Revista COOPEX (ISSN:2177-5052)

Análise exergética: uma revisão da exergia destruída aplicada ao corpo humano, especificamente, ao coração

Exergetic analysis: a review of exergy destroyed applied to the human body, specifically, to the heart

***Charlene Maria de Alcântara*[1]**
***Defsson Douglas de Araújo Ferreira*[2]**
***Flávia Cosmo Guedes da Silva*[3]**
***Julianna Gomes da Silva Figueira*[4]**
***Glauco Ruben de Freitas Brito*[5]**
***José Jefferson da Silva Nascimento*[6]**
***Jose Jefferson da Silva Nascimento Filho*[7]**
***Laila Caroline Duarte Nascimento*[8]**
***Flávio Franklin Ferreira de Almeida*[9]**

Resumo: A termodinâmica é utilizada para caracterizar alguns fenômenos em diversas áreas. Ao utilizar a primeira e a segunda leis conjuntamente, percebe-se a utilidade de se conceituar a exergia. que é a capacidade de um portador de energia realizar um trabalho útil. É muito importante analisar a exergia para compreender os consumos e desperdícios dos sistemas, incluindo sistemas vivos. Uma das primeiras análises do corpo humano onde foram consideradas as irreversibilidades energéticas foi realizada em 1989. Posteriormente, vários pesquisadores propuseram novas abordagens para a modelagem energética do corpo humano, bem como a análise exergética de várias partes do corpo humano, a exemplo do coração. Este artigo tem como objetivo fazer uma revisão da literatura existente sobre a exergia destruída acumulada ao longo da vida e a relação existente entre a desenvoltura termodinâmica e o funcionamento do corpo humano especificamente o estudo exergético do coração. A levantamento teórico realizado indica a preocupação na determinação de modelos para quantificar da exergia do coração, com resultados expressos de maneira didática e acessível ao entendimento do público. Os referidos estudos expõem a maior exergia quando se compara indivíduos com maior nível de estenose aórtica, ou menos saudáveis.
Palavra- chaves: Exergia do Coração; Exergia do corpo humano; Exergia.

Abstract: Thermodynamics is used to characterize some phenomena in several areas. By using the first and second laws together, one can see the usefulness of conceptualizing exergy. which is the ability of an energy carrier to do useful work. It is very important to analyze exergy to understand consumption and waste of systems, including living systems. One of the first analyzes of the human body where energetic irreversibilities were considered was carried out in 1989. Later, several researchers proposed new approaches for the energetic modeling of the human body, as well as the exergetic analysis of various parts of the human body, such as the heart. This article aims to review the existing literature on the exergy destroyed accumulated throughout life and the relationship between thermodynamic resourcefulness and the functioning of the human body, specifically the exergy study of the heart. The theoretical survey carried out indicates the concern in determining models to quantify heart exergy, with results expressed in a didactic way and accessible to the public's understanding. These studies expose the highest exergy when comparing individuals with a higher level of aortic stenosis, or less healthy.
Keywords: Heart Exergy; Exergy of the human body; Exergy. **DOI: https://doi.org/ 10.61223/coopex.v14i5.500**

[1]Aluna do Curso de Doutorado em Engenharia de Processos, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: charlenealcantara7@gmail.com
[2] Aluno do Curso de Doutourado em Engenharia de Processos, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: defssonifpb@gmail.com
[3] Aluna do Curso de Dotorado em Engenharia de Processos, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: flavia.cguedes@hotmail.com
[4] Aluna do Curso de Doutorado em Engenharia de Processos, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: juliannagomess@gmail.com
[5] Aluno do Curso de Doutorado em Engenharia de Processos, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: glaucoruben@hotmail.com
[6] Professor Adjunto do Doutorado em Engenharia de Processos, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: jose.jefferson@professor.ufcg.edu.br
[7] Médico, formado pela Famene-Joao Pessoa. E-mail: jefferson_20_2009@hotmail.com.
[8] Estudante do 9º Período de Medicina da Faculdade de Medicina de Olinda –FMO. E-mail: laila.duarte01@hotmail.com
[9] Mestre em Economia da Empresa pela Universidade Federal da Paraíba-UFPB (2004). Graduado em Ciências Econômicas - (2001). Membro do Grupo de pesquisa: "Agrocomputação" da UFCG, membro do Grupo de pesquisa "Abelhas no Semiárido", e do Grupo de pesquisa: "Grupo Verde de Agroecologia e Abelhas", ambos da Universidade Federal de Campina Grande -UFCG.

INTRODUÇÃO

A termodinâmica é utilizada para caracterizar alguns fenômenos em diversas áreas. É comum se verificar a utilização das leis termodinâmicas para descrever exemplos da química, física, engenharia, medicina, entre outros. Na primeira lei da termodinâmica, a energia de um sistema é perfeitamente conservada.

Esta Lei da Termodinâmica, quando aplicada isoladamente, não é capaz de produzir a ferramenta de diagnóstico mais precisa, pois desconsidera o princípio de que a transferência de energia tem uma qualidade (MOSQUIM et al., 2018).

Com o intuito de considerar este ponto, a Primeira e a Segunda leis devem ser empregadas conjuntamente, portanto a utilidade de se conceituar a exergia, definida por Kotas (1985) , como a capacidade de um portador de energia realizar um trabalho útil. Em outra forma de defini-la, Hirs (1993) descreve que as exergias perdidas ou destruídas são uma quantificação da irreversibilidade de um sistema, e quão longe ele está de uma condição ideal. Além disso, a exergia corresponde à qualidade da energia em cada processo de transformação e diferentes formas: elétrica, química, térmicas.

Schaeffer e Wirtshafter (1992) complementam este conceito ao definir que a eficiência exergética é sempre menor que a eficiência energética e pode haver uma diferença entre a qualidade da oferta e da demanda de energia.

Com o intuito de balancear esta eficiência exergética, Rosen (1992) propõe que a mesma pode ser representada pela razão entre a energia útil gerada por um sistema e a energia total fornecida a ele. Essa relação pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{Wútil}{Wtotal} \qquad (1)$$

Onde:

η = eficiência exergética

Wútil = energia útil gerada pelo sistema

Wtotal = energia total fornecida ao sistema

A energia útil é aquela que é convertida em trabalho útil, enquanto a energia total é a soma da energia útil e da energia dissipada na forma de calor. Observando esta relação podemos concluir

que quando a energia útil gerada em relação à energia total fornecida aumentar, a eficiência exergética do sistema também receberá um aumento.

Vale ressaltar que a eficiência exergética é uma medida mais precisa da eficiência energética de um sistema, uma vez que leva em consideração não apenas a quantidade de energia fornecida, mas também a qualidade dessa energia e a capacidade do sistema de convertê-la em trabalho útil.

Os conceitos de exergia têm sido cada vez mais utilizados para analisar sistemas vivos nos últimos anos. Como por exemplo Ribeiro e Mady (2022) que estudaram a comparação entre métodos de análise exergética aplicados a um modelo térmico do corpo humano e Turhan e Akkurt (2019) que descreveram a relação entre conforto térmico e consumo de exergia do corpo humano em uma zona de clima temperado.

Uma das primeiras análises do corpo humano onde foram consideradas as irreversibilidades energéticas foi realizada em 1989 por Aoki (1989). Posteriormente, vários pesquisadores propuseram novas abordagens para a modelagem energética do corpo humano, bem como a análise exergética de várias partes do corpo humano, a exemplo do coração.

A partir do que foi exposto acima, este artigo tem como objetivo fazer uma revisão da literatura existente sobre a exergia destruída acumulada ao longo da vida e a relação existente entre a desenvoltura termodinâmica e o funcionamento do corpo humano especificamente o estudo exergético do coração.

EXERGIA DO CORPO HUMANO

Conceitualmente os eventos que ocorrem dentro de conceitos termodinâmicos podem estudar o comportamento de um sistema seja ele de um ser vivo ou não. A aplicação da termodinâmica para tratar de termos qualitativos e quantitativos sobre um sistema ocorre cada vez mais (SCHWEIKER et al., 2018). Aplicamos as Leis da termodinâmica e principalmente as análises exergéticas dentro de aplicações desde o estudo do conforto térmico, maquinários e também dentro da saúde humana (RIBEIRO; MADY, 2022).

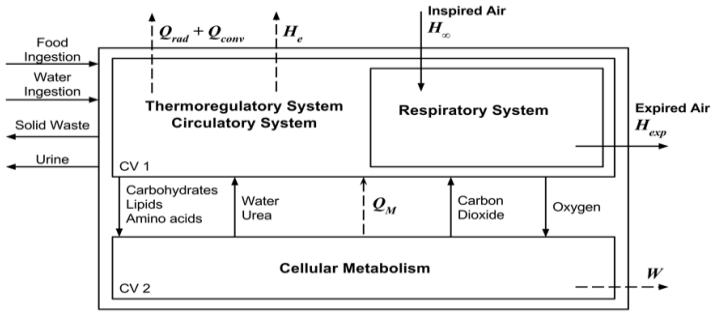
Nas últimas décadas, pesquisas cientificas buscaram incorporar as associações físicas do corpo humano e como isso interferia na manutenção e qualidade de vida da sociedade. O princípio físico que mais poderia explicar o comportamento do corpo seria a termodinâmica (MADY et al., 2012). A primeira Lei da termodinâmica abordando a área da superfície corporal e a distribuição de temperatura dos membros, bem como, a segunda Lei da termodinâmica considerando as

irreversibilidades internas do metabolismo humano e sua relação com o meio externo (RIBEIRO; MADY, 2022).

As análises exergéticas ao corpo humano conforme cada condição e os estudos direcionados, podem proporcionar um detalhamento de como estar ocorrendo a exergia destruída em cada estresse especifico submetido o organismo do ser humano e como reduzir esses efeitos. Estudos como condições térmicas ar, radiação, tratamento de queimadura, hipotermia e outros são direcionadas e orientadas por meio de estudos médicos (MOLLIET; MADY, 2021). Cada vez mais a análise da exergia esclarece e quanto de exergia e não energia é consumido pelo o corpo humano e os conceitos de exergia destruída no meio ambiente construído (SCHWEIKER et al., 2018).

Conforme os autores Garcia et al. (2018), o corpo humano é modelado de duas formas, considerando como dois volumes de controle, um para as partes macroscópica do corpo e o metabolismo celular, propondo um método de avaliar as trocas de calor e massa entre o corpo humano e o ambiente (figura 1).

Figura 1: As trocas de calor e massa entre o corpo humano e o ambiente.

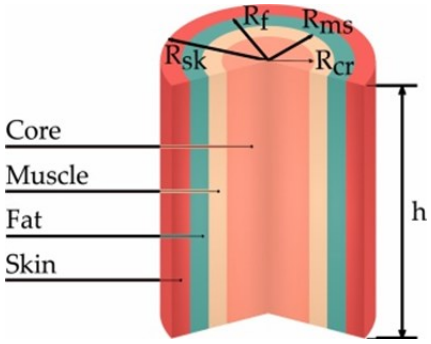


Fonte: Garcia et al. (2018).

Na figura 1 considera-se que a parte macroscópica do corpo seria o CV1 e o metabolismo celular CV2. Ainda conforme Garcia et al. (2018), a oxidação dos nutrientes durante a respiração celular gera dois termos: o calor (Q_M) que ocorre a transferência para o corpo (CV1), com o intuito de permanecer sua temperatura em uma faixa estreita e o trabalho (W), que será necessário para as atividades. A parte macroscópica do corpo (CV1) é a que tem contato direto com a vizinha (ambiente), induzindo a interação por meio de convecção (Q_{conv}) e o metabolismo celular (CV2) considerando uma interação partido da radiação (Q_{rad}), conduzidos pela a transferência de calor para a pele.

Estudos para controle térmico do corpo humano também propõem condições geométricas para considerar a estrutura corporal, com isso, considerando o corpo como uma forma cilíndrica podemos obter quatro camadas (figura 2).

Figura 2: Formas cilíndricas do corpo humano.



Fonte: Garcia et al. (2018) com adaptações de Molliet & Mady (2021).

Na figura 1 observa-se de forma esquemática um perfil de temperatura corporal, com formato cilíndrico, onde conforme os autores Molliet & Mady (2021), a camada interna que é o núcleo representa os ossos englobantes, órgãos internos e tecidos conjuntivo seguidos pelas camadas de músculo, gordura e pele. Garcia et al. (2018) relatam que para obter por exemplo o perfil corporal de corpo para a análise exergética, precisa-se desenvolver um modelo de transferência de calor do corpo humano. O volume de cada camada irá interferir no comportamento energético e exergético no corpo humano, permitindo assim, quantificar de forma numérica a exergia.

Ao analisar este comportamento exergético do corpo humano, podemos relacioná-lo diretamente com a longevidade. De acordo com Hershey (2010) o corpo sai de um estado de elevada ordem, para uma desordem máxima, que corresponderia a morte. Assim a exergia destruída do corpo humano pode ser vista como a quantidade de energia útil que é perdida durante o processo metabólico do corpo humano, tornando-se inutilizável para realizar trabalho. Vários fatores podem acelerar esse processo de desordem como por exemplo, como a má alimentação, o sedentarismo, o estresse e o envelhecimento.

Assim como Henriques (2016) discorre, a longevidade humana, tem relação com a capacidade do corpo de manter a sua eficiência metabólica ao longo do tempo. Para alcançá-la devem ser mantidos hábitos saudáveis, desde a alimentação a prática regular de exercícios, redução de estresse e doenças, dentre outros.

Assim como na termodinâmica, a minimização da exergia destruída é essencial para garantir a longevidade humana. A adoção de hábitos saudáveis pode reduzir a quantidade de energia útil perdida pelo corpo, aumentando sua eficiência metabólica e, consequentemente, sua longevidade. Além disso, a prevenção de doenças e o tratamento adequado de condições médicas também podem contribuir para a longevidade humana.

Em resumo, a exergia destruída e a longevidade podem ser aplicadas ao contexto humano, sendo que a adoção de hábitos saudáveis e a prevenção de doenças são essenciais para maximizar a eficiência metabólica do corpo e garantir uma vida longa e saudável.

METODOLOGIA

Fonte de informação

Nas buscas considerou-se o modo "pesquisas avançadas" e as línguas português e inglês. Todas as publicações de artigos científicos em eventos foram descartadas, assim como as publicações realizadas em livros técnicos, monografias, dissertações, teses e artigos científicos foram analisados.

RESULTADO E DISCUSSÃO

Formas de utilização da exergia no corpo humano

Um dos tópicos abordados por Tokunaga & Shukuya (2011), é sobre o conceito de exergia que quantifica o potencial de dispersão de energia e matéria no espaço ambiental e também o quanto é consumido.

A análise da exergia no corpo humano foi realizada pela primeira vez em 1990, posteriormente, inúmeros pesquisadores abordaram novas modelagem térmicas para aplicar esse tipo de estudo ao corpo humano, bem como novos métodos de análises a serem desenvolvidas (RIBEIRO & MADY, 2022).

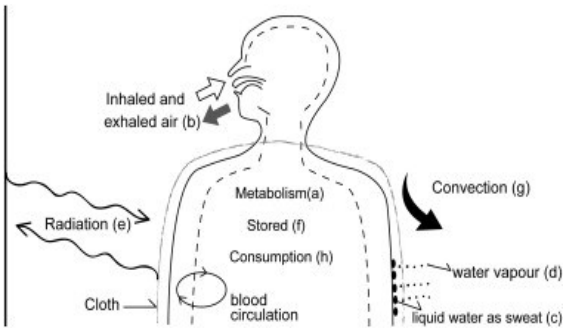
Pois se verifica-se que existe uma condição ambiental térmica em que a menor taxa de consumo da exergia do corpo humano surge juntamente com o conforto térmico racional, mas até agora toda a análise foi feita com uma suposição de condições do estado estacionário (TOKUNAGA & SHUKUYA, 2011).

O ambiente térmico interno humano é definido por quatro parâmetros: temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade relativa. Porém, não é suficiente usar apenas a temperatura do ar para descrever o efeito do ambiente térmico interno no desempenho humano, também pode-se dizer que é influenciada pela sensação térmica humana e pelo conforto térmico (WU et al., 2013).

Tokunaga & Shukuya (2011), observaram que justamente o meio de entrada da exergia e a soma desse tipo de energia quente gerada pelo metabolismo humano (figura 3), onde se tem a

exergia quente, fria, úmida e seca contida pelo ar úmido inalado. Encontramos as gotas contidas pela água em forma de líquido como o suor sendo a exergia quente e a fria sendo aquela radiante proveniente da superfície interna dos sistemas de envelope absorvidas pelo corpo humano. Já a saída da exergia é a soma do ar úmido exalado, onde ocorre a transferência de energia quente e fria por convecção. Portanto pode-se concluir que o armazenamento de exergia ocorre em duas partes, sendo elas no núcleo do corpo e na casca do corpo humano (TOKUNAGA & SHUKUYA, 2011).

Figura 3: Formas da exergia no corpo humano



Fonte: Tokunaga & shukuya (2011).

a) Existem exergias quentes geradas pelo metabolismo, exergias quentes/frias e úmidas/secas do ar inalado e exalado (b), exergias quentes/frias e úmidas/secas da água líquida pelo suor (c), vapor d'água devido à evaporação do suor (d), emissão e absorção de exergias quentes/frias radiantes (e), exergia quente armazenada pelo corpo-concha e corpo-núcleo (f), transferência de exergia por convecção (g) e consumo de exergia (h).

Wu et al., (2013) abordam que é na segunda lei da termodinâmica, que o consumo mínimo de exergia do corpo humano coincidirá com o trabalho útil relativamente máximo realizado pelo corpo humano, em outras palavras, com o desempenho humano ideal. Portanto, o consumo de exergia realizada pelo corpo humano pode ser usado para descrever o estado do desempenho humano sob diferentes condições térmicas internas.

Partes do corpo com estudo sobre exergia

O estudo abrangente do comportamento do corpo humano requer o uso da Segunda lei da termodinâmica para avaliar a qualidade dos processos de conversão de energia que ocorrem em seus vários órgãos e sistemas, Luo (2009) comparou a taxa de produção de entropia em uma célula cancerosa com uma saudável e concluiu que o primeiro é sempre maior.

Uma das primeiras tentativas de descrever a vida em função da entropia de quantidade física foi do físico, alemão, Schrödinger, que propôs que o corpo extrai entropia negativa do ambiente

para compensar a entropia produzida continuamente. Esta abordagem foi baseada na mecânica estatística que relaciona a entropia com o grau de ordem do sistema (KEUTENEDJIAN MADY et al., 2012).

Mais tarde, em Aok (1989) Aok1 (1990), a produção de entropia foi analisada em humanos em condições basais. Com base em resultados experimentais, o efeito da temperatura ambiente, ar forçado, correntes ao redor do corpo, roupas, exercícios e frio foram considerados. Finalmente, o estudo Aok (1991) analisou o efeito do crescimento e envelhecimento no corpo humano. Foi demonstrado que o mínimo princípio de produção de entropia também é válido para humanos adultos.

O método proposto por Aoki (1987) e Aoki (1987) adicionando alguns detalhes de condições ambientais para o modelo, como ar velocidades atuais, umidade relativa do ar. Em vez de usar resultados experimentais, o autor estimou a troca de calor para o ambiente a partir de coeficientes térmicos (radiação e convecção). Os resultados, como outros, confirmaram o princípio da entropia mínima, e indicou que as atividades físicas tendem a aumentar a produção de entropia.

Da geração total de entropia durante a vida, foi possível prever valores próximos à expectativa de vida média real do homem e da mulher dos EUA. Além disso, uma redução na proteína e no conteúdo calórico da ingestão resulta em um aumento na vida útil. De onde, concluiu-se que, o exercício físico aumenta a produção de entropia.

Albuquerque Neto e cols Albuquerque Neto et al. (2010), sugeriram um modelo do sistema respiratório e do sistema térmico para realizar a análise exergética do corpo humano sob atividades físicas. O modelo da respiração sistema foi uma extensão do trabalho de Albuquerque Neto et al. (2008.). Do ponto de vista exergético, os tecidos são mais efetivos durante a atividade física, enquanto o pulmão é menos eficaz (ALBUQUERQUE NETO et al., 2010).

O metabolismo é um conjunto de reações químicas que libera energia proveniente da oxidação de substratos energéticos e permite o funcionamento vital processos no corpo humano . A exergia metabólica tem uma definição semelhante, que é a variação da exergia do corpo causada pela oxidação dos substratos energéticos. (KEUTENEDJIAN MADY ET AL., 2012).

Para simular diferentes condições ambientais para cada idade, é necessário conhecer a temperatura de neutralidade térmica (FERREIRA & YANAGIHARA, 2009). De acordo com Keutenedjian Mady et al (2012) . a faixa de temperatura operacional de 29° a 31° C fornece uma condição térmica neutra. A temperatura de neutralidade foi definida como a temperatura em que o corpo atinge a condição de estado estacionário com quase nenhuma interferência do sistema termorregulador (ou do sistema de controle). Além disso, esta condição é definida como o estado inicial do corpo para simulações transitórias.

À medida que a pessoa envelhece, há uma redução no metabolismo, então temperaturas mais altas são necessários para a condição de neutralidade térmica. A neutralidade está no nível máximo no metabolismo aos (18 anos) e tende a aumentar ao longo da vida. Para esta idade, a quantidade de energia liberada da oxidação de substratos energéticos no corpo é maior, então a temperatura de neutralidade deve ser menor (AOKI, 1987). À medida que a pessoa envelhece, há uma redução no metabolismo, então temperaturas mais altas são necessárias para a condição de neutralidade térmica (KEUTENEDJIAN MADY et al., 2012).

A taxa de exergia destruída e a eficiência exergética para cada compartimento. Alguns compartimentos como tronco e cabeça possuem a maior exergia destruída e menor eficiência exergética. já que a maioria das reações metabólicas ocorrem no tronco (primeira coluna da Tabela 3), parte da exergia térmica liberada é distribuída para o restante do corpo pelo sistema circulatório (KEUTENEDJIAN MADY et al., 2012) .

Portanto, como esperado, a teoria da produção de entropia mínima é confirmada para adultos. Além disso, a eficiência exergética também diminui ao longo da vida. O tronco e a cabeça têm a maior exergia destruída e menor eficiência exergética em comparação com outros membros. A contribuição de energia da taxa de calor e taxas de fluxo de massa é relevante, embora as taxas de exergia sejam quase insignificantes. Estes últimos são fortemente dependentes do ambiente condições (KEUTENEDJIAN MADY et al., 2012).

Importância da exergia no funcionamento do coração

No que diz respeito ao funcionamento, o coração e os vasos sanguíneos constituem o sistema cardiovascular, ou circulatório. O coração funciona como uma bomba que transfere o sangue para os pulmões para que ele possa receber oxigênio e, posteriormente circular este fluido rico em oxigênio para as demais partes que integram o corpo. Portanto, destaca-se a importância vital deste órgão, e a necessidade de verificação sobre o valor energético dos processos que ocorrem durante o bombeamento (Souza 2020).

A exergia destruída no coração humano é uma medida da quantidade de energia útil que é perdida durante o processo de bombeamento sanguíneo. O coração humano é um sistema termodinâmico que consome energia para realizar trabalho mecânico, ou seja, para bombear o sangue através do sistema circulatório.

Durante o processo de bombeamento sanguíneo, ocorrem irreversibilidades termodinâmicas, como a dissipação de calor e a fricção, que resultam na perda de energia útil. A exergia destruída

no coração humano é calculada como a diferença entre a exergia inicial e a exergia final do sistema, levando em consideração as irreversibilidades que ocorrem durante o processo (Henriques, 2018).

A exergia destruída no coração humano pode ser minimizada através de medidas que visam melhorar a eficiência do sistema cardiovascular, como a prática regular de exercícios físicos, a adoção de uma dieta saudável e a prevenção de doenças cardiovasculares. A minimização da exergia destruída no coração humano é importante para a saúde e o bem-estar do indivíduo, bem como para a sustentabilidade do sistema cardiovascular a longo prazo.

A determinação de modelos para quantificação da exergia tem se tornado uma significativa fonte de pesquisas recentes, sobretudo pela necessidade de expressar matematicamente, por gráficos e índices numéricos, a perspectiva exegética do coração sob diversos aspectos fisiológicos, assim como, a origem ou causas desse fenômeno. Entende-se a relevância prestada aos resultados destes trabalhos supracitados, considerando o impacto educativo que estes estudos trazem, à medida que são publicizados e a população passa a ter acesso aos referidos resultados.

Henriques et al. (2016) apresentaram dados referentes a um estudo cujo objetivo foi propor e aplicar um modelo exegético para três categorias de indivíduos quanto a prática de atividades físicas, além de inserir variações quanto a indivíduos magros com ou sem hipertensão. Segundo os autores, os índices de exergia perdida indicam que tanto a prática de atividades quanto o nível de hipertensão acarretam o acréscimo da destruição de exergia no coração dos indivíduos, em razão do aumento da pressão do sangue, bem como, do crescimento da força de circulação no sistema. A nível de fundamentação, o modelo aplicado mostrou ainda que a exergia foi superior no lado esquerdo (devido a localização do coração).

Roll et al. (2019) desenvolveram um modelo exegético baseado no gradiente de pressão da veia aorta, contando com um banco de dados de 40 pacientes. Os estudos mostraram uma regressão linear resultante em valores em torno de 14,0 kPa para o gradiente de pressão mais intenso, tendendo a partir de 1,0 kPa em humanos mais saudáveis.

O modelo termodinâmico verifica as perdas relacionadas aos processos internos de transformação de energia: exergia destruída nas válvulas, exergia aumentada no fluxo e a potência do coração. Resultados indicam ainda que esta parcela perdida alcança níveis de 10 W, sendo a eficiência exergética de 15% para um coração saudável, diminuindo de acordo com a gravidade das patologias, atingindo 5%. (ROLL et al., 2019). Em razão dos maiores níveis de pressão, o coração tende a desenvolver uma maior tensão (esforço), o que intensifica as irreversibilidades nas válvulas de bombeamento sanguíneo.

Souza (2020), propõe uma análise comparativa de eficiência exergética para dois indivíduos, sendo um portador da doença de chagas, e o outro um indivíduo saudável. Os resultados desta

pesquisa indicaram uma redução da eficiência do coração no indivíduo que possui a referida patologia. Dessa forma, é possível ainda indicar uma tendência de menor expectativa de vida para o portador da doença de chagas.

CONCLUSÃO

A termodinâmica é utilizada para caracterizar alguns fenômenos em diversas áreas. Ao utilizar a primeira e a segunda leis conjuntamente, percebe-se a utilidade de se conceituar a exergia, que é a capacidade de um portador de energia realizar um trabalho útil. É muito importante analisar a exergia para compreender os consumos e desperdícios dos sistemas, incluindo sistemas vivos.

Este artigo cumpriu o seu objetivo de fazer uma revisão da literatura existente sobre a exergia destruída acumulada ao longo da vida e a relação existente entre a desenvoltura termodinâmica e o funcionamento do corpo humano especificamente o estudo exergético do coração. Observou-se que desde os primeiros estudos sobre a exergia do corpo humano houveram várias contribuições acerca do tema, revelando aperfeiçoamentos nos modelos matemáticos para descrição das análises exergéticas, assim como sobre os parâmetros utilizados para quantificar essa exergia no corpo humano. Ao longo dos últimos anos, foi observado um aumento das pesquisas desenvolvidas na área, ressaltando assim a importância dos estudos já realizados e o enorme potencial dos próximos trabalhos e pesquisas relacionados ao tema.

A respeito do coração, percebe-se a aplicação dos conceitos de termodinâmica e o crescente conjunto de estudos empíricos (geração de modelos matemáticos) e experimentais voltados para determinação da eficiência exergética para indivíduos humanos com diferentes níveis de condições fisiológicas, sobretudo a massa, condições de práticas de atividades físicas, doenças cardíacas, visando a quantificação da exergia em função dos aspectos supracitados.

Como perspectivas futuras, espera-se o desenvolvimento de modelos matemáticos de análise exergética de órgãos ainda não estudados e utilização de variáveis associadas a patologias que provocam alterações nos sistemas do corpo, possibilitando assim, uma melhor compreensão de mecanismos fisiológicos cujo funcionamento ainda necessita de informações.

REFERÊNCIA

ALBUQUERQUE NETO, C., PELLEGRINI, L. F., FERREIRA, M. S., OLIVEIRA JR., S. de, & YANAGIHARA, J. I. (2010). Exergy Analysis of Human Respiration under Physical Activity*. **Int. J. of Thermodynamics**, v. 13, n. 3, p. 105–109. www.icatweb.org/ijot

ALBUQUERQUE NETO, C., ITIZO YANAGIHARA SENIOR MEMBER, J., & TURRI, F. (N.D.). A Carbon Monoxide Transport Model of The Human Respiratory System Applied to … A Carbon Monoxide Transport Model of the Human Respiratory System Applied to Urban Atmosphere Exposure Analysis: Vol. XXX (Issue 3).

AOK, I. (1989). Entropy Flow and Entropy Production in the Human Body in Basal Conditions (Vol. 141).

AOK, I. (1991). Entropy Principle for Human Development, Growth and Aging. In **J. theor. Biol** (Vol. 150).

AOK1, I. (1990). Effects of Exercise and Chills on Entropy Production in Human Body. In **J. theor. Biol** (Vol. 145).

AOKI, I. (1987). Entropy balance of white-tailed deer during a winter night. In ***Bulletin of Mathematical Biology*** (Vol. 49, Issue 3).

AOKI I., 1989 Entropy flow and entropy production in the human body in basal conditions. **J Theor Biol** 1989; v. 141, n. 1, p. 11-21. https://doi.org/10.1016/S0022- 5193(89)80004-9.http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022519389800049

FERREIRA, M. S., & YANAGIHARA, J. I. (2009). A transient three-dimensional heat transfer model of the human body. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 36, n. 7, p. 718–724. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.03.010

GARCIA, M. M.; UNE, R. Y.; OLIVEIRA JINIOR, S.; MADY, C. E. K. Exergy Analysis and Human Body Thermal Comfort Conditions: Evaluation of Different Body Compositions. **Entropy**, v. 20, n. 265, p. 1-17, 2018.

HENRIQUES, I. B. & MADY, C. E. K. & OLIVEIRA JUNIOR, S. de, 2016. "Exergy model of the human heart," **Energy**, Elsevier, vol. 117(P2), pages 612-619.

HENRIQUES, I. B. **Impacto de patologias no desempenho termodinâmico do corpo humano.** 138 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

HIRS, G., 1993. Exergy Loss: A Basis for Energy Taxing, in: Pilavachi, P.A. (Ed.), **Energy Efficiency in Process Technology**. Springer Netherlands, Dordrecht, p. 1241–1253. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1454-7_109

KEUTENEDJIAN MADY, C. E., SILVA FERREIRA, M., ITIZO YANAGIHARA, J., HILÁRIO NASCIMENTO SALDIVA, P., & DE OLIVEIRA JUNIOR, S. (2012). Modeling the exergy behavior of human body. **Energy**, v. 45, n.1, p. 546–553. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.064

KOTAS, T.J., 1985. The Exergy method of thermal plant analysis. **Exergon Publishing Company**, London.

LUO, L. F. Entropy production in a cell and reversal of entropy flow as an anticancer therapy. **Frontiers of Physics in China**, v. 4, n. 1, p. 122–136. 2009. https://doi.org/10.1007/s11467-009-00079

MADY, C. E. K.; FERREIRA, M. S.; YANAGIHARA, J. I.; SALDIVA, P. H. N.; OLIVEIRA JUNIOR, S. Modeling the exergy behavior of human body. **Energy**, v. 45, p. 546-553, 2012.

MOLLIET, D. S.; MADY, C. E. K. Exergy analysis of the human body to assess thermal comfort conditions: Comparison of the thermal responses of males and females. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 25, p. 1-8, 2021.

MOSQUIM, R. F., OLIVEIRA JÚNIOR, S. de MADY, C. E. K., 2018. Modelling the exergy behavior of São Paulo State in Brazil, **Journal of Cleaner Production**, v. 197, p. 643-655, ISSN 0959-6526, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.235.

TURHAN, C., AKKURT, G. G., 2019. The relation between thermal comfort and human-body exergy consumption in a temperate climate zone. **Energy and Buildings**, v. 205, ISSN 0378-7788, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109548.

TOKUNAGA, K., & SHUKUYA, M. (2011). Human-body exergy balance calculation under un-steady state conditions. **Building and Environment** , v. 46, n1, p. 2220-2229. November 2011. https://doi-org.ez15.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.buildenv.2011.04.036

RIBEIRO, T. J. S., MADY, C. E. K., 2022. Comparison among exergy analysis methods applied to a human body thermal model. **Energy**, v. 239, p. 122446, ISSN 0360-5442,https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122446.

ROLL, J. B.; BORGES, M. L.; MADY, C. E. K. & OLIVEIRA JUNIOR, S. (2019). Exergy Analysis of the Heart with a Stenosis in the Arterial Valve. **Entropy**, 21(6), 563-575.

ROSEN, M.A., 1992. Evaluation of energy utilization efficiency in Canada using energy and exergy analyses. Energy 17, 339–350.

SCHWEIKER, M.; KOLARIK, J.; DOVJAK, M.; SHUKUYA, M. Unsteady-state human-body exergy consumption rate and its relation to subjective assessment of dynamic thermal environments. **Energy and Buildings**, v. 116, p. 164-180, 2016.

SCHAEFFER, R., WIRTSHAFTER, R.M., 1992. An exergy analysis of the Brazilian economy: from energy production to final energy use. **Energy**, v. 17, p. 841–855.

SOUSA, W. B.; ALENCAR, M. C. B.; SILVEIRA, D. C.; MOREIRA, H. W. D. & MARTINS, K. Y. N. (2020). Análise da influência da exergia no conforto térmico do corpo humano: Uma revisão integrativa. **Revista Valore**, 5, 5016.

WU, X. ZHAO, J., OLESEN, B, W., FANG, L., A novel human body exergy consumption formula to determine indoor thermal conditions for optimal human performance in office buildings. **Energy and Buildings**. v. 56, p. 48-55, January 2013. https://doi-org.ez15.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.enbuild.2012.10.010