observa-se uma redução de aproximadamente 15 anos na expectativa de vida de fumantes, enquanto, para os obesos, o indicador mostra um aumento. Portanto, a identificação da obesidade como um fator de risco se deve ao desenvolvimento de patologias associadas à obesidade, e não ao aumento do metabolismo e à presença de gordura corporal subcutânea.

Nos termos apresentados anteriormente é que se entende que uma vez que maior parte das patologias relacionadas à obesidade está associada ao sistema cardiovascular, é proposto um modelo exergético do coração. Observa-se um aumento da taxa de exergia destruída na presença de hipertensão, que leva a uma redução de cerca de quatro anos na expectativa de vida. Por fim, é proposto um modelo do metabolismo de uma célula de câncer que leva em conta as alterações das rotas metabólicas, a partir do qual é possível observar um aumento de quase três vezes no metabolismo exergético de uma célula de câncer em comparação com uma célula saudável.

CONCLUSÃO

Considerando toda abordagem teórica aqui apresentada sobre análise exergética do conforto térmico no corpo humano, observa-se que são relevantes para os diversos aspectos da vida diária, os conceitos e a eficiência da segunda lei da termodinâmica, como exergia, trabalho reversível e irreversibilidade.

Pelas fontes aqui pesquisadas, percebe-se então, que a exergia do corpo humano em determinado momento e lugar pode ser vista como a quantidade máxima de trabalho que ele pode realizar naquele momento e local. Conclui-se que é difícil quantificar a exergia, por causa da independência das capacidades física e intelectual de uma pessoa – eis o desafio para os próximos estudos em prol da avaliação da exergia de um sujeito em atuação profissional.

REFERÊNCIAS

AOKI, I. Entropy principle for human development, growth and aging. **Journal of theoretical biology**, v. 150, n. 2, p. 215-223, 1991.

BATATO, M.; DERIAZ, O.; BOREL, L.; JEQUIER, E. Analyse exergétique, théorique et expérimentale, du corps humain. **Entropie**, v. 26, p. 120-130, 1990.

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

HENRIQUES, Izabela Batista. Desempenho exergético do corpo humano e de seu sistema respiratório em função de parâmetros ambientais e da intensidade de atividade física. **Dissertação (Mestrado)** - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

HENRIQUES, Izabela Batista. Impacto de patologias no desempenho termodinâmico do corpo humano. **Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)** – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2018.

MADY, Carlos Eduardo Keutenedjian. Desempenho termodinâmico do corpo humano e seus sub-sistemas: aplicações à medicina, desempenho esportivo e conforto térmico. **Tese (Doutorado)**. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

RAHMAN, A. A novel method for estimating the entropy generation rate in a human body. **Thermal Science**, v. 11, n. 1, p. 75-92, 2007.

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

Recebido em: 29/07/2019

Aceito em: 13/04/2020

Endereço para correspondência:

Nome: Wellington Bezerra de Sousa

Email: welingtonbezerra@yahoo.com.br



Esta obra está licenciada sob uma [Licença Creative Commons Attribution 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)