

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Inara Magno Nogueira

**PREDIÇÃO DA GERAÇÃO ENTRÓPICA E AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO
ESTILO DE VIDA E DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS NA LONGEVIDADE
HUMANA**

Belo Horizonte - MG

2021

Inara Magno Nogueira

**PREDIÇÃO DA GERAÇÃO ENTRÓPICA E AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO
ESTILO DE VIDA E DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS NA LONGEVIDADE
HUMANA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade.

Orientadora: Profa. DSc. Andréa Oliveira Souza da Costa

Coorientador: Prof. DSc. Esly Ferreira da Costa Junior

Belo Horizonte - MG

2021

N788p

Nogueira, Inara Magno.

Predição da geração entrópica e avaliação do impacto do estilo de vida e das condições ambientais na longevidade humana [recurso eletrônico] / Inara Magno Nogueira. – 2021.

1 recurso online (89 f.: il., color.) : pdf.

Orientador: Andréa Oliveira Souza da Costa.

Coorientador: Esly Ferreira da Costa Junior.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 84-89.

Bibliografia: f. 78-83.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Bioengenharia - Teses.
3. Termodinâmica - Teses. 4. Entropia - Teses. 5. Expectativa de vida -
Teses. 6. Exercícios físicos - Teses. 7. Longevidade - Teses. I. Costa,
Andréa Oliveira Souza da. II. Costa Junior, Esly Ferreira da. III.
Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

PREDIÇÃO DA GERAÇÃO ENTRÓPICA E AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO ESTILO DE VIDA E DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS NA LONGEVIDADE HUMANA

INARA MAGNO NOGUEIRA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dra. Andrea Oliveira Souza da Costa (Orientadora - Departamento de Engenharia Química/UFMG), Dr. Esly Ferreira da Costa Junior (Coorientador - Departamento de Engenharia Química/UFMG), Dr. Luiz Machado (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG) e Dr. Rudolf Huebner (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Energia e Sustentabilidade**".

Dissertação aprovada no dia 5 de novembro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Andrea Oliveira Souza da Costa, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 01/12/2021, às 17:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Esly Ferreira da Costa Junior, Professor do Magistério Superior**, em 02/12/2021, às 17:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Machado, Vice diretor(a) de unidade**, em 07/12/2021, às 15:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rudolf Huebner, Professor do Magistério Superior**, em 08/12/2021, às 01:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1118391** e o código CRC **8C9C9D9A**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço majoritariamente à minha família pelo apoio e amparo antes e durante a realização do trabalho, em especial aos meus pais e ao meu irmão.

Agradeço aos amigos que estiveram comigo permitindo momentos de descontração. Aos colegas que auxiliaram no período de realização de disciplinas e ao longo da pesquisa, contribuindo com programas, novas ideias e questionamentos.

Agradeço ao corpo docente da UFMG e aos membros da secretaria do PPGMEC, em especial ao Professor Márcio Fonte-Boa e à Marina Costa, que auxiliaram e possibilitaram o andamento e conclusão dessa etapa.

Agradeço e confirmo que o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradeço à entidade pelo apoio financeiro em parte do projeto.

RESUMO

As leis da termodinâmica podem ser empregadas na análise de sistemas biológicos. Estudos na literatura aplicam as propriedades termodinâmicas para descrever a expectativa de vida do corpo humano em função do nível de atividade física e dos hábitos de cada indivíduo, especialmente considerando a 2ª lei da termodinâmica. A análise de tais estudos indica que pode haver uma contradição teórica criada entre o limite de geração de entropia e a expectativa de vida para o ser humano. Segundo a literatura, a atividade física diminui a longevidade, pois eleva a taxa de geração de entropia, ou seja, incita a desordem do sistema, levando a uma falha precoce. Isso se opõe às recomendações médicas de manutenção do bom hábito da prática de exercícios, visando a qualidade e aumento da expectativa de vida. O objetivo principal deste estudo consiste em propor uma relação matemática simplificada entre a longevidade e a geração entrópica do corpo humano, quando esse é submetido à prática de atividade física, diferentes hábitos alimentares e variadas condições externas. Após uma busca por modelos apresentados na literatura, foi realizada a verificação e a comparação dos resultados previamente publicados, assim como um levantamento das variáveis mais utilizadas. Com isso, elaborou-se um novo modelo o mais abrangente possível. Esse novo modelo foi validado comparando-se diferentes condições e indivíduos. Foi considerada uma expectativa de vida de 70,21 anos para um homem base sedentário, resultando em uma geração entrópica acumulada de 11.327 kJ/kg.K. E assim, considerando um limite fixo de geração de entropia, conforme sugerido pelos autores anteriores, encontrou-se uma expectativa de vida de 56,29 anos para quando fisicamente ativo e 47,04 anos para um atleta. Além disso, percebeu-se que locais frios e maior ingestão de gordura seriam positivos para a expectativa de vida. Esses resultados indicaram a necessidade de avaliações e considerações adicionais para tornar a modelagem mais adequada à realidade. A partir de dados que relacionassem a variação de expectativa gerada com a prática de atividade física, foi possível perceber que deveria haver, na verdade, um aumento do limite da geração entrópica para aqueles que se exercitassem habitualmente. Avaliações mostraram que se pode ter até, aproximadamente, 40% de aumento da geração entrópica acumulada para que seja real a relação da prática à longevidade. Após todas as análises e de forma a manter a verossimilhança do modelo, sugere-se que o princípio do limite acumulado de geração de entropia seja flexibilizado em função do estilo de vida e do tipo de exercício realizado, em oposição ao que é argumentado pela literatura. Desta forma, cada indivíduo teria seu limite entrópico definido pelas características e hábitos tomados ao longo da vida.

Palavras-Chave: Termodinâmica, Bioengenharia, Geração de Entropia, Expectativa de Vida Humana, Atividade Física, Longevidade.

ABSTRACT

The laws of thermodynamics can be applied to the analysis of biological systems. Studies in the literature apply the properties of thermodynamics to describe the life expectancy of the human body as a function of the level of physical activity and habits of each individual, especially considering the second law of thermodynamics. The analysis of these studies shows that there may be a theoretical contradiction created between entropy generation and lifespan in the human body. According to the literature, physical activity decreases longevity, since it elevates cumulative entropy generation, that is, it incites disorder in the system, bringing about early failure. This opposes medical recommendations of maintaining the good habit of exercising, seeking quality of life and increase in lifespan. The main objective of this paper is to propose a simplified mathematical model between longevity and entropy generation in the human body, when exposed to physical activity, different food habits and variable environmental conditions. After a search for models presented in the literature, a verification and comparison of the results previously published was done, as was a survey of the main variables used. Thereby, a new model as comprehensive as possible was constructed. This new model was validated comparing different conditions and individuals. A life expectancy of 70.21 years for a sedentary male has been considered, resulting in an accumulative entropy generation of 11,327 kJ/kg.K. Thus, considering a fixed limit of entropy generation, as suggested by previous authors, life expectancies of 56.29 years for an active person and 47.04 years for an athlete were found. Furthermore, it was found that cold places and a greater ingestion of fat would positively affect life expectancy. These obtained results show a need for additional assessments and considerations to make the modeling more accurate. Based on data relating the variation in expectations generated with the practice of physical activity, it is possible to see that there should actually be an increase in the limit of entropy generation for those who exercise regularly. Evaluations have shown that there may actually be an increase of up to approximately 40% in accumulated entropy generation for the relationship between this practice and longevity. After all the analyses and in order to maintain the likelihood of the model, it is suggested that the principle of cumulative limit of entropy generation should be relaxed in function of lifestyle and type of exercise performed during life, differently from what is argued in the literature. In this way, each individual would have his or her entropic limit defined by characteristics and habits taken throughout life.

Keywords: Thermodynamics, Bioengineering, Entropy Generation, Human Lifespan, Physical Activity, Longevity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção de entropia por indivíduo de 0 a 75 anos para homens (x) e mulheres (o) de acordo com Aoki (1994).....	20
Figura 2 – Vazões mássicas típicas no corpo humano e correspondentes gerações entrópicas.....	24
Figura 3 – Valores de geração entrópica por indivíduo com mudança de nível de atividade obtidos por Rahman (2007).....	25
Figura 4 – Taxa de entropia gerada no caso base de Silva e Annamalai (2008).....	30
Figura 5 – Entropia gerada acumulada no caso base de Silva e Annamalai (2008).....	31
Figura 6 – Geração entrópica para diferentes níveis de atividade física por peso corporal de acordo com Silva e Annamalai (2008).....	32
Figura 7 – Geração entrópica acumulada para diferentes níveis de atividade física por peso corporal de acordo com Silva e Annamalai (2008).....	32
Figura 8 - Histórico da expectativa de vida em alguns países e no mundo.....	34
Figura 9 – Mortes por causa natural com dados de 2001.....	34
Figura 10 – Variação anual da porcentagem de mortes atribuídas a cada doença.....	37
Figura 11 – Relação entre o IMC e o risco relativo de diabetes tipo II, hipertensão, doença cardiovascular e colelitíase em mulheres (A) e homens (B).....	37
Figura 12 - Taxa de exergia destruída pela idade para grupo controle, moderadamente obeso e obeso.....	38
Figura 13 – Óbitos por COVID-19 por grupo de risco no Brasil.....	39
Figura 14 – Exergia destruída acumulada por unidade de massa em função da idade para normotensos e hipertensos.....	42
Figura 15 – Comparativo da taxa de exergia destruída em função da potência realizada pelo corpo para normotensos (a) e hipertensos (b).....	42
Figura 16 - Razão de perda de calor no corpo todo em diferentes temperaturas.....	43
Figura 17 - LHL em função do calor gerado pelo corpo (M-W).....	44
Figura 18 - Fluxograma da metodologia proposta.....	46
Figura 19 - Ajuste de pontos para leitura de dados de geração entrópica por Silva e Annamalai (2008).....	52
Figura 20 – Comparação entre valores calculados na reprodução do modelo e lidos em Silva e Annamalai (2008).....	53
Figura 21 – Geração entrópica para diferentes níveis de atividade calculados pela reprodução do modelo de Silva e Annamalai (2008).....	54
Figura 22 - Fluxograma do novo modelo.....	61
Figura 23 - Geração entrópica para homens e mulheres.....	63
Figura 24 - Geração entrópica para homens e mulheres de 0 a 5 anos.....	65
Figura 25 - Geração entrópica no corpo para 15°C, 25°C e 35°C.....	67
Figura 26 - Geração entrópica para diferentes níveis de atividade.....	70
Figura 27 - Geração entrópica para diferentes estilos de vida.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes adimensionais de troca térmica de roupa em função da v_{eff} em m/s.....	23
Tabela 2 - Propriedades dos macronutrientes	28
Tabela 3 – Correlações de EER em kcal/dia para um indivíduo médio masculino.....	29
Tabela 4 - Ingestão diária recomendada de cada macronutriente.....	30
Tabela 5 - Limite de geração entrópica acumulada	31
Tabela 6 - Mudança na expectativa de vida em função do PAL	33
Tabela 7 - Aumento de expectativa de vida por atividade por gênero em anos	36
Tabela 8 - Entropia de substâncias a 300K	49
Tabela 9 - Modelos matemáticos analisados	55
Tabela 10 - Geração entrópica nos diferentes modelos para um indivíduo de 52 anos, 1,52m de altura e 74,74 kg [em kJ/K por trimestre por kg de peso]	56
Tabela 11 – Comparativo entre os modelos.....	57
Tabela 12 - Geração entrópica para homens e mulheres.....	64
Tabela 13 - Limite de geração entrópica acumulada	66
Tabela 14 - Dietas avaliadas	68
Tabela 15 - Geração entrópica para diferentes dietas por dia por kg de peso.....	69
Tabela 16 - Níveis de atividade física avaliados.....	70
Tabela 17 - Descrição das situações avaliadas no presente trabalho.....	71
Tabela 18 - Geração entrópica limite em função dos níveis de atividade [kJ/kg.K].....	73

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AI	Ingestão Adequada
AMDR	Faixa Adequada de Distribuição dos Macronutrientes
ATP	Adenosina Trifosfato
CH	Carboidratos
COVID-19	Doença do Corona vírus de 2019
EER	Requerimento Estimado de Energia
F	Gordura
FA	Fator de Atividade
IMC	Índice de Massa Corporal
LHL	Calor Latente Perdido
NCDs	Doenças Silenciosas
OMS	Organização Mundial da Saúde
P	Proteína
PA	Coefficiente de Atividade Física
PAL	Nível de Atividade Física
TEE	Gasto Energético Total
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

LISTA DE SÍMBOLOS

Nomenclatura

a	Idade	[anos]
A_r	Área de radiação efetiva	1,54 m ²
A_s	Área total da pele	[m ²]
Cl_o	Coefficiente de troca térmica de roupa	adimensional
d	Diâmetro do corpo	0,3 m
d^2	Área efetiva do corpo	[m ²]
E	Energia	[kJ]
E_{max}	Capacidade Máxima	[W]
E_{R+C}	Carga de Calor Ambiental	[W]
E_{req}	Capacidade Requerida	[W]
G	Energia de Gibbs	[kJ/kg]
h	Entalpia	[kJ/kg]
h_{cnv}	Coefficiente de troca térmica por convecção	[W/m ² .°C]
h_{evp}	Coefficiente de troca térmica por evaporação	[W/m ² .hPa]
i_m	Índice de permeabilidade de roupa	adimensional
M	Taxa Metabólica	[kcal/dia] ou [W]
m	Peso	[kg]
\dot{m}	Vazão mássica	[kg/s] ou [mol/s]
P	Pressão qualquer	[Pa]
p	Pressão atmosférica	[hPa]
p_0	Pressão atmosférica no nível do mar	[hPa]
Q	Perda de calor pelo corpo	[J/s]
\dot{Q}	Taxa de Calor Transferido	[kJ/s]
s	Entropia	[J/s.K] ou [J/K.mol]
t	Tempo	[s]
T	Temperatura qualquer	[K]
T_a	Temperatura Ambiente	[°C] ou [K]
T_b	Temperatura do corpo (body)	[°C] ou [K]
T_c	Temperatura do calorímetro	27,4 °C
T_r	Temperatura retal	[°C] ou [K]
T_s	Temperatura da pele (skin)	[°C] ou [K]
T_0	Temperatura de estado morto	[°C] ou [K]
U	Energia Interna	[kJ]
v_{air}	Velocidade do vento	[m/s]
v_{eff}	Velocidade efetiva do vento	[m/s]
w	Fração de superfície molhada	adimensional
\dot{W}	Trabalho	[kJ/s]
X	Fração molar	adimensional
y	Altura	[m] ou [cm]

Símbolos gregos

ΔS_{heat}	Entropia associada à perda de calor	[J/s.K]
Δs	Varição de entropia	[J/s.K]
ϕP	Pressão de vapor	[mmHg] ou [hPa]
η	Eficiência	adimensional
Ψ	Disponibilidade/Exergia	[kJ/kg]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$5,670 \cdot 10^{-8}$ J/m.s.K
$\dot{\sigma}$	Entropia gerada total	[J/s.K]
$\dot{\sigma}_m$	Entropia gerada total por massa	[J/s.K.kg]

Subscrições

<i>a</i>	Ambiente
<i>c</i>	Convencional
<i>cnv</i>	Convecção
<i>cv</i>	Volume de controle
<i>dif</i>	Difusão
<i>energy</i>	Energia
<i>evp</i>	Evaporção
<i>ex</i>	Externo
<i>flow</i>	Fluxo
<i>g</i>	Gasoso
<i>in</i>	Entrada
<i>k</i>	Componente genérico k
<i>mass</i>	Massa
<i>opt</i>	Ótimo
<i>out</i>	Saída
<i>P</i>	Produto
<i>R</i>	Reagente
<i>rad</i>	Radiação
<i>rv</i>	Reservatório
<i>s</i>	Pele

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivo geral	15
1.2 Objetivos específicos	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 Modelos presentes na literatura	17
2.1.1 <i>Modelo Aoki (1989)</i>	17
2.1.2 <i>Modelo Rahman (2007)</i>	21
2.1.3 <i>Modelo Silva e Annamalai (2008)</i>	25
2.2 Relação entre a prática de atividade física, as patologias desencadeadas e a expectativa de vida	33
2.3 Avaliação de trocas térmicas pelo corpo humano	43
3 METODOLOGIA	45
3.1 Comparação entre dados obtidos pelos modelos	46
3.1.1 <i>Modelo Rahman (2007)</i>	47
3.1.2 <i>Modelo Silva e Annamalai (2008)</i>	51
3.1.3 <i>Avaliação entre modelos</i>	55
3.2 Nova modelagem proposta	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1 Variação de parâmetros externos	63
4.1.1 <i>Geração entrópica no novo modelo para diferentes gêneros</i>	63
4.1.2 <i>Geração entrópica no novo modelo para diferentes temperaturas</i>	67
4.1.3 <i>Geração entrópica no novo modelo para diferentes dietas</i>	68
4.1.4 <i>Geração entrópica no novo modelo para diferentes níveis de atividade</i>	69
4.2 Comparativo de estilo de vida e longevidade	71
5 CONCLUSÃO	74
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
APÊNDICE A – Valores lidos com o GetData Graph Digitizer 2.26 de geração entrópica por kg de peso por trimestre em função da idade em anos de acordo com Silva e Annamalai (2008) para homens e mulheres	84
APÊNDICE B – Comparativo entre os valores definidos na reprodução do modelo de Silva e Annamalai (2008) e valores lidos no gráfico	86
APÊNDICE C – Valores lidos com o GetData Graph Digitizer 2.26 de geração entrópica por kg de peso por trimestre em função da idade em anos de acordo com Silva e Annamalai (2008) para homens em diferentes níveis de atividade	87

1 INTRODUÇÃO

Um modelo matemático pode ser definido como uma equação (ou conjunto de equações) que descreve e é capaz de conectar os dados de entrada aos resultados obtidos, apresentando os mecanismos envolvidos nessa transformação. Quando é baseado nos balanços de massa e de energia, através das propriedades físicas, esses modelos são conhecidos como fenomenológicos.

O uso das propriedades termodinâmicas, como a entalpia, para descrever processos reais é amplamente difundido. Os usos mais comuns são para rotas industriais e em sistemas biotecnológicos. Esses usos são representados por Ramos *et al.* (2019), Kaveh *et al.* (2021) e por Silva *et al.* (2021). Mas conceitos termodinâmicos podem ser também aplicados em sistemas vivos, como apresentado por Mady *et al.* (2013).

Segundo Mady (2014), as aplicações da Primeira Lei da Termodinâmica em sistemas biológicos são datadas da segunda metade do século XVIII, em que Lavoisier e Laplace estudaram correlações entre o oxigênio inspirado e a energia perdida pelo corpo. O princípio de conservação de energia se mostrou válido para o corpo humano, quando o médico alemão, Julius von Mayer, na década de 40, concluiu que a energia mecânica dos músculos provinha da energia química dos alimentos (Mady, 2014). Mayer foi capaz de tal definição após observações que envolviam a fisiologia humana, relacionando calor e trabalho (Aquilini *et al.*, 2021).

Já a Segunda Lei da Termodinâmica afirma que, um sistema isolado, inicialmente em estado de não equilíbrio, tende ao equilíbrio com o consequente aumento de entropia. A entropia é uma propriedade atribuída ao grau de desordem de um sistema. Segundo Moran *et al.* (2013), do ponto de vista microscópico, conforme um sistema isolado se move em direção ao equilíbrio, ocorre um aumento da desordem e da entropia associada a este processo. A diferença entre as entropias final e inicial deste sistema pode ser chamada de entropia gerada.

O conceito de exergia ou disponibilidade, como nomeado por alguns autores, surgiu da combinação entre as Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica. Como definido por Moran *et al.* (2013), a exergia é o máximo trabalho teórico possível de ser obtido a partir de um sistema global, conforme este entra em equilíbrio com o ambiente (atinge o estado morto). Pelo balanço exergético do sistema, a exergia destruída do

processo é igual ao produto entre a variação entrópica do sistema e a temperatura do estado morto.

Segundo Rosen (2002), existem benefícios de utilizar os princípios termodinâmicos para avaliar as tecnologias e os impactos por elas gerados no meio ambiente. Kaveh *et al.* (2021) sugerem que a eficiência de sistemas e a otimização são designadas pela análise termodinâmica. Exergia se prova útil nessas atividades para engenheiros e cientistas, assim como para tomadores de decisões e políticos (Rosen, 2002).

Um corpo vivo é um sistema aberto que não está em equilíbrio térmico, químico ou mecânico com o ambiente. Para que esse estado de não equilíbrio seja mantido, existem constantes reações biológicas dentro do organismo, que requerem energia e vínculo com o meio, gerando entropia (Silva e Annamalai, 2008). Conforme colocado por Hershey (2010 *apud* Mady, 2014), o ser humano vai de um estado de elevada ordem até chegar a um estado de máxima desordem, quando ocorre a morte natural do corpo.

Autores afirmam que algumas condições externas, hábitos e patologias são capazes de impactar na taxa de geração entrópica do corpo, podendo estender ou encurtar a vida útil. De acordo com Luo (2009 *apud* Mady, 2014), o câncer gera um impacto degenerativo nas células e uma célula cancerígena gera maior entropia do que uma saudável. Henriques e Oliveira Jr. (2020) avaliaram que um tumor maligno não tratado pode reduzir em 27,2 anos a expectativa de vida, enquanto, se seguido o correto tratamento do câncer, a redução pode ser em 2,5 a 4,5 anos. Já o tabagismo pode reduzir em aproximadamente 15 anos a expectativa de vida, de acordo com Henriques *et al.* (2020) e segundo a literatura médica, que afirma uma elevação metabólica de 20% devido ao hábito de fumar (Henriques *et al.*, 2020).

Percebeu-se que o estudo e a aplicação da termodinâmica no corpo humano são usualmente empregados na análise do conforto térmico para o desenvolvimento de vestimentas e edifícios, sendo menos frequentes trabalhos que analisam a melhoria do desempenho dos sistemas do corpo humano com a energia disponível para o trabalho. Segundo Turhan e Akkurt (2019), conforto térmico está fortemente relacionado ao balanço térmico do corpo com o meio e, por essa razão, a aplicação da Primeira Lei é realizada. Reações internas ao corpo atualmente são estudadas para avaliar e melhorar o conforto com o meio, como em Molliet e Mady (2021), no

qual as diferenças entre homens e mulheres é destacada em busca da otimização da avaliação, como, por exemplo, a variação de cenários hormonais para cada sexo.

Alguns estudos tentam relacionar os dados termodinâmicos obtidos à melhoria do funcionamento dos sistemas. Em Hochstein *et al.* (2015), a geração entrópica foi relacionada à resposta cardiovascular quando o indivíduo é submetido à atividade física. O objetivo da avaliação foi definir a melhor faixa de batimentos cardíacos para o treinamento.

Um uso crescente da termodinâmica na medicina tem se dado pela aplicação do método da Dra. H. Clark (1995 *apud* Trela e Kwidziński, 2018). Nesse, a associação entre corrente elétrica e termodinâmica é utilizada para a detecção e destruição de patógenos no corpo humano. Os fatores que levam à destruição são baseados na Lei de Joule-Lenz, promovendo: desnaturação das proteínas dos patógenos pelo aumento da temperatura local, prevenção de entrada do patógeno nas células pela indução de movimentos oscilatórios por forças polarizadas e falha mecânica do patógeno devido ao aumento de pressão causado pela oscilação térmica.

Pelas pesquisas realizadas, notou-se que os modelos matemáticos publicados que buscam por relações entre a prática de atividade física e longevidade à luz da Termodinâmica são tradicionalmente específicos, ou seja, analisam apenas um fator variante e não as diversas interações que ocorrem no corpo humano durante e após a prática de atividade. Além disso, algumas adaptações biológicas para trocas térmicas e mássicas não são, majoritariamente, consideradas nos modelos, como a vasodilatação e a vasoconstrição.

Segundo Aoki (1989, 1990), Rahman (2007) e Silva e Annamalai (2008), a realização de atividade física implica um aumento na entropia gerada pelo corpo. Em outras palavras, a prática de exercícios acarretaria em uma morte precoce. Contudo, isso contradiz as recomendações médicas, que asseguram que a prática de atividade física contribui para um envelhecer mais duradouro e com maior qualidade de vida. Nota-se, nesse ponto, uma contradição teórica, que é o foco do estudo do presente trabalho.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo estabelecer um modelo capaz de conectar as propriedades termodinâmicas à fisiologia humana e aos impactos biológicos do exercício físico, provendo uma análise mais detalhada dos efeitos da atividade na

longevidade. Apesar da alta complexidade do corpo humano e das reações por ele executadas, o trabalho visa uma simplificação do sistema, a fim de possibilitar a modelagem. Assim, a proposta é definir um modelo com conceitos termodinâmicos e de transferência de calor mais completo possível, aprimorando modelos anteriores, em que seja possível a relação da expectativa de vida à geração entrópica, levando em consideração a atividade física e estilos diferentes de vida.

1.2 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos, tem-se:

- (i) compreender e comparar os modelos disponíveis na literatura;
- (ii) avaliar quantitativamente o impacto da atividade física e de outros fatores externos na geração entrópica do corpo e na longevidade;
- (iii) definir taxas e o limite de geração entrópica ao longo da vida em função do incremento de expectativa de vida dado pelo nível de atividade praticada.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Modelos presentes na literatura

Após uma busca por modelos fenomenológicos que relacionassem o funcionamento do corpo humano por uma análise termodinâmica dos processos, poucos foram os resultados obtidos. Esses resultados tornam-se ainda mais escassos quando é englobada a atividade física e o desempenho atlético do corpo. No entanto, destacaram-se as descrições propostas por Aoki (1989, 1990), Rahman (2007) e Silva e Annamalai (2008), em que são apresentadas relações entre o funcionamento do organismo e a longevidade, levando em consideração a prática de exercícios. Esses modelos serão apresentados a seguir.

Segundo Mady (2014), Aoki (1989, 1990) foi um dos autores que mais se destacou na busca por aplicar Leis Termodinâmicas ao corpo humano. Esse autor afirma que a produção entrópica é um tipo de medida universal que especifica quão violentos os movimentos e as reações ocorrem na natureza (Aoki, 1983).

Já Rahman (2007) se baseia no modelo proposto por Aoki (1989, 1990) e propõe modificações com o intuito de torná-lo mais abrangente, relacionando por equações a interação do corpo com o meio em que está inserido. Segundo Mady (2014), o objetivo de Rahman (2007) seria diminuir a dependência de dados experimentais presentes nos trabalhos de Aoki (1989, 1990) a partir do uso de relações matemáticas que descrevem a perda térmica do corpo para o meio. Alguns levantamentos sobre a influência das trocas térmicas fazem-se, então, necessários, de forma a firmar a validação feita para o modelo.

Silva e Annamalai (2008) buscam descrever os processos do corpo sob um aspecto celular, ou seja, sugerem uma abordagem baseada nas reações a nível metabólico. Seguindo essa mesma metodologia, outros autores buscaram relacionar a ingestão alimentar à longevidade por meio da entropia, como os trabalhos de Kuddusi (2015) e Patel e Rajput (2021), nos quais são comparadas as expectativas de vida aos padrões alimentares de regiões de, respectivamente, Turquia e Índia.

2.1.1 Modelo Aoki (1989)

Aoki (1989) sugere um método para o cálculo da entropia gerada pelo corpo humano tendo maior enfoque no comportamento de acordo com as condições ambientais, ou seja, Aoki (1989) considera as trocas entre o indivíduo e o meio. Dessa

forma, a geração entrópica do corpo é ocasionada pelas trocas que ocorrem entre a superfície da pele e os arredores. Para tanto, o autor usufrui de dados reportados por Hardy e DuBois (1938) em análise experimental do corpo humano.

Conforme Aoki (1989), a geração de entropia é dada pelo fluxo de entropia causado pelas trocas de energia e massa entre o corpo e o meio e pela perda de calor pelo corpo. Aoki (1989) considera que o fluxo de entropia das trocas energéticas é dado por aquilo que o corpo recebe por radiação emitida pelos arredores e por aquilo que ele perde por meio de radiação, convecção e evaporação, sendo que esses valores foram aferidos pela técnica de medição proposta por Hardy e DuBois (1938).

Segundo Hardy (1934), a absorvidade do corpo é unitária e então a entropia associada à radiação absorvida pelo corpo será dada por:

$$s_{rad.in} = \frac{4 \cdot A_r \cdot \sigma \cdot (T_c)^3}{3} \quad (01)$$

em que A_r é a área de radiação efetiva, igual a $1,54 \text{ m}^2$, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, igual a $5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, e T_c é a temperatura do calorímetro, equivalente a $27,4 \text{ }^\circ\text{C}$ segundo o experimento (aproxima-se à temperatura média do ambiente). Tem-se, então, que $s_{rad.in} = 3,161 \text{ J/s.K}$.

Já a entropia associada à radiação emitida pelo corpo, considerando a emissividade da pele igualmente unitária pela Lei de Kirchhoff, será dada por:

$$s_{rad.out} = \frac{4 \cdot A_r \cdot \sigma \cdot (T_s)^3}{3} \quad (02)$$

em que T_s é a temperatura média da pele do indivíduo ao longo do experimento, igual a $32,97 \text{ }^\circ\text{C}$. Tem-se, então, que $s_{rad.out} = 3,340 \text{ J/s.K}$.

A energia perdida por evaporação e por convecção foram medidas no experimento de Hardy e DuBois (1938), respectivamente iguais a $20,66 \text{ kcal/h}$ e 11 kcal/h . Esses valores foram então convertidos, devido a uma questão de unidade, e divididos pelos valores de temperatura do corpo (assumida como a temperatura retal do indivíduo, T_r , equivalente a $37,1 \text{ }^\circ\text{C}$ segundo a estimativa do experimento) e média na pele do indivíduo (T_s), respectivamente. A temperatura retal é adotada como equivalente à temperatura do corpo, uma vez que, segundo Aoki (1989), a temperatura retal é a mesma que a do pulmão e por isso essa medida deve ser utilizada. Assim, obteve-se:

$$s_{evp} = \frac{24,01}{310,25} = 0,077 \text{ J/s.K} \quad (03)$$

$$s_{cnv} = \frac{12,78}{306,12} = 0,042 \text{ J/s.K} \quad (04)$$

O fluxo de entropia pelas trocas energéticas será então dado pela diferença entre o que o corpo recebe ($s_{rad.in}$) e o que o corpo perde ($s_{rad.out} + s_{evp} + s_{cnv}$).

$$s_{flow (energy)} = 3,161 - (3,340 + 0,077 + 0,042) = -0,298 \text{ J/s.K} \quad (05)$$

O fluxo de entropia das trocas de massa considera a entrada de oxigênio (20,67 g/h) e as saídas de gás carbônico (23,16 g/h) e de vapor d'água do corpo (35,42 g/h). A resultante será dada pelo produto da entropia molar de cada uma das substâncias pelas vazões mássicas estimadas de cada um. Estes valores foram adquiridos de Hardy e DuBois (1938).

A total entropia associada à vazão mássica de água é de 0,103 J/s.K, considerando a entropia tabelada de água no estado gasoso igual a 188,72 J/K.mol e a vazão descrita por Hardy e DuBois (1938). Como definido por Aoki (1989), a vazão mássica de vapor d'água do corpo é tratado de duas formas: parte é considerada como fluxo energético da evaporação e o restante é considerado como fluxo mássico. O fluxo energético tem sua entropia calculada pela associação à energia de perda por evaporação, explicitada na Equação (03), e igual a 0,077 J/s.K. Já a entropia associada ao fluxo mássico é igual a 0,026 J/s.K, que é a diferença entre o valor total calculado de 0,103 J/s.K e o calculado para a evaporação que é 0,077 J/s.K.

Desta forma, o fluxo de entropia devido às trocas mássicas é dado por:

$$s_{flow (mass)} = \dot{m}_k s_k \quad (06)$$

$$s_{flow (mass)} = 0,0368 - 0,0312 - 0,026 \quad (06a)$$

$$s_{flow (mass)} = -0,020 \text{ J/s.K} \quad (06b)$$

De posse dos valores de entropia pelas trocas de calor e de massa, é possível definir o valor do fluxo total de entropia do corpo. Dado por:

$$s_{flow} = s_{flow (energy)} + s_{flow (mass)} = -0,318 \text{ J/s.K} \quad (07)$$

De acordo com o Aoki (1989), deve ser levada em consideração uma parcela de calor eliminado pelo corpo que foi aferida no experimento. Segundo Hardy e DuBois (1938), o corpo realizou uma eliminação de -8,71 kcal/h, ou -10,1 J/s. Assim, a entropia correspondente é de:

$$s_{heat} = \frac{Q}{T_r} = \frac{-10,1}{310,25} = -0,033 \text{ J/s.K} \quad (08)$$

A esse valor deve ser acrescida a variação entrópica associada à eliminação e consumo de água do corpo com o meio, cuja parcela não fora contabilizada na

evaporação, equivalente a $-0,026 \text{ J/s.K}$. Desta forma, a variação total de entropia é de $-0,059 \text{ J/s.K}$.

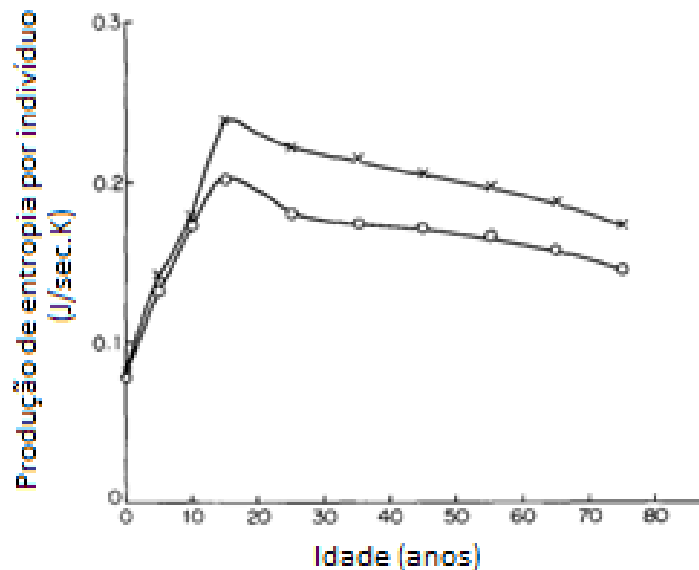
A entropia gerada, $\dot{\sigma}$, pelo corpo será então dada pela diferença entre a variação de entropia e a e o fluxo entrópico:

$$\dot{\sigma} = \Delta s - s_{flow} \quad (09)$$

Segundo os valores apresentados no experimento de Hardy e DuBois (1938) e a metodologia de Aoki (1989), a produção de entropia é de $0,259 \text{ J/s.K}$.

Aoki (1994) realizou estudos posteriores com o intuito de comparar a geração entrópica em homens e mulheres e, seguindo os valores médios de peso e tamanho da população japonesa e fórmulas empíricas, constatou que homens tem uma propensão a gerar mais entropia, como nota-se pelos resultados apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Produção de entropia por indivíduo de 0 a 75 anos para homens (x) e mulheres (o) de acordo com Aoki (1994)



Fonte: Adaptado de Aoki (1994)

Seguindo o mesmo protocolo descrito e utilizando valores definidos pelo experimento de Hardy *et al.* (1938 *apud* Aoki, 1990), em que foram avaliadas as temperaturas e as trocas térmicas do corpo quando submetido a um exercício físico leve, obteve-se que a produção de entropia é elevada para $0,491 \text{ J/s.K}$. Isso acontece devido às mudanças nas temperaturas corporais e ao aumento das perdas de energia para o meio, tanto em forma de calor quanto na evaporação e na convecção. Posteriormente, o corpo retorna para o valor basal, reestabelecendo a geração inferior de entropia.

Como concluído por Aoki (1990), o novo valor definido é 95% superior ao valor definido para a condição basal. Segundo o autor, a realização de exercícios físicos pode elevar de 50-140% a produção de entropia pelo corpo. Comparações feitas por Aoki (1990) com trabalhos anteriores conduzidos por Hardy *et al.* (1938 *apud* Aoki, 1990), resultantes de cálculos a partir de dados experimentais obtidos pelos autores, mostram que a produção entrópica aumenta tanto quanto o nível do exercício.

2.1.2 Modelo Rahman (2007)

O modelo de Aoki (1989, 1990) é, de certa forma, limitado ao indivíduo ao qual os dados experimentais são atribuídos, uma vez que se entende que variações de área de pele, peso, idade e altura vão impactar diretamente nas trocas térmicas com o meio, no nível de atividade física e no porte metabólico. Rahman (2007) sugere que sejam utilizadas equações para o cálculo das trocas com o meio, assim como para a determinação da temperatura do corpo, de forma a tornar o modelo mais abrangente, mas, ao mesmo tempo, tomando o mesmo balanço entrópico de Aoki (1989, 1990).

Como descrito, a geração de entropia é dada pelo fluxo de entropia causado pelas trocas de energia e massa para o meio e pela eliminação de calor no corpo. Para que este valor seja adequado ao corpo humano, Rahman (2007) sugere que se deve multiplicar o valor encontrado de entropia gerada pela razão entre as áreas total do corpo humano (A_s) e efetivamente radiante (A_r), sendo que a área total é calculada pela equação proposta por DuBois *et al.* (1916 *apud* Rahman, 2007), dada por:

$$A_s = 0,202 \cdot m^{0,425} \cdot y^{0,725} \quad (10)$$

em que m é o peso do indivíduo, em kg, e y é a altura, em m.

Diferentemente de Aoki (1989, 1990), que assume a temperatura do corpo equivalente à temperatura retal, Rahman (2007) sugere que a temperatura do corpo (T_b) é dada por uma proporcionalidade entre a temperatura retal (colocada como a temperatura interna do corpo) e a temperatura da pele, seguindo a equação proposta por Burton e Bazett (1936), apresentada na Equação (11).

$$T_b = 0,65T_r + 0,35T_s \quad (11)$$

Paralelamente, a temperatura do corpo deve ser considerada uma constante devido à correta manutenção dos sistemas, que não podem sofrer variações bruscas de temperatura, sendo um fator limitante do sistema. De acordo com Lu e Dai (2009), a temperatura corporal média é de 37°C, podendo-se aceitar valores um pouco inferiores, principalmente em função de idade e sexo. Desta forma, é possível utilizar

a equação mencionada para que seja definida a temperatura da pele (T_s) por uma simples manipulação matemática.

Já a temperatura retal (T_r), utilizada nos cálculos, deve ser definida de acordo com a taxa metabólica (M , em watts [W]), os coeficientes de troca térmica de roupa (em função do tipo de vestimenta utilizada, Clo e i_m/Clo adimensionais) e as capacidades requerida (E_{req}) e máxima (E_{max}) de evaporação do corpo (ambas em watts [W]), de acordo com a equação empírica proposta por Givoni e Goldman (1972) e apresentada na Equação (12). As Equações (13-15) são equações empíricas complementares necessárias para o cálculo da temperatura. Segundo os autores, uma boa concordância foi encontrada entre a fórmula preditiva proposta e dados experimentais disponíveis nos bancos de dados.

$$T_r = 36,75 + 0,004M + \frac{0,025}{Clo} (T_a - 36) + 0,8e^{0,0047(E_{req}-E_{max})} \quad (12)$$

$$E_{req} = M + E_{R+C} \quad (13)$$

$$E_{R+C} = \frac{11,6}{Clo} (T_a - 36) \quad (14)$$

$$E_{max} = 25,5 \frac{i_m}{Clo} (44 - \phi_a P_a) \quad (15)$$

em que T_a é a temperatura ambiente em °C, E_{R+C} é a carga de calor ambiental em W e $\phi_a P_a$ é a pressão de vapor no ar em temperatura ambiente (ou umidade relativa, em mmHg). O resultado de temperatura retal é em °C.

Apesar de não ser descrito no artigo publicado de Rahman (2007), sabe-se que a pressão de vapor é calculada pela fórmula empírica de Tetens (AMS, 2012), Equação (16), que se fundamenta na Lei de Dalton de pressão parcial de mistura.

$$\phi P = \alpha \cdot \exp^{\frac{17,3T_a}{237,3+T_a}} \quad (16)$$

em que α equivale a 610,8 para resultados em Pascal (Pa) ou 4,58 para resultados em milímetros de mercúrio (mmHg) e T_a é a temperatura ambiente em °C.

Os coeficientes de troca térmica de roupa dependem da velocidade efetiva do vento (v_{eff} , em m/s), sendo esta dependente da velocidade do vento (v_{air} , em m/s) presente no meio em que o corpo se encontra e da taxa metabólica (M , em W), como descrito na Equação (17), e do tipo de vestimenta utilizada, como apresentada na Tabela 1.

$$v_{eff} = v_{air} + 0,004(M - 105) \quad (17)$$

Tabela 1 – Coeficientes adimensionais de troca térmica de roupa em função da v_{eff} em m/s

TIPO DE ROUPA	Clo	i_m/Clo
Shorts	$0,57v_{eff}^{-0,30}$	$1,20v_{eff}^{+0,30}$
Shorts e camiseta	$0,74v_{eff}^{-0,28}$	$0,94v_{eff}^{+0,28}$
Uniforme padrão	$0,99v_{eff}^{-0,25}$	$0,75v_{eff}^{+0,25}$
Uniforme padrão e sobretudo	$1,50v_{eff}^{-0,20}$	$0,51v_{eff}^{+0,20}$

Fonte: Adaptado de Givoni e Goldman (1972)

O cálculo da taxa metabólica diária basal utilizada no trabalho é feito pelas equações de Harris e Benedict (1918). Essas equações são provenientes de parâmetros estatisticamente definidos de acordo com experimento, além de ser o método mais utilizado e cujo valor final mais se aproxima da calorimetria indireta, segundo Schneider e Meyer (2005).

$$M_{homem} = 66,5 + 13,8m + 5,0y - 6,8a \quad (18)$$

$$M_{mulher} = 655,1 + 9,6m + 1,8y - 4,7a \quad (19)$$

em que m é a massa em kg, y é a altura em cm, a é a idade em anos e M será definido em kcal/dia.

Esta taxa é, então, multiplicada por um fator de atividade (FA) correspondente ao nível de prática esportiva do indivíduo, sendo eles: (a) pouco ou nenhum exercício: 1,2, (b) exercício leve, 1-3 vezes na semana: 1,375, (c) exercício moderado, 3-5 vezes na semana: 1,55, (d) exercícios pesados, 6-7 vezes na semana: 1,725 e (e) exercícios muito pesados: 1,9. Tendo esse produto sido definido, tem-se a taxa metabólica diária do indivíduo, englobando a basal e o acréscimo gerado pela atividade.

Para definir a energia envolvida na convecção e na evaporação, o autor sugere que os coeficientes de evaporação e de convecção sejam definidos e então multiplicados por πd^2 , em que d^2 é a efetiva área do corpo (e d é o diâmetro do corpo, considerado constante igual a 0,3m), e pela variação de temperatura entre pele e meio e de pressão entre o local de estudo e o nível do mar, respectivamente. Posteriormente, os resultados devem ser divididos por T_s e por T_r em Kelvin [K], respectivamente, assim como em Aoki (1989), para que sejam definidas as entropias associadas a cada uma das trocas.

Relacionado às condições ambiente e à velocidade do vento, os coeficientes de troca térmica por evaporação (h_{evp}) e por convecção (h_{cnv}) são definidos pelas equações de Kandjov (1999), que ainda consideram se o corpo está exposto à circulação forçada ou natural.

Rahman (2007) considera convecção forçada e velocidade de vento de 2 m/s nas avaliações. Os coeficientes de troca são, então, definidos pelas Equações (20,21), dadas por Kandjov (1999), para troca por evaporação e convecção, respectivamente.

$$h_{evp} = 11,35 \cdot v_{air}^{0,618} \cdot (p_0/p)^{0,382} \quad (20)$$

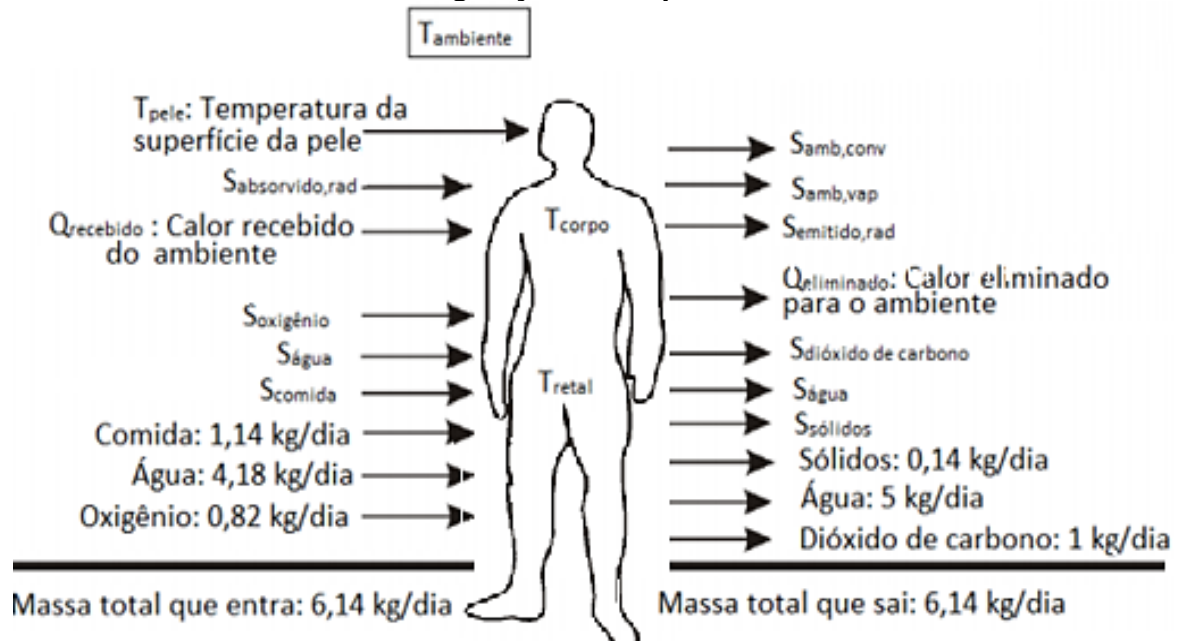
$$h_{cnv} = 6,88 \cdot v_{air}^{0,618} \cdot (p/p_0)^{0,618} \quad (21)$$

em que p é a pressão atmosférica [hPa] e p_0 é a pressão atmosférica ao nível do mar [hPa].

De forma semelhante ao modelo de Aoki (1989), o fluxo de entropia das trocas de massa considera as entradas de oxigênio e de água e as saídas de gás carbônico e de água do corpo. A resultante é dada pelo produto da entropia molar de cada uma das substâncias, pelas vazões mássicas [em mol/s] estimados de cada um, como explicitado pela Equação (22). As vazões mássicas de cada substância foram adquiridas por Walker (1991 *apud* Rahman, 2007) e são apresentados na Figura 2. Para os cálculos, são desprezadas as entradas de comida e a saída de sólidos.

$$S_{flow(mass)} = \dot{m}_{O_2} S_{O_2} - \dot{m}_{CO_2} S_{CO_2} + \dot{m}_{H_2O_{in}} S_{H_2O} - \dot{m}_{H_2O_{out}} S_{H_2O} \quad (22)$$

Figura 2 – Vazões mássicas típicas no corpo humano e correspondentes gerações entrópicas

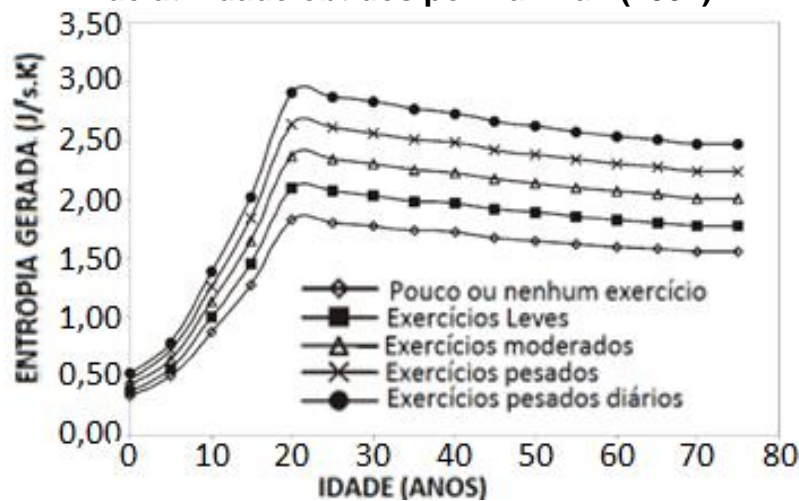


Fonte: Adaptado de Rahman (2007)

De forma similar a Aoki (1989), para a variação de entropia contida no corpo, Rahman (2007) sugere que a razão deve ser dada entre a diferença do calor produzido e eliminado pelo sistema e a temperatura do corpo (T_b). Para tal, são utilizados os valores experimentais de Hardy *et al.* (1938 *apud* Rahman, 2007).

A partir do procedimento acima descrito, Rahman (2007) definiu as curvas de geração entrópica por indivíduo, conforme apresentado na Figura 3. Nota-se que a geração entrópica varia significativamente com a variação no nível de atividade, de forma que o maior nível de geração ocorre quando a atividade é muito intensa. Segundo o autor, a geração entrópica é 40% maior em atividade muito intensa em comparação à condição de repouso.

Figura 3 – Valores de geração entrópica por indivíduo com mudança de nível de atividade obtidos por Rahman (2007)



Fonte: Adaptado de Rahman (2007)

2.1.3 Modelo Silva e Annamalai (2008)

Silva e Annamalai (2008) propuseram um modelo que visa relacionar a geração entrópica a partir da aplicação termodinâmica às reações bioquímicas do metabolismo humano. O método proposto pelos autores considera que todas as atividades realizadas pelo corpo dependem da energia provida pelo metabolismo (o saldo das trocas de calor entre o que entra e sai do corpo) e, desta forma, a avaliação de entropia gerada pelas reações metabólicas daria uma boa aproximação do total da entropia gerada pelo corpo. Este método se baseou na proposta de Hershey (1974 *apud* Silva e Annamalai, 2008) e de Hershey e Wang (1980 *apud* Silva e Annamalai, 2008), a qual foi modificada para que fossem contempladas mais variáveis do funcionamento do corpo humano. A hipótese dos autores presume que os nutrientes não metabolizados deixam o corpo sem alteração entrópica e que os fluxos de água e ar são pequenos a ponto de poderem ser desprezados.

De acordo com Silva e Annamalai (2008), o modelo se baseia no fato de que a produção de ATP (adenosina trifosfato) é o que sustenta a manutenção da vida. O metabolismo dos macronutrientes a partir da respiração celular libera o calor e as

demais substâncias para a construção do corpo e possibilita a realização de trabalho. A quantidade de energia gerada em cada reação, e a conseqüente quantidade de ATP, é dada pela eficiência metabólica da cadeia.

Segundo Mady (2014), o ATP funciona como uma “moeda energética” dentro das células, que retiram a energia química dos nutrientes e a armazenam dentro de si. Essa energia armazenada é posteriormente convertida em trabalho e eliminada em forma de calor (ponto de perda de energia). Segundo a avaliação realizada pelos autores, a variação na geração de entropia é dada pela ingestão de nutrientes e pela idade. Para estimar a geração entrópica ao longo da vida, deve-se então aplicar uma análise na oxidação metabólica dos nutrientes consumidos, sendo eles carboidratos (CH), proteínas (P) e gorduras (F), mais conhecidos como macronutrientes.

As bases de dados são utilizadas para estimar a real demanda de energia para um típico indivíduo ao longo da vida. A demanda de energia é utilizada ao invés da taxa metabólica para que seja computado o gasto a mais gerado pela atividade física. Assim, deve ser estimado o requerimento diário de energia (EER, do inglês *Estimated Energy Requirements*) do corpo, em que são englobados o metabolismo basal e o acréscimo gerado pela atividade física em função do PAL (*Physical Activity Level*). Essa energia demandada é então contabilizada em quantidades de CH, P e F requeridas na alimentação. Uma vez tendo definido a quantidade ingerida, é possível encontrar a entropia gerada. Para tanto, considera-se que CH, F e P são modelados respectivamente como glicose, ácido palmítico e cadeia média de aminoácidos.

Pela Primeira Lei da Termodinâmica, a energia de um sistema se conserva e pode ser expressa por:

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum_k \{\dot{m}_k h_{T,k}\}_{in} - \sum_k \{\dot{m}_k h_{T,k}\}_{out} \quad (23)$$

em que $h_{T,k}$ corresponde à entalpia de cada produto, englobando energias interna, cinética, potencial e química a uma determinada temperatura T .

A segunda Lei da Termodinâmica é apresentada na Equação (24).

$$\frac{d\{S_{cv}\}}{dt} = \sum \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{\sigma}_{cv} \quad (24)$$

Pode ser unir a Primeira e Segunda Leis, e tem-se:

$$\frac{d\{E_{cv} - T_0 S_{cv}\}}{dt} = \dot{Q}_{rv} \left[1 - \frac{T_0}{T_{rv}} \right] + \sum_k \{\dot{m}_k \Psi_k\}_{in} - \sum_k \{\dot{m}_k \Psi_k\}_{out} - \dot{W}_{cv} - T_0 \dot{\sigma}_{cv} \quad (25)$$

em que disponibilidade Ψ_k (trabalho potencial energia ou exergia) [kJ/kg], é dada por:

$$\Psi_k(T, P, X_k, T_0) = [h(T, P) + ke + pe]_k - T_0 s_k(T, P) \quad (26)$$

em que \dot{m}_k é a vazão mássica do componente k , em kg/s, X_k é a fração molar do componente k em um gás ideal, T_0 é a temperatura do ambiente com o qual o sistema troca calor (temperatura de estado morto), T é a temperatura qualquer do nutriente e do ar em fluxo, P é a pressão qualquer do nutriente e do ar em fluxo, \dot{W}_{cv} representa todas as formas de trabalho desempenhadas pelo corpo (inclusive o de deformação durante o crescimento, a expansão e contração dos pulmões durante a respiração, dentre outros). As subscições cv e rv presentes nas equações correspondem ao volume de controle e do reservatório, respectivamente.

Desprezando as energias cinética e potencial e as entradas externas de calor, a disponibilidade energética pode ser aproximada à energia livre de Gibbs de cada componente. A energia livre de Gibbs é uma função G de cada constituinte químico k definida por $G_k = h_k - T_k s_k$, em que h_k é a entalpia e s_k é a entropia do constituinte, valores esses que são propriedades do componente quando definidos os valores de temperatura e pressão. Para sistemas reagentes que ocorrem naturalmente, a energia de Gibbs dos produtos é menor do que a dos reagentes.

$$\frac{d\{U_{cv} - T_0 S_{cv}\}}{dt} = \sum_k \{\dot{m}_k G_k\}_{in} - \sum_k \{\dot{m}_k G_k\}_{out} - \dot{W}_{cv} - T_0 \dot{\sigma}_{cv} \quad (27)$$

Considerando o regime permanente e que o sistema é ideal, a variação de Gibbs será dada pela diferença entre reagentes e produtos das três reações químicas envolvidas, sendo elas o metabolismo de carboidratos, gorduras e proteínas. Considera-se que a temperatura de ingestão de reagentes e eliminação dos produtos é equivalente à temperatura corporal T_b . Assim, a equação pode ser simplificada em:

$$\dot{W}_{cv,j} - \dot{m}_j \{G_{R,j} - G_{P,j}\} + T_b \dot{\sigma}_j = 0 \quad (28)$$

em que $j=CH, F, P$.

Em sistemas biológicos, como o metabolismo, a oxidação do componente j para a criação de moléculas de ATP apresenta uma eficiência quando comparada ao processo convencional de combustão, uma vez que parte da energia contida nos macronutrientes é convertida em energia química do ATP. Os valores das eficiências das três reações avaliadas estão apresentados na Tabela 2. A eficiência é dada por:

$$\eta_j = \frac{\dot{W}_{c,j}}{\dot{W}_{c,opt,j}} = \frac{\Delta G_{ATP,j}^0}{\Delta G_{c,j}^0} \quad (29)$$

Considerando uma reação qualquer, tem-se:

$$\dot{W}_{cv,j} = -\eta_j \dot{m}_j \Delta G_{c,j}^0 \quad (30)$$

$$\dot{W}_{cv} = -\sum_j \eta_j \dot{m}_j \Delta G_{c,j}^0 \quad (31)$$

Substituindo (30) em (27), simplificando e isolando o termo de geração entrópica, tem-se:

$$\dot{\sigma}(t) = \frac{\sum_j (1 - \eta_j) \cdot \dot{m}_j(t) \cdot (-\Delta G_{c,j}^0)}{T_b} \quad (32)$$

em que $j = CH, F, P$ e $\Delta G_{c,j} < 0$.

Segundo os autores, conclui-se então que, para menores valores de eficiência metabólica, como é o caso das proteínas, maior será a geração entrópica do processo.

A geração de entropia específica (por unidade de massa do corpo) com o tempo é dada por:

$$\sigma_m(t) = \frac{\dot{\sigma}(t)}{m(t)} [kJ/(kg \cdot s \cdot K)] \quad (33)$$

em que a geração entrópica e a massa do corpo seguem variando com o tempo.

A energia de Gibbs de cada macronutriente e a respectivas eficiências metabólicas são apresentadas na Tabela 2. Esses valores são definidos no balanço de energia com a consideração da oxidação completa (reação de consumo de oxigênio) das moléculas, com a liberação de gás carbônico, água e ATP. A temperatura T_b é a temperatura corporal que deve ser usada em Kelvin, considerada constante em 310,15K (37°C), uma vez que há uma consideração de que o sistema é isotérmico, já que variações bruscas desse valor não são toleradas pelo organismo.

Tabela 2 - Propriedades dos macronutrientes

Nutriente, j (Fórmula)	M_j [g/mol]	HHV_j [kJ/kg]	$h_{f,j}$ [MJ/kmol]	$\Delta G_{c,j}$ [kJ/kg]	$s_{298,j}$ [kJ/kmol]	η_j (eficiência metabólica %)
Glicose (C ₆ H ₁₂ O ₆)	180	15630	-1260	-16070	212,0	34,6
Aminoácido (C _{4,57} H _{9,03} N _{1,27} O _{2,25} S _{0,046})	119	22790	-385	-22430	--	10,4
Ácido Palmítico (C ₁₆ H ₃₂ O ₂)	256	39125	-835	-38465	452,4	32,2

Fonte: Adaptado de Silva e Annamalai (2009)

Os valores consumidos em massa de cada macronutriente variam ao longo da vida e do nível de atividade física da pessoa, uma vez que depende da demanda metabólica de cada um. O metabolismo, por sua vez, depende das condições fisiológicas do indivíduo.

Peso e altura foram estabelecidos de acordo com a base de dados CDC (Centers for Disease Control and Prevention, 2000) dos 0 aos 20 anos, considerando

a população média dos Estados Unidos pertencentes ao 50º percentil (*50th percentile*). Após essa idade, considera-se uma constância no peso e na altura.

Dados esses valores, utilizou-se de equações empíricas para a determinação do EER (IOM, 2002). As equações para cada faixa etária para o sexo masculino são descritas na Tabela 3, assim como o PA (*Physical Activity Coefficient*) para cada nível de atividade, resultando no TEE (gasto energético total, do inglês, *Total Energy Expenditure*). Para o estudo, Silva e Annamalai (2008) assumem que o perfil de baixa nível de prática de exercícios é a melhor representação de um indivíduo médio.

Tabela 3 – Correlações de EER em kcal/dia para um indivíduo médio masculino

EER para bebês e crianças, EER=TEE + Energia Disposta

0-3 meses	$(89 \times \text{Peso [kg]} - 100) + 175$
4-6 meses	$(89 \times \text{Peso [kg]} - 100) + 56$
7-12 meses	$(89 \times \text{Peso [kg]} - 100) + 22$
13-35 meses	$(89 \times \text{Peso [kg]} - 100) + 20$

EER para meninos de 3 até os 8 anos, EER=TEE + Energia Disposta

$$\text{EER} = 88,5 - 61,9 \times \text{Idade [anos]} + \text{PA} \times (26,7 \times \text{Peso [kg]} + 903 \times \text{Altura [m]}) + 20$$

Onde PA é: PA=1,00 (Sedentário); PA=1,13 (Pouco ativo); PA=1,26 (Ativo); PA=1,42 (Muito ativo)

EER para meninos de 9 até os 18 anos, EER=TEE + Energia Disposta

$$\text{EER} = 88,5 - 61,9 \times \text{Idade [anos]} + \text{PA} \times (26,7 \times \text{Peso [kg]} + 903 \times \text{Altura [m]}) + 25$$

Onde PA é igual à faixa de 3-8 anos de idade

EER para TEE para homens com 19 anos ou mais

$$\text{EER} = 662 - 9,53 \times \text{Idade [anos]} + \text{PA} \times (15,91 \times \text{Peso [kg]} + 539,6 \times \text{Altura [m]})$$

Onde PA é: PA=1,00 (Sedentário); PA=1,11 (Pouco ativo); PA=1,25 (Ativo); PA=1,48 (Muito ativo)

Fonte: Adaptado de Silva e Annamalai (2008)

De posse da recomendação das quantidades de carboidratos e de proteínas indicada em AMDR/AI (*Adequate Macronutrients Distribution Range/ Adequate Intake*) (IOM, 2002), elaborada a partir de dados estatísticos segundo um padrão alimentar ao longo da vida, e os valores de calor liberado na reação de cada grama desses macronutrientes, foi possível definir a quantidade de gordura a ser ingerida em função do valor de EER, ou seja, tendo as quantidade mássicas de carboidrato e proteína sido fixados em função da idade e sabendo quanto o corpo demanda no total de energia para a realização metabólica e seu funcionamento, calcula-se a necessidade em gramas de gordura, complementando a demanda de ingestão diária. Diz-se que a gordura atua como macronutriente de complementariedade.

Os valores estimados para o consumo de cada um dos macronutrientes em função da idade e do gênero são apresentados na Tabela 4. Tais valores são dados em gramas por dia.

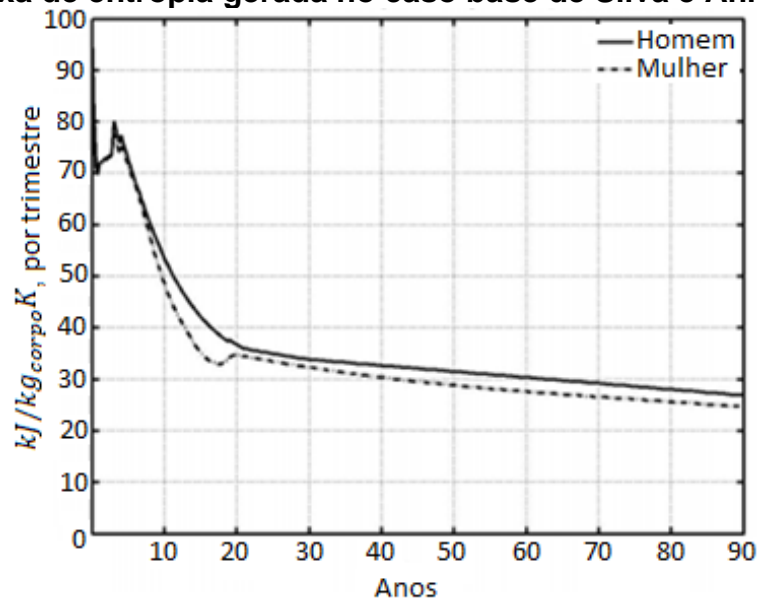
Tabela 4 - Ingestão diária recomendada de cada macronutriente

	Idade [anos]	Carboidrato [g/dia]	Gordura [g/dia]	Proteína [g/dia]
Recém nascidos	0-0,5	60	31	9,1
	0,5-1	95	30	13,5
Crianças	1-3	130	macronutriente de complementariedade (calculado posteriormente em função da demanda metabólica do indivíduo)	13
	4-8	130		19
Homens	9-13	130		34
	14-18	130		52
	>19	130		56
Mulheres	9-13	130		34
	14-18	130		46
	>19	130		46
Grávidas		175		71
Lactantes		210		71

Fonte: Adaptado de Silva e Annamalai (2008)

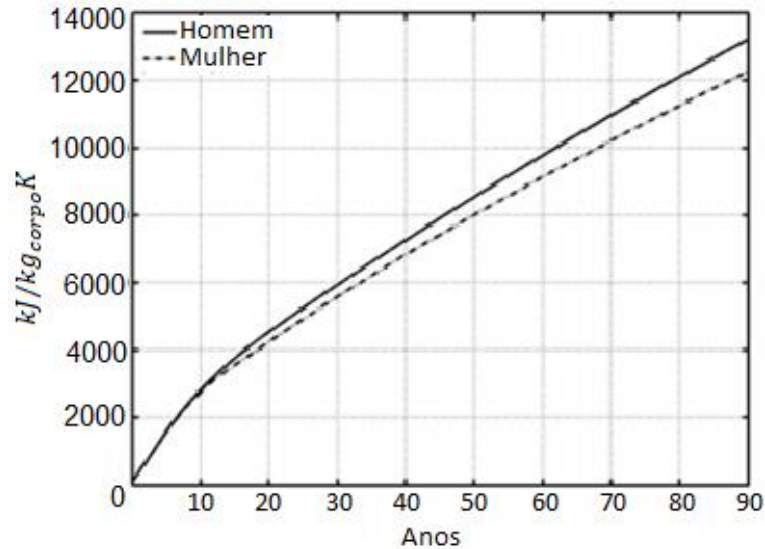
Com todos os valores definidos, é possível aplicar a Equação (32) e encontrar o valor da geração entrópica ao longo da vida. As Figuras 4 e 5 apresentam a taxa de geração entrópica e o valor acumulado para o caso base. A normalização pelo peso corporal deve ser feita para que seja possível a comparação entre diferentes indivíduos.

Figura 4 – Taxa de entropia gerada no caso base de Silva e Annamalai (2008)



Fonte: Adaptado de Silva e Annamalai (2008)

Figura 5 – Entropia gerada acumulada no caso base de Silva e Annamalai (2008)



Fonte: Adaptado de Silva e Annamalai (2008)

Segundo a CIA World Fact Book (*apud* Silva e Annamalai, 2008), os valores médios de duração de vida da população estadunidense são de 74,63 anos para os homens e de 80,36 anos para as mulheres. Integrando as curvas da Figura 4 de geração entrópica no tempo, construídas à partir do modelo de Silva e Annamalai (2008), é possível definir a entropia gerada acumulada para os casos base em avaliação, totalizando 11.508 kJ/kg.K para homens e 11.299 kJ/kg.K para mulheres. Desta forma, Silva e Annamalai (2008) assumem o valor de 11.404 kJ/kg.K como parâmetro de geração entrópica acumulada para estudos posteriores por eles feitos.

De acordo com a avaliação de Hershey (2010 *apud* Mady, 2014), o limite da geração entrópica acumulada seria de 10.025 kJ/kg.K para homens e 10.678 kJ/kg.K para mulheres. Silva e Annamalai (2008) avaliaram todos esses dados, agrupados na Tabela 5, e ressaltaram que a diferença para o valor encontrado por eles ocorre devido à consideração de taxa metabólica basal, uma vez que em Hershey (2010 *apud* Mady, 2014) é computada a atividade metabólica em repouso, a qual se difere da real taxa metabólica, em que o nível de atividade é levado em consideração.

Tabela 5 - Limite de geração entrópica acumulada

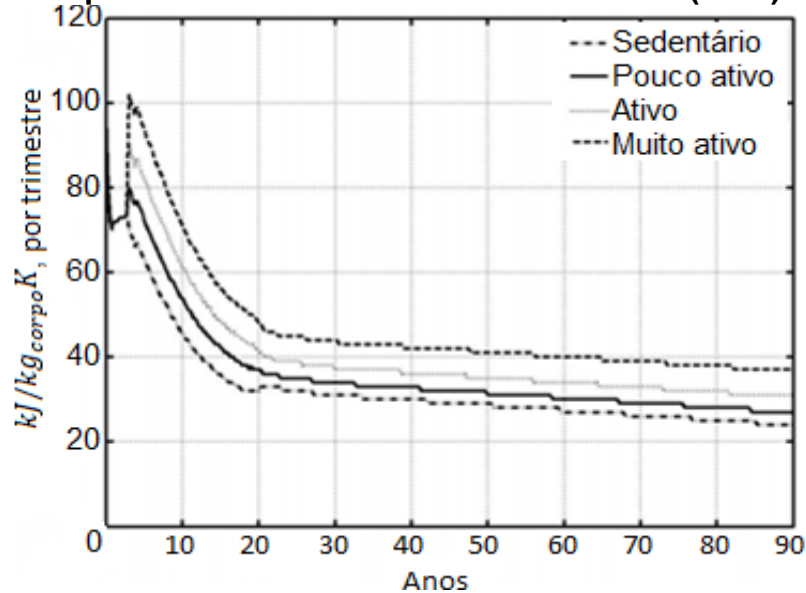
	<i>Homens</i>	<i>Mulheres</i>
<i>Hershey (2010 apud Mady, 2014)</i>	10.025 kJ/kg.K	10.678 kJ/kg.K
<i>Silva e Annamalai (2008)</i>	11.508 kJ/kg.K	11.299 kJ/kg.K

Fonte: Elaborado pela autora

Modificando o nível de atividade a partir da correção do fator PAL e mantendo constante o valor da geração entrópica acumulada, é possível prever a vida útil de

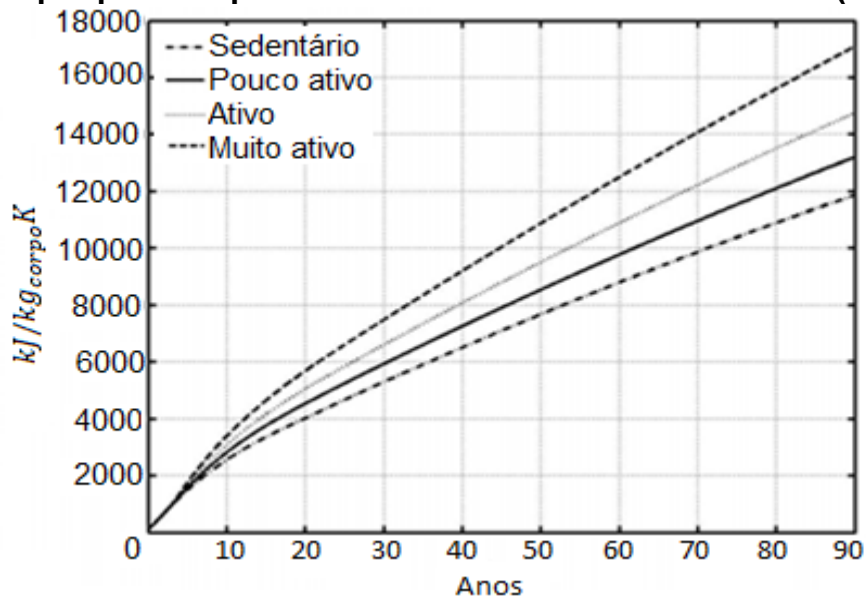
indivíduos com determinada carga de exercício. A Figura 6 apresenta uma comparação da taxa de geração entrópica para diferentes níveis de atividade.

Figura 6 – Geração entrópica para diferentes níveis de atividade física por peso corporal de acordo com Silva e Annamalai (2008)



Fonte: Adaptado de Silva e Annamalai (2008)

Figura 7 – Geração entrópica acumulada para diferentes níveis de atividade física por peso corporal de acordo com Silva e Annamalai (2008)



Fonte: Adaptado de Silva e Annamalai (2008)

Conforme apresentado na Figura 7 e concluído pelos autores, o nível de atividade possui efeito significativo na expectativa de vida, uma vez que o aumento do PAL faz com que o limite de entropia seja atingido mais rapidamente. Desta forma, a atividade física acarretaria na diminuição da vida. Na Tabela 6, são apresentados os valores de expectativa de vida definida pelos autores em função do PAL.

Tabela 6 - Mudança na expectativa de vida em função do PAL

Caso	Homens	Mulheres
Sedentário	85,05	95,75
Pouco ativo (base)	73,78	81,61
Ativo	63,78	69,53
Muito ativo	53,20	57,68

Fonte: Adaptado de Silva e Annamalai (2008)

Silva e Annamalai (2009) também realizaram estudos para analisar o impacto da variação da composição das dietas na geração entrópica. Enquanto para carboidratos e gorduras a variação das proporções pouco afeta na geração de entropia, a mudança da quantidade de proteína acaba por gerar forte mudança; isso é justificado pela baixa eficiência metabólica das cadeias proteicas. A redução na proporção de proteína ao mínimo necessário no dia elevou em aproximadamente 3 anos a expectativa de vida. Por outro lado, dietas com restrição calórica apresentaram-se muito mais impactantes na expectativa de vida, de forma que, com o devido controle, atingiu-se um aumento de 20,44 e 23,96 anos na expectativa de vida de homens e mulheres, respectivamente.

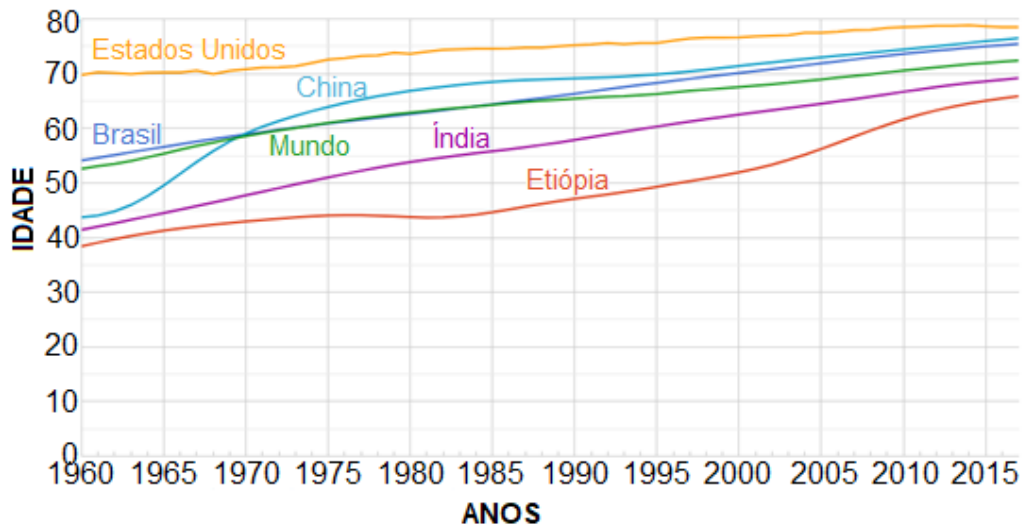
Vale ressaltar que esses dados levam em consideração o simples equacionamento entre as variáveis, não averiguando o impacto metabólico e funcional de determinadas limitações dietéticas, em especial no que tange as patologias envolvidas na redução da ingestão proteica.

2.2 Relação entre a prática de atividade física, as patologias desencadeadas e a expectativa de vida

Visto que o objetivo do presente trabalho é relacionar a geração entrópica do corpo humano com a longevidade e a prática de atividade física, fez-se necessária a busca por dados sobre mortalidade e expectativa de vida. Essa abordagem deve ser focada nas patologias e problemas desenvolvidos pela falta de exercício, e como esses podem impactar na geração entrópica.

Segundo dados do Banco Mundial (2020, em *Public Data* – Google, 2020), a expectativa de vida média mundial é de 72,38 anos, sendo de 70,21 anos para homens e 74,7 anos para mulheres. A Figura 8 apresenta a expectativa de vida em alguns países e a média mundial desde 1960.

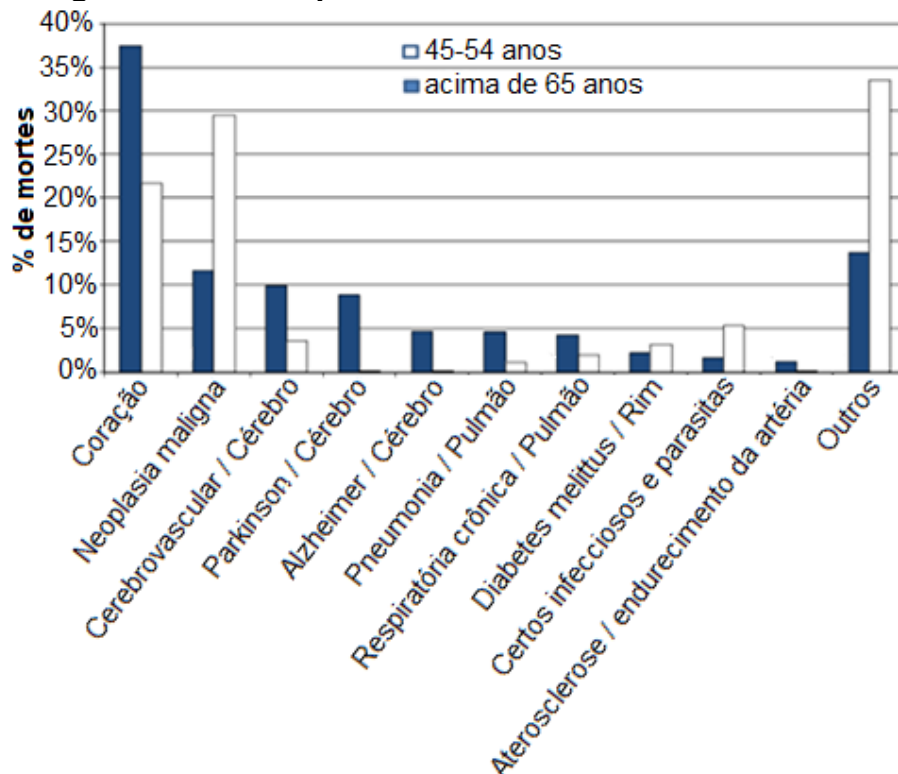
Figura 8 - Histórico da expectativa de vida em alguns países e no mundo



Fonte: Public Data – Google (2020) segundo Banco Mundial (2020)

De acordo com Annamalai e Silva (2012), a idade é um fator fortemente responsável pela morte natural, como pode ser observado na Figura 9. O envelhecimento está associado à redução das funções cardíacas, renais, pulmonares, hepáticas, mentais e do sistema imune. Na idade de 70 anos, por exemplo, as funções renais são reduzidas em aproximadamente 50% se comparadas a de um indivíduo de 30 anos (Ebersole *et al.*, 2003 *apud* Annamalai e Silva, 2012).

Figura 9 – Mortes por causa natural com dados de 2001



Fonte: Adaptado de Annamalai e Silva (2012)

Para tanto, de acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS ou WHO, do inglês *World Health Organization*) (2018), são recomendados um mínimo de 150 minutos de atividade física de intensidade moderada ou pelo menos 75 minutos de atividade física intensa por semana. Para que sejam concretizados benefícios adicionais à saúde, adultos entre 18 e 64 anos devem realizar 300 minutos de atividade física em nível moderado por semana.

Essas recomendações são feitas pois o adequado nível de atividade física possibilita a melhora de diversos sistemas no corpo humano, como o cardiorrespiratório, reduz os riscos do desenvolvimento de diversas doenças, como hipertensão, diabetes, vários tipos de câncer e depressão, além de ser essencial para o balanço de energia e controle de peso. A insuficiência de atividade física é um dos principais fatores de risco para a mortalidade e um dos principais responsáveis pelo aumento da incidência de doenças silenciosas (as NCDs, do inglês *noncommunicable diseases*). Pessoas que são insuficientemente ativas apresentam um risco aumentado de 20 a 30% de morte, se comparado com ativas. (OMS, 2018)

Em novembro de 2020, a OMS lançou as novas diretrizes sobre atividade física e comportamento sedentário. Reafirmou-se que a necessidade da prática de 150-300 minutos de atividade por semana para adultos e uma média de 60 minutos diários para crianças e adolescentes, visando a saúde física e mental. Segundo Tedros Adhanom Ghebreyesus, diretor geral da OMS: “Ser fisicamente ativo é fundamental para a saúde e o bem-estar e pode adicionar anos à vida e vida aos anos. Cada movimento conta, especialmente agora que gerenciamos as restrições da pandemia de COVID-19. Devemos todos nos mover todos os dias - com segurança e criatividade”. (OPAS, 2020)

Nieman e Wentz (2019) afirmam a prática diária de exercício físico fortifica a atividade do sistema imune e a saúde metabólica, pois é capaz de estimular mais as células deste sistema e incentiva uma maior circulação celular pelos tecidos. Os autores também relatam que a atividade física habitual acarreta em uma maior regulação do sistema imune e retarda a imunosenescência. Imunosenescência é definida como a desregulação do sistema imunológico devido à idade, deixando o corpo mais susceptível a infecções, doenças autoimunes e desordens neurológicas e reduzindo a eficácia de vacinas.

Estudos recentes evidenciam que a imunosenescência é fortemente impactada pelas interações do indivíduo com o meio e com seu estilo de vida. Conforme Weyh

et al. (2020), a prática regular de exercícios físicos de resistência é a mais efetiva maneira de neutralizar o envelhecimento do sistema imune e a inflamação celular.

Após avaliação populacional, Leskinen *et al.* (2018) afirmaram que a melhoria de saúde e o prolongamento de vida sem a incidência de doenças crônicas estão claramente associados à prática de atividade física para homens e mulheres. Lee *et al.* (2017) concluíram que corredores tem um risco de morte de 30-45% menor do que não-corredores. Além das melhorias notadas nos sistemas neurológicos e respiratórios, estes autores ressaltam que a prática de corrida acomete em outros hábitos saudáveis, como manter um peso corporal adequado, não fumar e consumir moderadamente bebidas alcóolicas.

Estudo conduzido por Dhana *et al.* (2016), relaciona o efeito de diferentes atividades na longevidade. O estudo se baseou em dados disponíveis na literatura para a construção de modelos estatísticos para o cálculo da expectativa de vida. Foi concluído que níveis de atividade física mais elevados estão associados à elevação da expectativa de vida e mais anos vividos sem a incidência de doenças cardiovasculares.

A Tabela 7 compila os resultados obtidos por Dhana *et al.* (2016) na elevação de expectativa para diferentes atividades, sendo que a separação entre os níveis de atividade é dada em função do tempo semanal de prática.

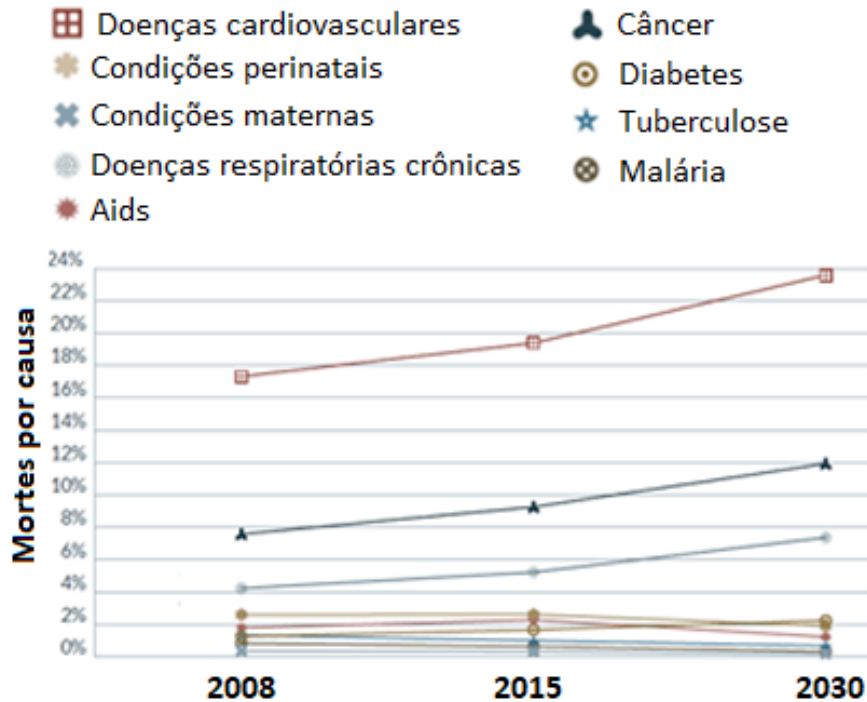
Tabela 7 - Aumento de expectativa de vida por atividade por gênero em anos

Atividade	Nível	Homens	Mulheres
Caminhada	<i>Moderado</i>	1,3	0,8
	<i>Intenso</i>	1,3	0,7
Ciclismo	<i>Moderado</i>	2,1	2,4
	<i>Intenso</i>	3,7	2,1
Trabalho doméstico	<i>Moderado</i>	1,3	1,4
	<i>Intenso</i>	1,1	2,6
Esportes	<i>Moderado</i>	3,1	1
	<i>Intenso</i>	1,2	0,9
Jardinagem	<i>Moderado</i>	2,7	1,1
	<i>Intenso</i>	2,7	0,3

Fonte: Adaptado de Dhana *et al.* (2016)

Paralelamente, segundo dados da OMS (2015 *apud* Henriques, 2018) apresentados na Figura 10, nota-se um crescimento nas mortes atribuídas, em especial, às doenças cardiovasculares, ao câncer e às doenças respiratórias crônicas. Pelos estudos, estima-se que essas patologias serão cada vez mais responsáveis pelos óbitos em âmbito mundial.

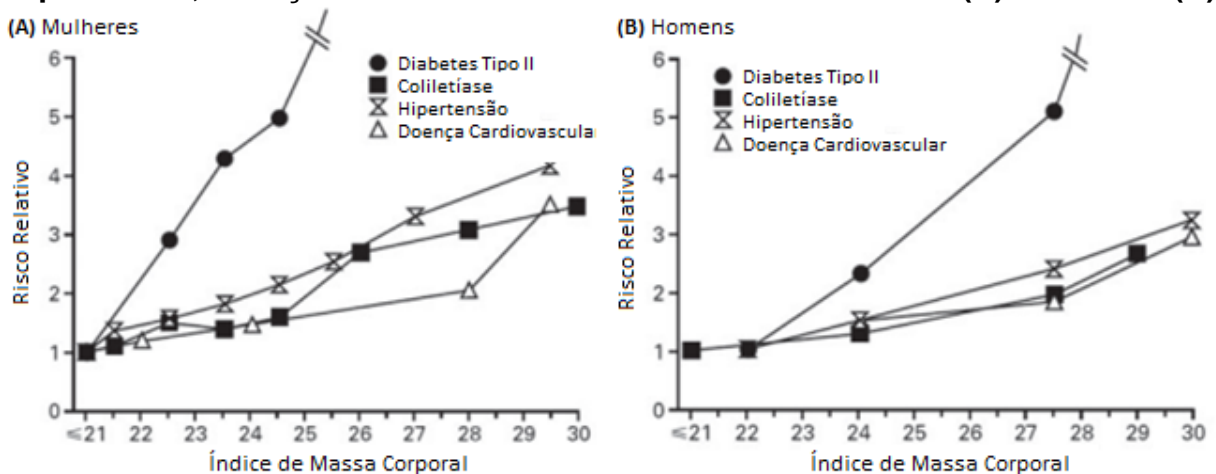
Figura 10 – Variação anual da porcentagem de mortes atribuídas a cada doença



Fonte: Henriques (2018) adaptado de WHO (2015)

Willet *et al.* (1999) evidenciaram que existe uma forte e linear associação entre Índice de Massa Corporal (IMC ou BMI, do inglês *Body Mass Index*) e desenvolvimento de diabetes tipo II, hipertensão, doença cardiovascular e colelitíase (pedra na vesícula) em homens e mulheres, como apresentado na Figura 11. Além disso, foi comprovado que o excesso de adiposidade contribui com a incidência e/ou a morte por câncer, complicações renais e hepáticas (Calle e Kaaks, 2004).

Figura 11 – Relação entre o IMC e o risco relativo de diabetes tipo II, hipertensão, doença cardiovascular e colelitíase em mulheres (A) e homens (B)



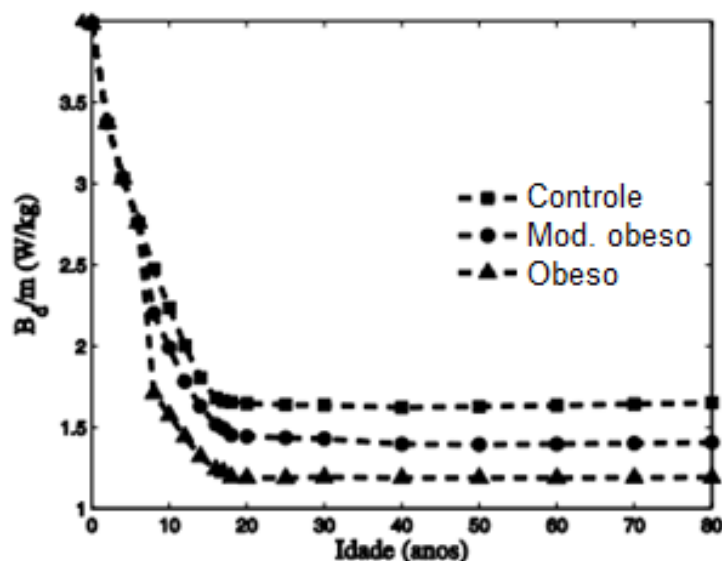
Fonte: Adaptado de Fontana e Hu (2014)

Segundo Fontana e Hu (2014), o ganho de peso nos jovens adultos (dos 18 aos 25 anos) é o principal fator que leva a um desenvolvimento de patologias crônicas. Assim os autores sugerem que as pessoas sejam fisicamente ativas, para que possam ser reduzidos os diversos impactos negativos do sobrepeso e da obesidade na saúde.

Estudos comparando uma mulher magra (IMC 18,5 - 22,9) com uma mulher obesa (IMC ≥ 30) afirmam que a segunda tem 79% menor chance de sobrevivência saudável acima dos 70 anos (The Nurses' Health Study (NHS), Sun *et al.*, 2009).

Sob a perspectiva das Leis Termodinâmicas, Henriques (2018) simulou o impacto da obesidade na destruição exérgica. No modelo utilizado, a espessura da camada de gordura foi modificada para as situações de controle, sendo elas “moderadamente obeso” e “obeso”. Segundo os resultados encontrados, o aumento de peso ocasionado pelo aumento de massa de gordura gera um acréscimo na exergia destruída total, devido à elevação do metabolismo exérgico. No entanto, quando avaliada a taxa de exergia destruída por massa, percebe-se que o incremento de massa se sobressai ao aumento na exergia metabólica, fazendo com que a taxa de exergia destruída em obesos seja proporcionalmente menor do que nos indivíduos do grupo controle, como apresentado na Figura 12. Com isso, conclui-se que obesos levariam mais tempo para atingir o limite de exergia destruída, ampliando a expectativa de vida. A autora ainda ressalta que o modelo utilizado não leva em consideração as alterações fisiológicas ocasionadas pela obesidade, como estreitamento de artérias, acúmulo de gordura visceral e disfunções hormonais.

Figura 12 - Taxa de exergia destruída pela idade para grupo controle, moderadamente obeso e obeso

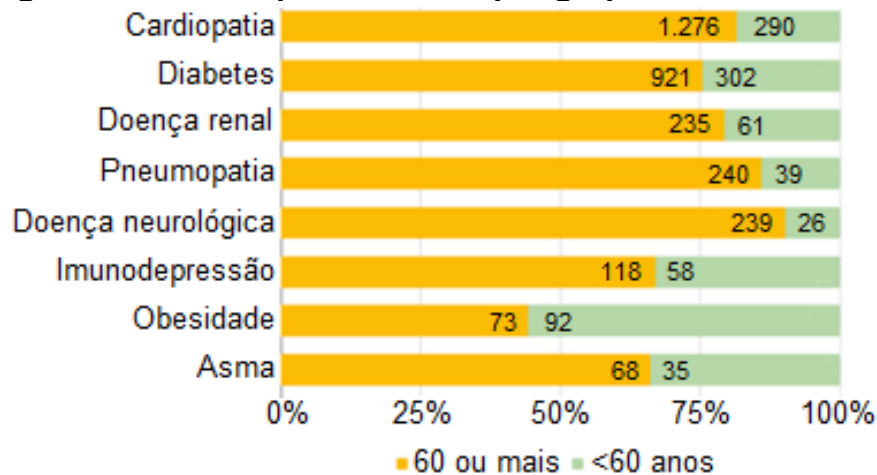


Fonte: Henriques (2018)

Nessa mesma linha, Garcia *et al.* (2016) e Garcia *et al.* (2018) propõem um modelo do corpo humano visando uma análise comparativa do efeito de destruição de exergia com a variação da composição corporal em busca do maior conforto térmico do indivíduo. Segundo Garcia *et al.* (2016), existe uma relação linear entre a sensação térmica e a destruição exérgica, sendo que o tecido muscular apresenta maior interferência nessas sensações. De acordo com as avaliações dos autores, um corpo com maior massa de músculo (menor massa de gordura) apresenta maiores valores de exergia destruída devido ao incremento metabólico que ocorre com o aumento de massa magra. Com isso, pode-se dizer que uma pessoa com mais massa muscular tem uma expectativa de vida menor.

No entanto, além de já ser associada a patologias que são fatores de risco para o COVID-19 (2019 Novel of Corona Virus Disease), como a cardiopatia e a diabetes, a obesidade foi apontada como o principal fator associado aos óbitos por menores de 60 anos pelo novo corona vírus, segundo divulgação da Faculdade de Medicina da UFMG (2020). De acordo com os dados do Boletim Epidemiológico Especial do Ministério da Saúde de abril de 2020 apresentados na Figura 13, mais da metade das pessoas obesas que haviam morrido pela doença tinham menos de 60 anos

Figura 13 – Óbitos por COVID-19 por grupo de risco no Brasil



Fonte: Ministério da Saúde (2020)

Segundo Josemar de Almeida (Faculdade de Medicina da UFMG, 2020), professor do Departamento de Clínica Médica da Faculdade de Medicina da UFMG, o tecido gorduroso visceral é altamente inflamatório e produtor de substâncias que aumentam a situação inflamatória do organismo, o que contribui para o agravamento da situação do coronavírus, uma vez que o COVID-19 causa uma inflamação do pulmão. Assim, o indivíduo é mais propenso a demandar de respiração ou ventilação

mecânica. Ele ressalta que essa explicação é baseada nos dados e estudos já disponíveis e que, pelo vírus ser muito recente, ainda não existe uma comprovação, mas que a associação se mostrou verídica.

Laddu *et al.* (2021) sugerem que a prática de exercícios físicos é capaz de reduzir a gravidade de patologias virais, como a COVID-19. De acordo com Silveira *et al.* (2020), apesar da falta de dados acerca do novo coronavírus, existem evidências de que a prática regular de exercícios reduz a intensidade dos sintomas e o risco de morte por doenças respiratórias.

Toss *et al.* (2012) conduziram um estudo de dois anos com 921 pessoas acima de 65 anos com o intuito de relacionar a composição corporal com as causas de morte. As massas de gordura e de músculo foram aferidas ao longo do tempo do estudo. Durante o experimento, 397 participantes morreram e obteve-se que as causas mais comuns de morte são por doenças cardiovasculares (41%), doenças respiratórias (14%) e câncer (13%).

Os resultados das avaliações sugerem que a massa magra do corpo é um melhor preditor de mortalidade em indivíduos mais velhos do que a quantidade de gordura por si, tal como é afirmado em outros trabalhos. Sobrepeso e obesidade estão associados ao aumento do risco de mortalidade em adultos. No entanto, em pessoas mais velhas, os níveis um pouco mais altos de gordura estão associados à longevidade, já que a gordura atua como uma camada a mais de proteção do corpo, além de ser fonte de energia. Os autores, assim como citado em outros trabalhos, chamam a atenção apenas para que os níveis de gordura sejam controlados, em especial a gordura abdominal.

Segundo Winett e Carpinelli (2000), regularidade na atividade física está associada à manutenção de massa magra e negativamente associada à hipertensão, alto nível de colesterol, diabetes tipo II e mortalidade. Desta forma, entende-se que o aumento no risco de mortalidade associado à baixa quantidade de massa magra pode ser associado aos baixos níveis de atividade física.

Mesmo em indivíduos fisicamente ativos, a massa muscular apresenta uma queda com o avanço da idade, justificado por possíveis variações hormonais e ingestão inadequada de aminoácidos (Marcell, 2003). Além disso, existe uma clara relação entre a perda de massa muscular e a perda de independência, o que contribui para quedas, fraturas e hospitalizações (Fried *et al.*, 2001). A perda de funções do sistema musculoesquelético está associada à queda de capacidade de outros

sistemas. Assim, a queda na massa muscular pode indicar a condição das funções biológicas.

Mady (2014) afirma que o ser humano sob condições basais depois da atividade física é mais eficiente do que antes da atividade (mesmo que por curto período de tempo), devido à adaptação que o corpo sofre com o início e a parada da atividade. Além disso, de acordo com um procedimento experimental conduzido por Mady *et al.* (2013) com corredores em diferentes níveis de treinamento (e consequente diferença no nível metabólico), concluiu-se que, para uma mesma velocidade, indivíduos com um melhor condicionamento apresentam menores perdas para o meio e que, para uma mesma quantidade de exergia destruída, uma pessoa mais bem treinada desenvolve maior percentual de trabalho.

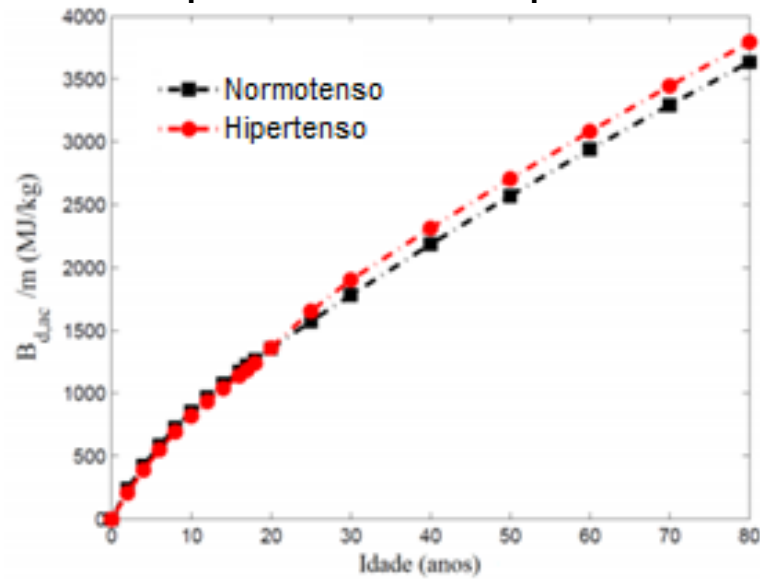
Já em Albuquerque Neto *et al.* (2010) foi feita uma análise dos sistemas que integram o corpo humano, em função do sistema circulatório e transporte de gases, e notou-se que os tecidos se tornam mais eficientes quando em atividade física, apesar do pulmão apresentar uma pequena queda de eficiência.

Tendo em vista que as doenças de coração são as maiores responsáveis por óbitos e que a hipertensão é uma das principais consequências da obesidade, Henriques (2018) baseou-se em modelos previamente presentes na literatura para relacionar termodinamicamente o impacto das patologias desse órgão à expectativa de vida. Assim, foi definido um modelo matemático com as considerações do coração como um sistema de operação contínua e fluxos de entrada e de saída para os balanços energético e exergético. A autora considerou o coração como uma bomba e, para tanto, os valores de pressão sistólica e diastólica seriam utilizados para definir a potência do sistema. Dessa forma, foi possível comparar uma operação normal com uma situação de hipertensão.

“O valor de pressão sistólica será corrigido em 34,9% para os hipertensos, enquanto a pressão diastólica será admitida como 29,3% superior, de acordo com os dados experimentais de Frohlich *et al.* (1983). Os valores de metabolismo do coração serão considerados, conforme apontado por Strauer (1979), 35,4% maior para hipertensos.” (HENRIQUES, 2018)

Segundo os resultados do modelo, a hipertensão eleva a destruição de exergia em 1,8 W, como pode ser observado na Figura 14. Supondo uma situação em que o indivíduo comece a apresentar o quadro patológico aos 30 anos, a destruição de exergia acumulada acarretaria em uma redução de 4,4 anos na expectativa de vida.

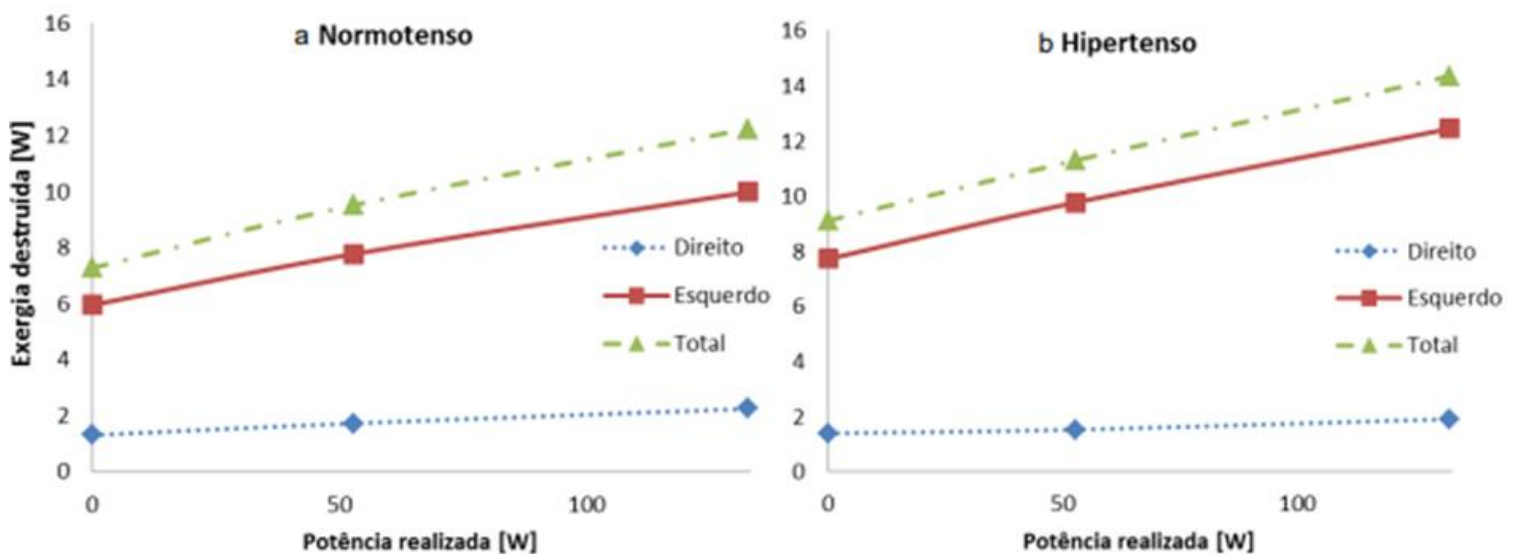
Figura 14 – Exergia destruída acumulada por unidade de massa em função da idade para normotensos e hipertensos



Fonte: Henriques (2018)

No caso da atividade física, o aumento da vazão de sangue também contribui para o aumento da exergia destruída. Entre normotensos e hipertensos, o acréscimo sofrido pela exergia destruída no coração é de 24,0%, 18,0% e 16,7% para, respectivamente, repouso (potência realizada de 0 W), caminhada (potência realizada de 50 W) e corrida (potência realizada de 100 W), como apresentado na Figura 15. (HENRIQUES, 2018)

Figura 15 – Comparativo da taxa de exergia destruída em função da potência realizada pelo corpo para normotensos (a) e hipertensos (b)



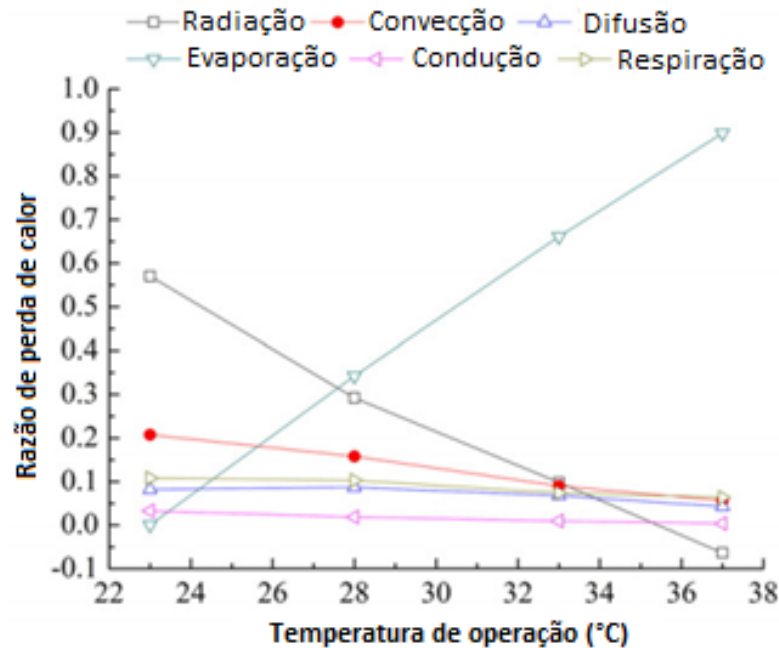
Fonte: Henriques (2018)

2.3 Avaliação de trocas térmicas pelo corpo humano

Uma vez que este trabalho busca avaliar a interação entre o corpo e o meio ambiente, as formas de troca térmica devem ser compreendidas. Em especial, deve-se analisar as principais maneiras com que o indivíduo perde calor para o seu entorno.

Em Wang *et al.* (2016), avaliou-se o comportamento do corpo humano e suas respectivas emissões de calor quando submetido a diferentes temperaturas do ambiente. Pela análise de perda de calor de todo o corpo, os autores concluíram que as perdas aumentam com um acréscimo na temperatura ambiente; detectou-se que a perda por radiação e por convecção são reduzidas, as perdas por condução, respiração e difusão permanecem quase constantes e as perdas pela evaporação tem um aumento. Os resultados do experimento são apresentados na Figura 16.

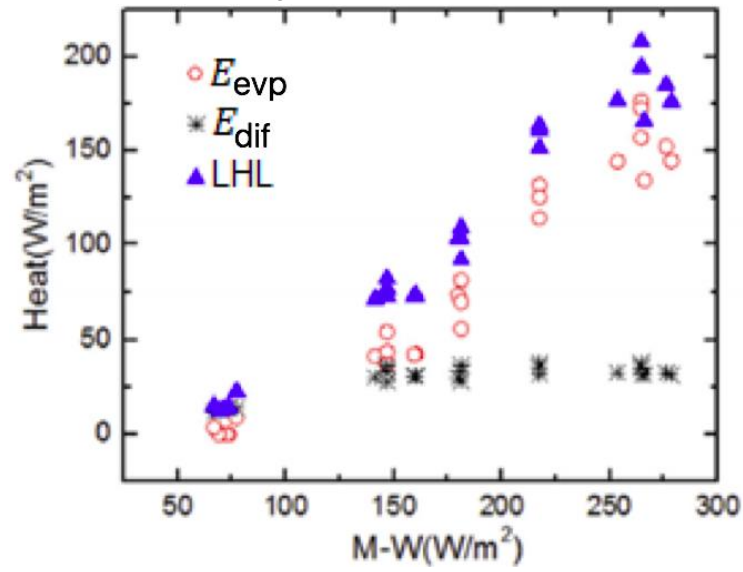
Figura 16 - Razão de perda de calor no corpo todo em diferentes temperaturas



Fonte: Adaptado de Wang *et al.*, 2016

Em um experimento realizado por Wang e Hu (2018), foi medido calor latente perdido (LHL, do inglês *Latent Heat Loss*), composto pelo calor perdido pela pele por difusão E_{dif} e por evaporação E_{evp} , sob diferentes graus de atividade física. Notou-se que a elevação do nível da atividade faz com que o calor latente total aumente, sendo que a perda por evaporação cresce proporcional ao nível da atividade enquanto a perda por difusão se manteve quase constante, conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 - LHL em função do calor gerado pelo corpo (M-W)



Fonte: Adaptado de Wang e Hu (2018)

3 METODOLOGIA

Durante todo o desenvolvimento do estudo, uma revisão bibliográfica foi realizada objetivando o conhecimento das metodologias empregadas na descrição do processo de interesse. Com isso, foram identificados e estudados os modelos de Rahman (2007) e de Silva e Annamalai (2008). Visto que o modelo de Rahman (2007) se baseou fortemente no modelo de Aoki (1989), esse também foi estudado e avaliado. A validação de todos os modelos foi feita a partir da comparação, então, das expectativas de vida obtidas pelo cálculo entrópico e pelos dados disponíveis para valores médios mundiais. As reproduções dos modelos e comparações de dados foram feitas com o uso do programa Microsoft Office Excel. Isso foi necessário para que fosse avaliada a verossimilhança dos mesmos.

Outra parte da revisão bibliográfica foi concentrada no impacto da prática (ou da não prática) da atividade física para a expectativa de vida, assim como as recomendações de órgãos competentes para tal hábito. A avaliação de patologias desencadeadas pela falta de atividade fez-se, então, necessária, possibilitando a comparação de condições de vida em diversas situações e panoramas.

De posse dos modelos, fez-se uma comparação para a definição da estrutura a ser aprimorada. Neste ponto foram feitas as análises e sugestões para a melhoria do modelo, de forma a obter uma modelagem mais ampla da situação avaliada. Todas as modificações propostas foram fundamentadas em dados e definições encontrados na bibliografia. Buscou-se por alterações que tivessem pertinência com o que era defendido e objetivado a ser contemplado pelo presente trabalho.

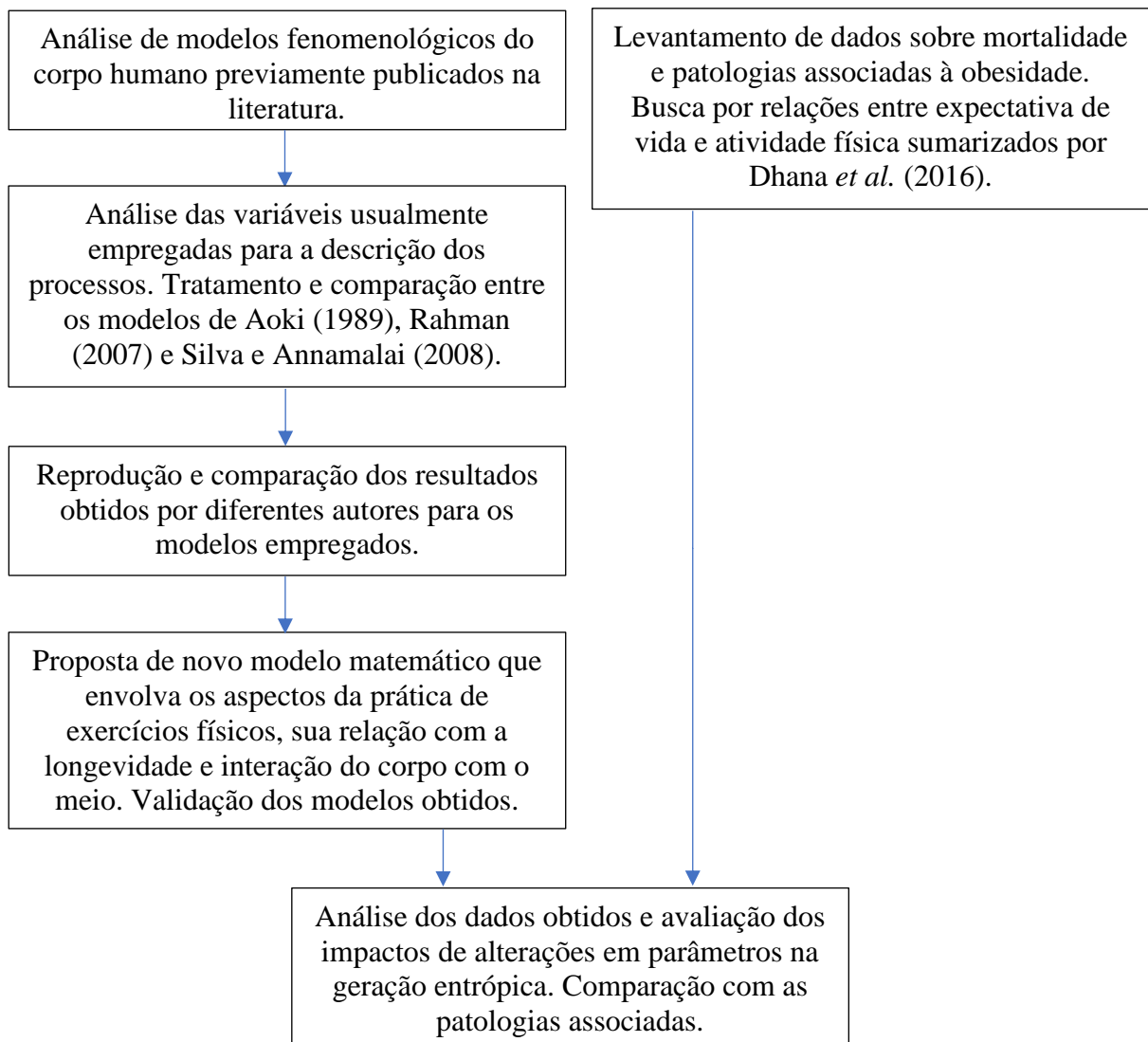
Como fruto dessa modelagem, a validação de dados gerados é necessária, avaliando-se a expectativa de vida para o caso base proposto. Desta forma, posteriormente foi possível fazer as comparações de situações, hábitos e variações corporais para que fossem definidas as expectativas entrópicas de vida. Assim, foram avaliados os ganhos proporcionados pela atividade física na longevidade descritos em Dhana *et al.* (2016) pela perspectiva entrópica. Com isso, foram feitas as análises e estabelecidas novas definições para o conceito de limite de geração entrópica acumulada.

Para que fosse definido o limite da geração entrópica para os casos mencionados, foi utilizado o método dos trapézios para a integração das curvas. O método dos trapézios é a primeira fórmula de integração fechada de Newton-Cotes

(Chapra e Canale, 2011). As formulas de Newton-Cotes são a maneira mais comum de se realizar integrações numéricas. A Regra dos Trapézios aproxima os dois pontos de extremidade do intervalo de integração, que são conhecidos, por um polinômio de primeiro grau. Dessa forma, a integral será dada pela área do trapézio formado sob a curva, ou seja, o produto entre largura e altura média.

Na Figura 18, apresentam-se as etapas realizadas para a concretização do estudo.

Figura 18 - Fluxograma da metodologia proposta



Fonte: Elaborado pela autora

3.1 Comparação entre dados obtidos pelos modelos

Para efeito de comparação entre os modelos, buscou-se fazer uma reprodução dos dados obtidos seguindo as metodologias recomendadas e os dados apresentados nos trabalhos pelos autores. Assim, tornou-se possível a real comparação entre o que fora apresentado por Rahman (2007) e por Silva e Annamalai (2008). Além do paralelo

entre os modelos, foi possível avaliar o grau de detalhamento empregado por cada autor para descrever o sistema e a verossimilhança dos dados obtidos de geração entrópica com valores reais de expectativa de vida.

Para o modelo de Aoki (1989) foi feita apenas uma conferência dos dados e das equações descritas pelo autor. Isso se deve ao fato de que, para a definição do valor da entropia gerada segundo o modelo, Aoki (1989,1990) utiliza de dados experimentais reportados por Hardy e DuBois (1938), aferidos para um indivíduo em específico em um calorímetro associado a outros equipamentos.

Com isso, foi possível acompanhar a metodologia apresentada por Aoki (1989) enquanto feita a reprodução do modelo e comparação dos valores descritos, seguindo-se as etapas detalhadas no trabalho. Desta forma, definiu-se a entropia associada às trocas de energia, às trocas mássicas e à eliminação de calor pelo corpo, iguais a, respectivamente, $-0,298 \text{ J/s.K}$, $-0,20 \text{ J/s.K}$ e $-0,059 \text{ J/s.K}$. Na verificação, os valores e as operações apresentados estão de acordo com o que foi obtido, igual a $0,259 \text{ J/s.K}$ para a geração entrópica.

Da mesma forma, utilizando dados aferidos por Hardy *et al.* (1938 *apud* Aoki, 1989) e por DuBois (1939 *apud* Aoki, 1989) para as trocas realizadas durante a prática de atividade física, foi possível definir o incremento entrópico ocasionado pela prática. Segundo Aoki (1989), a prática de atividade física eleva de 1,5 a 2,4 vezes a geração entrópica, tendo atingido o valor de $0,491 \text{ J/s.K}$ para o indivíduo avaliado. Esse valor foi, igualmente, verificado e condizente com o que fora definido.

3.1.1 Modelo Rahman (2007)

Para que fosse possível a comparação entre os dados reportados por Rahman (2007) e os encontrados pela reprodução realizada neste estudo, foram utilizados os mesmos parâmetros estabelecidos pelo autor para o caso base, como peso, altura e área de pele, assim como o mesmo nível de atividade de pouco ou nenhum exercício, acarretando em um fator de atividade de 1,2. Com esses valores, foi possível definir a taxa metabólica do indivíduo em questão.

Vale ressaltar que, mesmo sendo a equação mais utilizada para o cálculo metabólico, as equações de Harris e Benedict (1918) empregadas por Rahman (2007) não levam em consideração as diferentes composições corporais, podendo gerar uma distorção na descrição dos sistemas reais. Além disso, essas equações são destinadas ao cálculo metabólico para pessoas com peso entre 25 e 124,9 kg, altura

entre 1,51 e 2m e idade de 21 aos 70 anos, não contemplando adequadamente o indivíduo ao longo de toda a vida. No entanto, o autor não cita outras maneiras da realização do cálculo.

Rahman (2007) considera para os cálculos que o vento esteja a 2 m/s em um ambiente com convecção forçada e, segundo avaliação de dados pela Tabela 1, a vestimenta do tipo “shorts” é considerada pelo caso base, uma vez que o autor considera um Clo de 0,46. Esse procedimento teve de ser feito para que fosse definido o fator i_m/Clo , que não fora mencionado pelo autor, mas é necessário para o estabelecimento dos valores das variáveis de entrada do modelo proposto por Rahman (2007). Além disso, considerou-se a temperatura ambiente T_a em 27°C, equivalendo a uma pressão de vapor no ar $\phi_a P_a$ igual a 26,7 mmHg pela Equação de Tetens, explicitada na Equação (16). Assim, foi possível definir os valores de temperaturas corporais em função das equações de Givoni e Goldman (1972) e de Burton e Bazett (1936).

Percebeu-se que os valores de temperatura retal, de pele e corporal definidos pelas equações correspondem a valores condizentes com a realidade. Segundo levantamento realizado por Sund-Levander *et al.* (2002), a temperatura retal varia entre 34,4 – 37,8 °C. De acordo com o experimento de Cotes (1955), o corpo atinge uma temperatura máxima de 38,39°C durante o exercício físico, graças aos mecanismos de refrigeração e ventilação do organismo. Essas informações possibilitam a confirmação de que, até esse ponto, a metodologia sugerida por Rahman (2007) é consistente.

Contudo, chama-se a atenção para o fato de que a Equação (12) utilizada por Rahman (2007) apresenta um pequeno desvio da equação originalmente apresentada por Givoni e Goldman (1972). No trabalho de referência, a temperatura retal é definida como $T_r = 36,75 + 0,004(M - W_{ex}) + (0,025/Clo)(T_a - 36) + 0,8e^{0,0047(E_{req} - E_{max})}$, em que W_{ex} é o trabalho externo realizado pelo corpo. Este valor aparentemente não fora considerado por Rahman (2007) nas operações.

De acordo com Givoni e Goldman (1972), o trabalho externo realizado pelo corpo (W_{ex}) é compreendido como a parcela de energia despendida que não é perdida como calor, mas sim convertida em trabalho, como para o levantamento de peso, por caminhar ou por apenas sustentar o próprio peso. Os autores afirmam que esse trabalho deve ser convertido em calor equivalente e então subtraído da taxa

metabólica total. Segundo estimado, esse valor é aproximadamente de 1400W, no caso de corrida e carregamento de grandes pesos, e de 105W, no caso de repouso.

Visto que Rahman (2007) não considera essa parcela, a reprodução desse modelo no presente trabalho também não o fará, uma vez que o cálculo do trabalho externo dependeria de muitas considerações que não são feitas e/ou apresentadas no detalhamento do modelo. Ressalta-se apenas que o resultado obtido apresentará um desvio da realidade.

No balanço mássico foram utilizados os dados de fluxo de entrada e saída de Walker (1991 *apud* Rahman, 2007), descritos na Figura 2, e os valores de entropia de substância, apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Entropia de substâncias a 300K

<i>Substância</i>	<i>Entropia [J/gK]</i>
O_2	6,4168
CO_2	4,8631
$H_2O_{(g)}$	10,4936

Fonte: Adaptado de Borgnakke e Sonntag (2009) (Tabelas A.6 e A.7)

Os valores calculados para os coeficientes de troca térmica por evaporação e por convecção, iguais respectivamente a 17,42 W/m²K e 10,56 W/m²K, apresentam-se compatíveis com aqueles encontrados na literatura como valores médios para tal. Além disso, apresentam uma correspondência superior a 99% com os valores apresentados por Rahman (2007), equivalentes a 17,47 W/m²K e 10,62 W/m²K.

No entanto constatou-se uma diferença com o que é descrito em Kandjov (1999) para o cálculo da energia envolvida nessas trocas do que fora apresentado por Rahman (2007). Visto que Rahman (2007) se baseia no trabalho de Kandjov (1999), acredita-se que o primeiro esteja erroneamente descrito. Em Kandjov (1999) é relatado que os coeficientes encontrados devem ser multiplicados pela área de troca (A_s) para o cálculo de energia de evaporação e de convecção e, para o cálculo da perda por evaporação, pela variação de pressão de vapor entre a pele e o meio e, para a perda por convecção, pela variação de temperatura entre pele e meio.

Rahman (2007) não explicita os valores obtidos para a energia das trocas térmicas. Utilizando os valores inicialmente estabelecidos por Rahman (2007) e a real relação proposta por Kandjov (1999), o valor final de geração entrópica para o indivíduo torna-se quase dez vezes maior do que o que é obtido caso sejam utilizadas as relações estabelecidas no trabalho de Rahman (2007) para a definição das energias de troca.

Indiferente se for aplicada a relação descrita por Rahman (2007) ou por Kandjov (1999), os valores encontrados para troca térmica por evaporação e por convecção estão muito diferentes dos dados experimentais apresentados por Hardy e DuBois (1938) e utilizados no trabalho de Aoki (1989, 1990). Ou seja, a base metodológica descrita por Rahman (2007) já não apresenta uma coincidência com os valores experimentais e, caso sejam utilizadas as corretas relações descritas por Kandjov (1999), os valores tornam-se ainda mais discrepantes daqueles esperados.

Ao utilizar o método de Rahman (2007) da forma como é explicitada no artigo, o valor encontrado não coincide com o valor reportado graficamente pelo autor. Para uma mulher de 52 anos com 74,74kg e 1,52m, que fora o indivíduo modelo para as aferições de Hardy e DuBois (1938), os cálculos definem uma geração de 0,53 J/s.K. Considerando este mesmo perfil, Rahman (2007) reporta graficamente a geração em torno de 1,6 J/s.K.

Logo, em função dos motivos apresentados anteriormente, foi possível considerar que a reprodução das informações reportadas por Rahman (2007) não foi viável. Apesar disso, defende-se que a metodologia e os conceitos aplicados pelo autor estão em forte concordância com a realidade, em especial na inserção de um indivíduo em um meio e as interações propostas.

Mady (2014) realizou uma compilação e comparação de trabalhos presentes na literatura que propusessem a modelagem termodinâmica do corpo humano. Ele afirma que os resultados encontrados por Rahman (2007) são superiores aos encontrados pelos demais autores, assim como há uma diferença na idade em que ocorre o ápice de geração entrópica.

Além disso, alterações nos parâmetros, como o nível de atividade, não correspondem aos valores obtidos pelo autor e nem sequer esperados, uma vez que é sugerido que o aumento no nível de atividade causa maior geração entrópica e, pelo que fora encontrado, a relação é inversa. Acredita-se que isto ocorre devido à consideração de alguns fatores como constantes e, então, com a elevação no nível metabólico e consequente elevação das temperaturas médias corporais, o quociente dado pela relação entre energia trocada e temperatura fica menor, reduzindo o valor total de entropia gerada.

Cabe destacar que o autor avaliou o impacto da variação da temperatura do corpo na geração entrópica e concluiu que a temperatura normal média de 37°C é ótima para a operação, uma vez que, tanto para mais (42°C) quanto para menos

(28°C), a geração de entropia apresentou-se maior do que no ponto ótimo. Acredita-se que esse aumento na geração se deva pela falha que ocorre nos músculos, em especial pela rigidez muscular desencadeada pela mudança na temperatura.

Paralelamente, o método realiza uma ampla abordagem das trocas térmicas e mássicas com o meio, mas não leva em consideração processos que ocorrem internamente ao sistema, os quais podem ser responsáveis por uma alta geração de entropia.

3.1.2 *Modelo Silva e Annamalai (2008)*

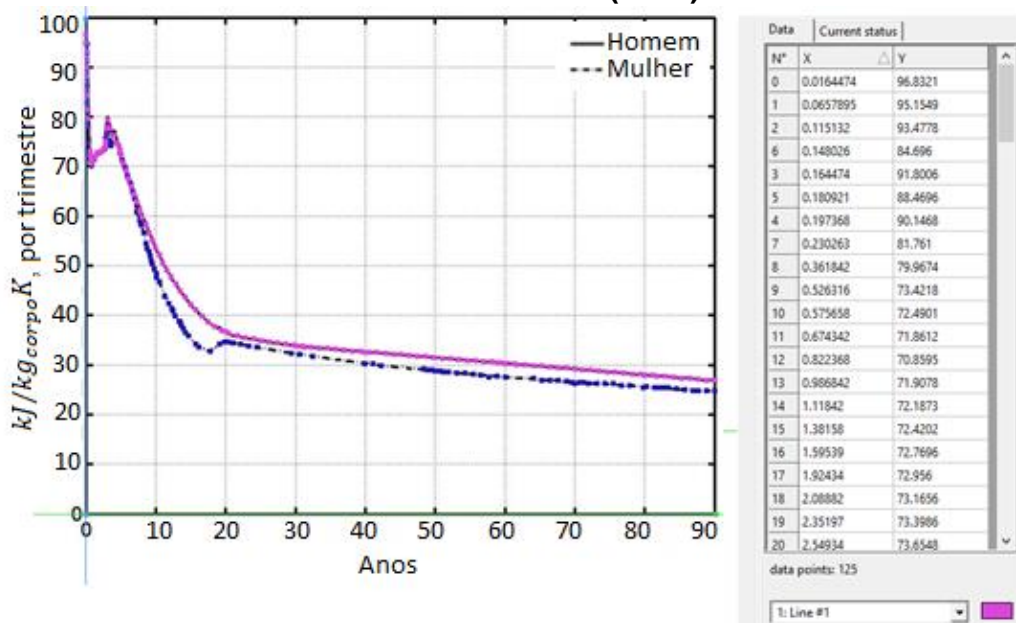
Seguindo a metodologia descrita por Silva e Annamalai (2008) e utilizando os valores fornecidos pelas bases de dados e pelo trabalho no caso base, foi possível definir valores para a geração entrópica diária ao longo da vida. Foi considerado, para efeito de comparação entre modelo e reprodução, um indivíduo do sexo masculino, uma vez que as correlações para o cálculo do EER, explicitadas na Tabela 3, pelos autores, são para este gênero.

Como são utilizadas gramaturas dos macronutrientes ingeridos em um dia, é necessário mudar a base para o trimestre para que seja possível comparar com os valores encontrados pelos autores e apresentados graficamente. Para tanto, os valores foram agrupados em dois grupos: geração entrópica antes e depois dos três anos de idade. Com mais de três anos de vida, a geração entrópica é considerada mais constante, uma vez que os crescimentos físico e metabólico passam a ser mais lineares, permitindo a simples multiplicação do valor encontrado para um dia por 92 (consideração dos 3 meses). Já nos primeiros três anos de vida, os cálculos metabólicos são feitos com uma periodização menor (conta-se em meses de vida), devido à não continuidade da taxa metabólica e as bruscas variações. Procedeu-se então de duas formas: (a) cálculo utilizando todos os valores obtidos multiplicando por 92, assim como foi feito com os valores depois de 3 anos e (b) cálculo utilizando uma média entre os valores calculados e multiplicados por 92 de 0 e 3 meses, 4 e 6 meses, 7 e 12 meses e os valores integrais de 12 e de 24 meses.

Tendo todos esses valores sido calculados, fez-se uma leitura do gráfico apresentado em Silva e Annamalai (2008) para que fosse feita a comparação entre o modelo original e a reprodução realizada. A leitura dos dados que foram apresentados graficamente não se mostrou trivial. Mas acredita-se que os valores lidos representam bem os valores simulados pelos autores.

Para tal, utilizou-se o programa GetData Graph Digitizer 2.26. A Figura 19 apresenta os pontos marcados em cada uma das curvas para homens e mulheres a partir da Figura 6 apresentada, bem como alguns dos valores obtidos para os homens à direita da figura, em que x é a idade em anos e y é geração entrópica por kg de massa corporal por trimestre. A tabela completa para todos os pontos lidos é apresentada no Apêndice A.

Figura 19 - Ajuste de pontos para leitura de dados de geração entrópica por Silva e Annamalai (2008)

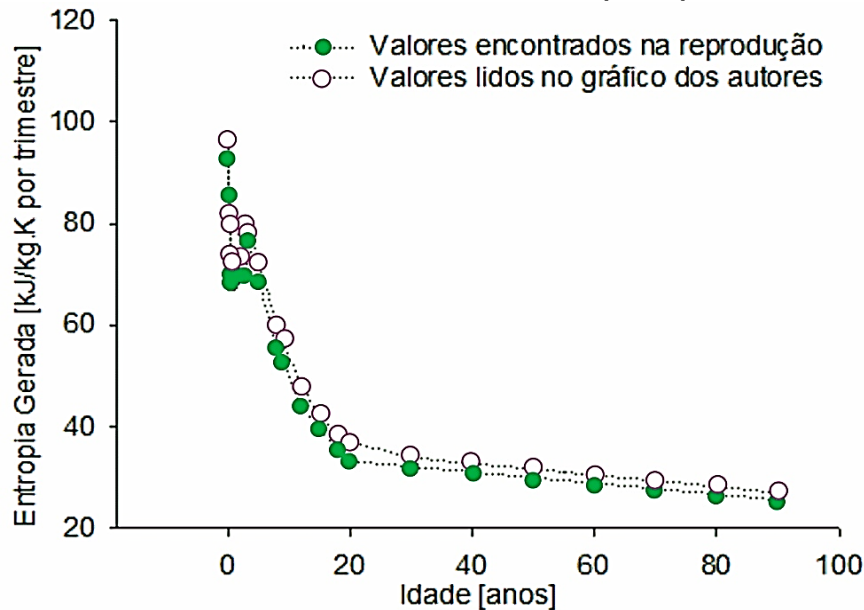


Fonte: Elaborado pela autora

Os valores trimestrais calculados e os valores lidos foram então utilizados para a construção de um gráfico, apresentado na Figura 20. Nota-se que o resultado gráfico encontrado se assemelha ao apresentado pelos autores. Todos esses valores são apresentados no Apêndice B, assim como os valores de porcentagem de correspondência.

Em média, os valores obtidos apresentaram uma correspondência de 95% com os valores lidos, o que indica uma adequação entre a metodologia adotada pelos autores e os valores encontrados no trabalho de reprodução.

Figura 20 – Comparação entre valores calculados na reprodução do modelo e lidos em Silva e Annamalai (2008)



Fonte: Elaborado pela autora

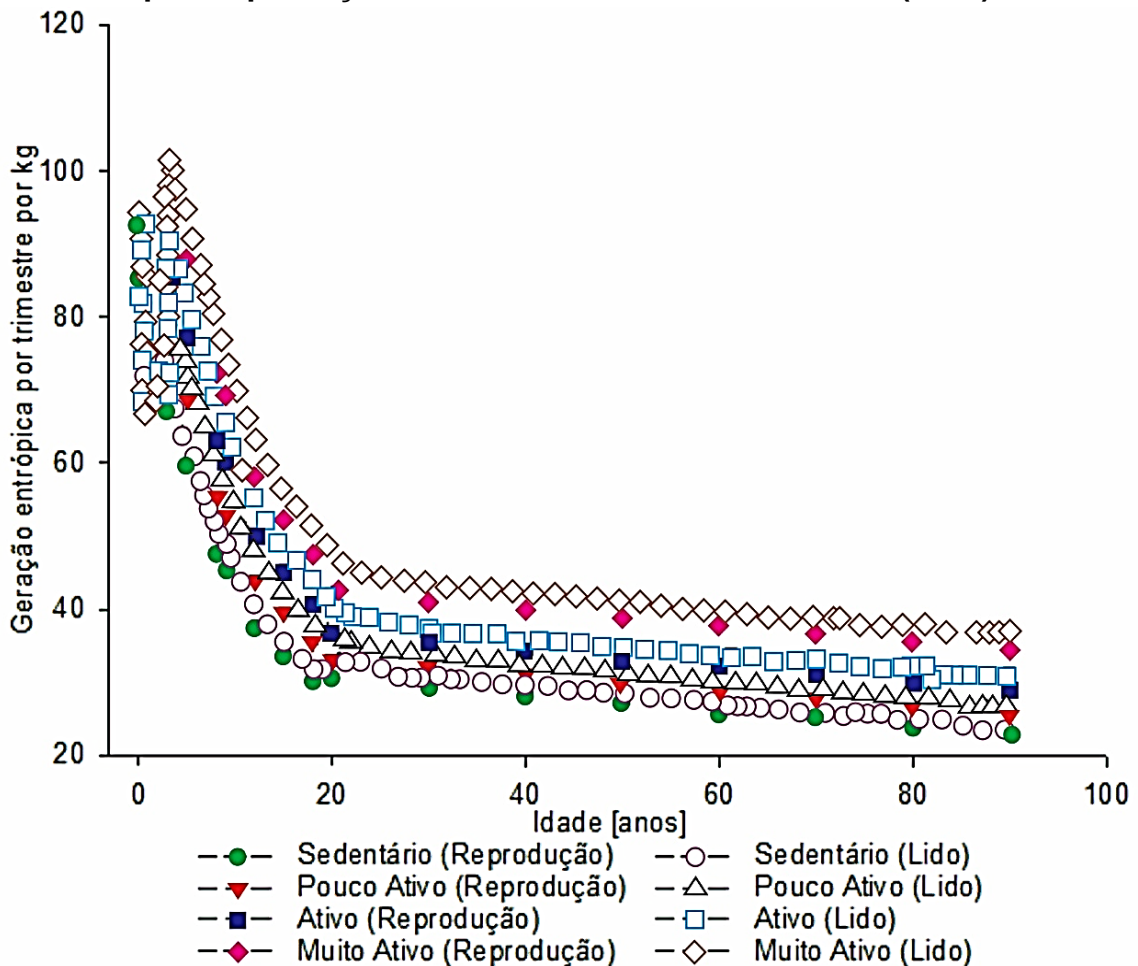
Nota-se que a maior parte dos valores definidos pelos cálculos são inferiores aos valores lidos no gráfico. Após avaliação, entendeu-se que essa pequena variação é consequência da obtenção dos dados de altura e peso utilizados, devido à leitura dos gráficos da base de dados CDC (*Centers for Disease Control and Prevention*, 2000). A leitura dos valores também não se mostrou trivial, sendo susceptível à incidência de erros, que acabou por ocasionar divergências no valor definido para a geração entrópica.

Ao se realizar o procedimento de integração numérica das curvas de Silva e Annamalai (2008) para a definição do limite de geração de entropia em cada uma das situações, foi possível a obtenção de valores próximos aos reportados para ambos os gêneros, tendo sido a correspondência de aproximadamente 90%. A integração foi realizada nos valores lidos, apresentados na Figura 19, a partir da aproximação por uma equação de quarta ordem e integração com o limite de expectativa apresentado pelos autores.

Modificando o nível de atividade física para o indivíduo do sexo masculino, observa-se que os valores se apresentam dentro do padrão esperado, como pode-se observar na Figura 21. Percebe-se que a reprodução do modelo mantém a conclusão apresentada por Silva e Annamalai (2008), em que é alegado que a maior carga de exercícios acarreta em uma maior geração entrópica, reduzindo assim a expectativa de vida.

Os dados obtidos por Silva e Annamalai (2008) foram também lidos com o programa GetData Graph Digitizer 2.26 e são apresentados na Figura 21 (em marcadores vazados) em comparação com os valores obtidos na reprodução (em marcadores preenchidos). Os valores detalhados apresentam-se no Apêndice C.

Figura 21 – Geração entrópica para diferentes níveis de atividade calculados pela reprodução do modelo de Silva e Annamalai (2008)



Visto que os valores obtidos de geração entrópica e de expectativa de vida apresentaram uma similaridade superior a 90% entre a reprodução do modelo e o que foi apresentado pelos autores, conclui-se que ocorreu a devida compreensão e reapresentação do modelo de Silva e Annamalai (2008). No entanto, foram observados alguns pontos a serem aprimorados neste método.

Primeiramente, a equação utilizada para o cálculo metabólico apresenta um valor superestimado em relação aos valores esperados para tal. Sabe-se que o cálculo metabólico não é um procedimento exato e que apresenta diversas maneiras

de ser realizado, no entanto, existem maneiras mais bem aceitas nos campos médicos e mais verossímeis do que a que fora utilizada pelos autores.

As porções recomendadas de cada macronutriente não se encontram de acordo com o que atualmente é praticado no cálculo dietético. Segundo o estudo de Silva e Annamalai (2008, 2009), uma dieta mais rica em gorduras e mais pobre em proteínas seria a mais recomendada, o que não condiz com o que é amplamente difundido na literatura.

Segundo Menon e dos Santos (2012), a recomendação de ingestão de gordura é de 1 g/kg de peso/dia e a de proteína é de 1,6-1,7 g/kg de peso/dia. Dependendo das limitações patológicas ou da carga de exercício realizada pelo indivíduo, essas recomendações podem ser maiores, podendo-se atingir até 3,4 g de proteína/kg de peso/dia. A quantidade de carboidrato torna-se variante em função da demanda basal do indivíduo.

Além disso, o modelo avalia o corpo humano como um sistema sem interação com o meio, ou seja, isolado, o que, de fato, não ocorre. Acredita-se que deve haver uma avaliação das trocas de calor e massa com o ambiente para que o valor definido de geração entrópica seja mais realista.

3.1.3 Avaliação entre modelos

A primeira etapa para a avaliação comparativa entre os modelos propostos pela literatura foi a compilação das principais equações e considerações em cada um deles. Na Tabela 9 são apresentados, de forma resumida, os destaques dos três modelos considerados.

Tabela 9 - Modelos matemáticos analisados		
	Principais Equações	Principais considerações
Modelo Aoki (1989, 1990)	$\dot{\sigma} = S_{\text{heat}} - S_{\text{flow}}$	Geração entrópica dada pela relação com o meio. Uso de dados experimentais para as trocas térmicas
Modelo Rahman (2007)	$\dot{\sigma} = S_{\text{heat}} - S_{\text{flow}}$	Geração entrópica dada pela relação com o meio. Utilização de modelos matemáticos para definição das trocas térmicas
Modelo Silva e Annamalai (2008)	$\dot{\sigma}(t) = \frac{\sum_j (1 - \eta_j) \cdot \dot{m}_j(t) \cdot (-\Delta G_{c,j}^0)}{T_b}$	Geração entrópica dada pelo metabolismo de alimentos.

Fonte: Elaborado pela autora

Tendo os modelos sidos compreendidos e a validação de todos tendo sido feita, partiu-se para a comparação das taxas de geração entrópicas de cada um deles. Com isso, foi possível definir quais são as variáveis usualmente empregadas nas descrições e qual o modelo que, até o momento, se apresenta como o mais completo.

Caso sejam comparados os valores de geração entrópica pelos modelos propostos, realizando a devida conversão de unidades e tentativa de adequação do caso base utilizado, nota-se que o valor encontrado em Silva e Annamalai (2008) em um indivíduo com atividade leve é razoavelmente próximo ao encontrado em Aoki (1989) para um indivíduo em condição basal. Ressalta-se que este indivíduo base deve ser o utilizado nas comparações uma vez que Aoki (1989, 1990) utiliza dados experimentais para a determinação da geração entrópica.

Para uma mulher de 52 anos com 74,74kg e 1,52m, Aoki (1989) definiu uma geração entrópica de 0,259 J/s.K, equivalente a 27,25 kJ/K por trimestre por kg de peso. Considerando um indivíduo com mesma idade e características físicas e o modelo de Silva e Annamalai (2008), a entropia gerada é de 27,36 kJ/K por trimestre por kg de peso.

Pontua-se que Aoki (1989, 1990) sugere uma elevação momentânea da geração entrópica causada pelo exercício, enquanto Silva e Annamalai (2008) definem uma geração continuamente elevada ocasionada pela elevação metabólica.

Considerando a mesma pessoa que nos modelos anteriores, o valor definido por Rahman (2007) é consideravelmente superior aos demais, equivalente a 0,525 J/s.K, ou seja, o valor obtido apresenta-se de 2 a 3 vezes maior. Caso seja seguida a descrição de Rahman (2007), mas utilizando as relações corretas propostas por Kandjov (1999), a geração entrópica seria de 4,229 J/s.K, atingindo aproximadamente 16 vezes o valor encontrado por Aoki (1989).

Os valores acima descritos são agrupados na Tabela 10.

Tabela 10 - Geração entrópica nos diferentes modelos para um indivíduo de 52 anos, 1,52m de altura e 74,74 kg [em kJ/K por trimestre por kg de peso]

	<i>Geração entrópica</i>
<i>Aoki (1989)</i>	27,25
<i>Rahman (2007)</i>	55,23
<i>Rahman (2007) com correlações de Kandjov (1999)</i>	444,88
<i>Silva e Annamalai (2008)</i>	27,36

Fonte: Elaborado pela autora

A comparação entre outros indivíduos e/ou biotipos apenas seria possível entre os modelos de Rahman (2007) e de Silva e Annamalai (2008), visto que esses não

dependem de valores experimentais como o modelo de Aoki (1989). Porém, dado que os valores definidos pelo modelo de Rahman (2007) foram discrepantes dos outros, demais comparações não foram feitas.

Vale ressaltar, no entanto, que diversos parâmetros utilizados se diferem entre uma metodologia e outra. Os valores de ingestão e eliminação de água pelo corpo, por exemplo, não são iguais para todos os trabalhos, bem como os valores definidos para o metabolismo e as considerações de troca térmica com o meio.

Silva e Annamalai (2008) assumem que a entropia gerada pelos fluxos de entrada e de saída de água e ar é muito pequena e por isso é possível desprezá-la. Os autores se fundamentam no trabalho de Hershey e Wang (1980 *apud* Silva e Annamalai, 2008), no qual é definido que a troca entrópica devido à respiração representa menos que 2,5% da entropia total gerada pelo corpo.

Ao fazer uma avaliação de proporcionalidade com Aoki (1989), tem-se que a geração entrópica pela troca mássica da respiração e perda de água, igual a $-0,020 J/s.K$, representa 6,3% do fluxo entrópico total (englobando troca de calor e massa), igual a $-0,318 J/s.K$. Importante considerar que parte da geração entrópica pela perda de água é considerada na evaporação que acontece na pele, mas parte está acrescida a esse valor. Desta forma, entende-se que a troca mássica de gases com o meio pela respiração apresenta uma entropia associada que pode ser desprezada das operações.

A Tabela 11 sucinta os prós e contras de cada um dos modelos avaliados.

Tabela 11 – Comparativo entre os modelos

	<i>Modelo Aoki (1989, 1990)</i>	<i>Modelo Rahman (2007)</i>	<i>Modelo Silva e Annamalai (2008)</i>
<i>Avalia reações internas do organismo</i>	não	não	sim
<i>Avalia reações do corpo com o meio</i>	sim	sim	não
<i>Aplica Harris e Benedict (1918)</i>	não	sim	não
<i>Considera perda de calor e de massa</i>	sim	sim	não
<i>Aplicável a diversos indivíduos</i>	não	sim	sim
<i>Permite avaliação de nível de atividade</i>	não	sim	sim
<i>Permite avaliação de diferentes climas</i>	não	sim	não
<i>Permite avaliação de diferentes dietas</i>	não	não	sim
<i>Considera elevação metabólica contínua</i>	não	sim	sim
<i>Resultados compatíveis com o esperado</i>	sim	não	sim
<i>Reprodução possível dos resultados</i>	sim	não	sim

Fonte: Elaborado pela autora

Desta forma, após as avaliações dos modelos e dos dados obtidos, o modelo proposto por Silva e Annamalai (2008) foi o considerado como o mais adequado e representativo para que as posteriores comparações e sugestões de aprimoramentos pudessem ser feitas, vislumbrando que os objetivos do presente trabalho fossem alcançados, como sumarizado na Figura 18. Paralelamente, conceitos firmados por Rahman (2007) também serão aplicados, visto a relevância das abordagens feitas.

3.2 Nova modelagem proposta

Adotando o modelo proposto por Silva e Annamalai (2008), em que é considerada que a geração entrópica do corpo acontece puramente pela metabolização dos macronutrientes, propõe-se que sejam feitas algumas alterações a fim de tornar o modelo mais abrangente e mais compatível com a realidade.

Primeiramente, sugere-se que o cálculo metabólico seja realizado a partir das equações de Harris e Benedict (1918), explicitadas pelas Equações (18) e (19), e pelas equações descritas em FAO/WHO/UNU (1985), a serem apresentadas nas Equações (34-36). A alteração torna-se pertinente uma vez que as equações mencionadas são acadêmica e profissionalmente mais aceitas. Ou ainda, tais equações fornecem valores mais próximos aos definidos por métodos mais precisos e específicos, como a calorimetria indireta (Schneider e Meyer, 2005).

Também adotadas por Mady (2014), as equações descritas por FAO/WHO/UNU (1985) são destinadas para o cálculo metabólico de crianças e adolescentes de 0 a 18 anos, uma vez as equações de Harris e Benedict (1918) não contemplam com precisão essa faixa etária. Para tanto, é utilizada uma equação para crianças de 0 a 1 ano (0 a 12 meses), explicitada na Equação (34), e uma dupla de equações de 1 a 18 anos, explicitadas nas Equações (35) e (36), em que ocorre uma separação por gênero.

$$M_{0-12} = m \cdot (123 - 8,9 \cdot \text{meses} + 0,59 \cdot \text{meses}^2) \quad (34)$$

$$M_{menino,1-18} = 17,5m + 651 \quad (35)$$

$$M_{menina,1-18} = 12,2m + 746 \quad (36)$$

Os valores de altura e peso serão considerados do CDC (2000), como proposto por Silva e Annamalai (2008), para homens e mulheres.

Além disso, sugere-se seguir as recomendações de ingestão diária de macronutrientes colocada em Menon e dos Santos (2012), fixando os valores de proteína e de gordura e fazendo o cálculo de complemento dietético com os

carboidratos. Silva e Annamalai (2008) consideraram valores fixos de carboidratos e de proteínas e o cálculo de complemento com gordura. Essa alteração permite que sejam comparados diferentes padrões dietéticos na expectativa de vida do indivíduo de forma mais próxima ao que é realizado por profissionais da nutrição.

Uma vez que o modelo de Silva e Annamalai (2008) segue uma metodologia de geração entrópica apenas dentro do organismo, sugere-se que seja contabilizada a interação do corpo com o meio ambiente, pois essa é de maior representatividade para a perda de calor e de massa que o corpo sofre. Segundo os estudos de Wang *et al.* (2016) nota-se que a perda de calor por evaporação é a modalidade que sofre maior influência com a temperatura do meio. Da mesma forma, segundo Wang e Hu (2018), a evaporação é a principal responsável pela liberação de calor quando o corpo é submetido a um aumento no nível de atividade física. Assim, propõe-se que seja considerado a energia de evaporação e a entropia associada a essa troca, descrita pela equação de Kandjov (1999) em Rahman (2007), representadas respectivamente pelas Equações (37,38). Essa inclusão permite que seja avaliado o impacto que o meio pode ocasionar na geração entrópica do indivíduo e na sua expectativa de vida.

$$E_{evp} = h_{evp} \cdot A_s \cdot (\phi_s P_s - \phi_a P_a) \quad (37)$$

$$s_{evp} = E_{evp}/T_r \quad (38)$$

em que h_{evp} é o coeficiente de troca térmica por evaporação [W/m².hPa], $\phi_s P_s$ é a pressão de vapor à temperatura da pele [hPa], $\phi_a P_a$ é a pressão de vapor à temperatura ambiente [hPa], A_s é a área de pele [m²] e T_r é a temperatura retal [K].

Com o intuito de aplicar a metodologia sugerida, deve-se calcular os coeficientes de troca térmica de roupa, a temperatura retal e a pressão de vapor da superfície da pele para cada idade ao longo da vida, pois esses valores são dependentes do nível metabólico e impactarão diretamente na geração de entropia. Sugere-se então que o valor encontrado para a troca térmica E_{evp} seja multiplicado por fatores de correção: 1) coeficiente de troca térmica de roupa C_{lo} , uma vez que não toda a superfície da pele está exposta para a perda por evaporação; 2) fração de superfície molhada w , equivalente a 0,06, quando não há presença de suor, e equivalente a 1, quando a pele estiver completamente molhada (Mady, 2014).

Para a determinação do fator de fração de superfície molhada, leva-se em consideração o tempo de atividade física. Supõe-se que, durante a atividade, a pele encontra-se completamente coberta por suor, aumentando a taxa de perda térmica,

enquanto que, em repouso, a pele encontra-se seca. Assim, de posse do tempo de atividade na semana, calcula-se o tempo médio em um dia e, considerando a proporção, define-se o fator multiplicador.

Os fatores de atividade (FA) utilizados são os mesmos que em Rahman (2007), uma vez que se utiliza a mesma maneira de cálculo metabólico que o autor. Esses fatores são usados para definir a taxa metabólica real, ao ser feito o produto entre esses e o valor definido para a taxa metabólica pelas Equações (18,19) e Equações (34-36). São considerados cinco níveis de atividade física para as comparações:

- (i) sedentário (FA=1,2), sem a realização semanal de exercício;
- (ii) pouco ativo (FA=1,375), realizando 150 minutos de atividade por semana, segundo recomendado pela OMS (2018);
- (iii) ativo (FA=1,55), realizando 300 minutos de atividade por semana, segundo sugerido pela OMS (2018) para ganhos adicionais;
- (iv) muito ativo (FA=1,725), com uma realização de 500 minutos de atividade por semana;
- (v) extremamente ativo (FA=1,9), com uma realização de 900 minutos de atividade por semana, simulando uma situação de atletas.

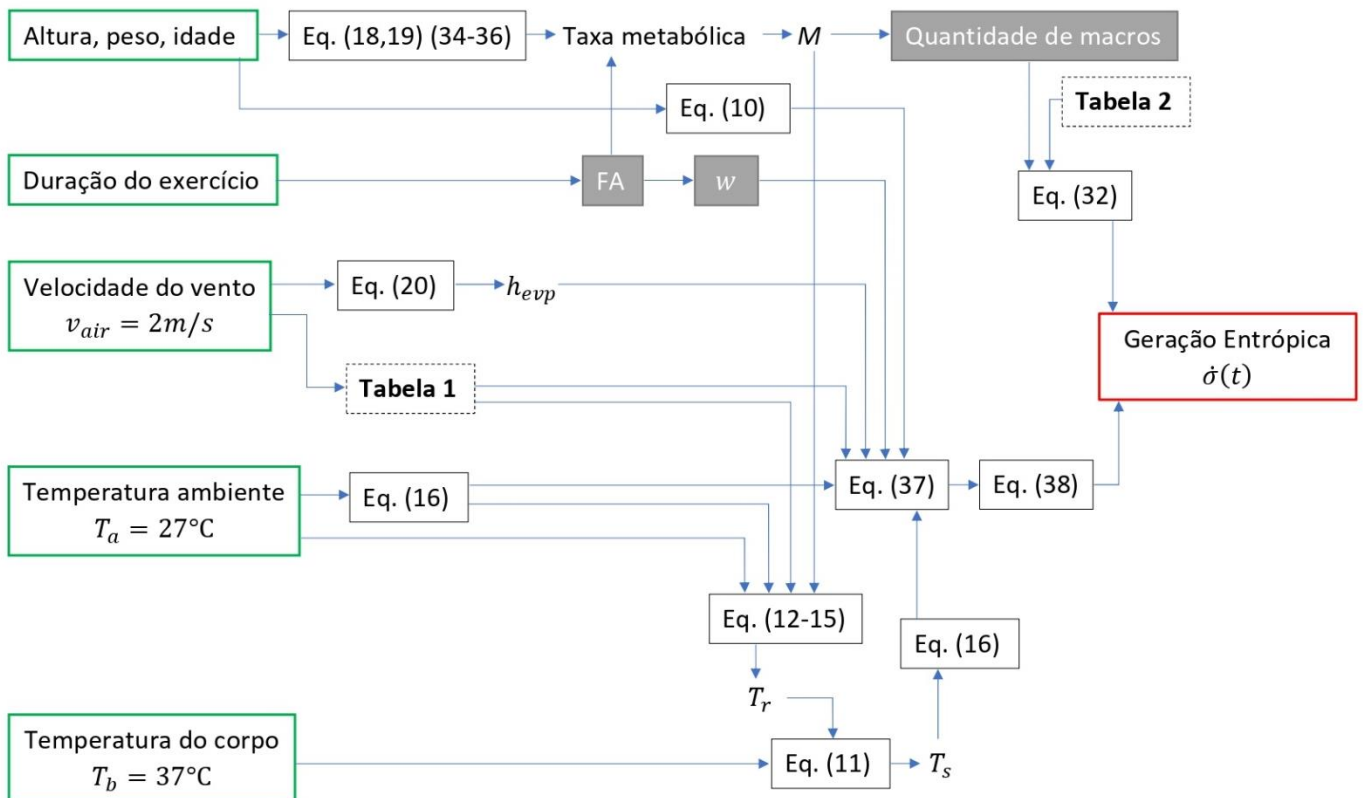
Esses fatores de atividade são apenas considerados para indivíduos acima de 10 anos. De acordo com FAO/WHO/UNU (1985), até essa idade deve ser considerado um fator de correção único de 5% para o cálculo do requerimento total de energia. Como afirmado, esse percentual é suficiente para descrever o nível de atividade física e demais demandas metabólicas. Então, o FA é de 1,05 até os 10 anos de idade.

Desta forma, a geração entrópica total ao longo do tempo ($\sigma(t)$) é dada pelo somatório entre a entropia associada ao metabolismo dos macronutrientes, dada pela Equação (32), e a entropia associada à troca térmica por evaporação com o meio (s_{evp}), representada na Equação (38). A taxa de geração entrópica ($\dot{\sigma}_m(t)$) é calculada pela razão entre a geração entrópica e a massa do indivíduo na idade correspondente. Os cálculos são feitos considerando as mesmas idades que foram consideradas em Silva e Annamalai (2008), inclusive para que fosse feita uma comparação de período por período. Para que sejam avaliados os dados provenientes do novo modelo, faz-se a comparação para os diferentes gêneros, padrões alimentares, temperatura do meio e nível de atividade.

As etapas do processo são sumarizadas na Figura 22. A taxa de geração entrópica ($\dot{\sigma}_m(t)$) é calculada pela razão entre a geração entrópica e o peso do indivíduo para a respectiva idade.

Para as seguintes proposições, é considerada uma temperatura ambiente de 27°C e uma velocidade de vento de 2 m/s. Assim como em Rahman (2007), considera-se um movimento de convecção forçada do vento. O coeficiente de troca por evaporação é então de 17,42 W m⁻² hPa⁻¹.

Figura 22 - Fluxograma do novo modelo



Fonte: Elaborado pela autora

As entradas do processo são colocadas em verde, enquanto a saída está em vermelho. As principais equações utilizadas estão trilhadas, assim como algumas incógnitas por elas definidas. As caixas cinzas representam que a relação entre entradas e saídas não é matematicamente descrita e depende-se de definições previamente estabelecidas.

Com o intuito de verificar a adequação do modelo proposto, supôs-se o indivíduo utilizado por Aoki (1989, 1990). A geração entrópica para uma mulher de 52 anos, 1,52m de altura e 74,74kg foi de 29,55 kJ/K por trimestre por kg de peso. Caso comparado com os valores definidos nos demais modelos, explicitado anteriormente

na Tabela 10, nota-se que o modelo proposto apresenta uma geração 10% superior ao definido por Aoki (1989) e por Silva e Annamalai (2008). Além disso, o comportamento gráfico da curva se assemelha ao que fora definido por Silva e Annamalai (2008), como apresentado na Figura 23.

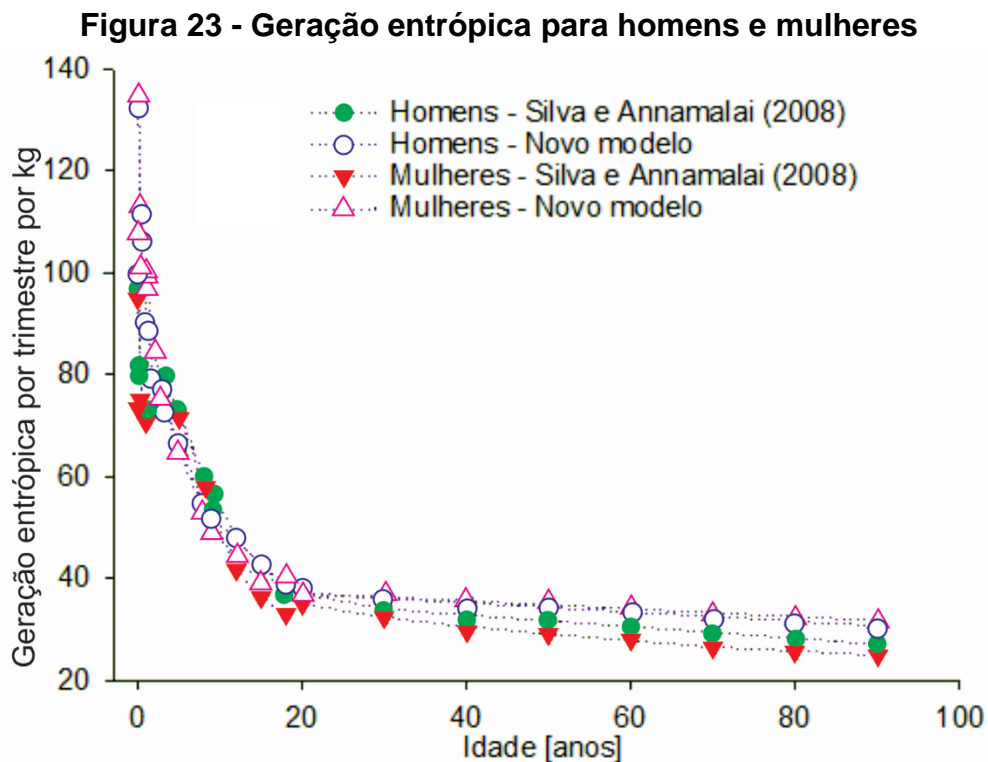
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Assim, de posse das demais informações necessárias e do novo modelo proposto, analisou-se a relação entre a prática de atividade física e a longevidade em função dos parâmetros externos.

4.1 Variação de parâmetros externos

4.1.1 Geração entrópica no novo modelo para diferentes gêneros

Parte-se de um caso base com nível de atividade (i), padrão de 1g de gordura e 1,6g de proteína para cada kg de peso e temperatura ambiente de 27°C para que seja comparado o efeito de gênero na entropia. Na Figura 23 são apresentados os dados de geração entrópica por dia por kg de peso do indivíduo para homens e para mulheres separadamente.



Fonte: Elaborado pela autora

Ao se comparar a curva de geração entrópica obtida pelo modelo proposto (em marcadores vazados) com os valores lidos em Silva e Annamalai (2008) (em marcadores preenchidos), nota-se uma similaridade entre o comportamento dos modelos. Os valores encontrados são, majoritariamente, superiores ao que foram

definidos pelos autores. Isso ocorre devido às mudanças propostas, em especial pelo cálculo metabólico e o incremento entrópico pela relação com o meio. Os valores de cada um dos modelos são apresentados no Tabela 12.

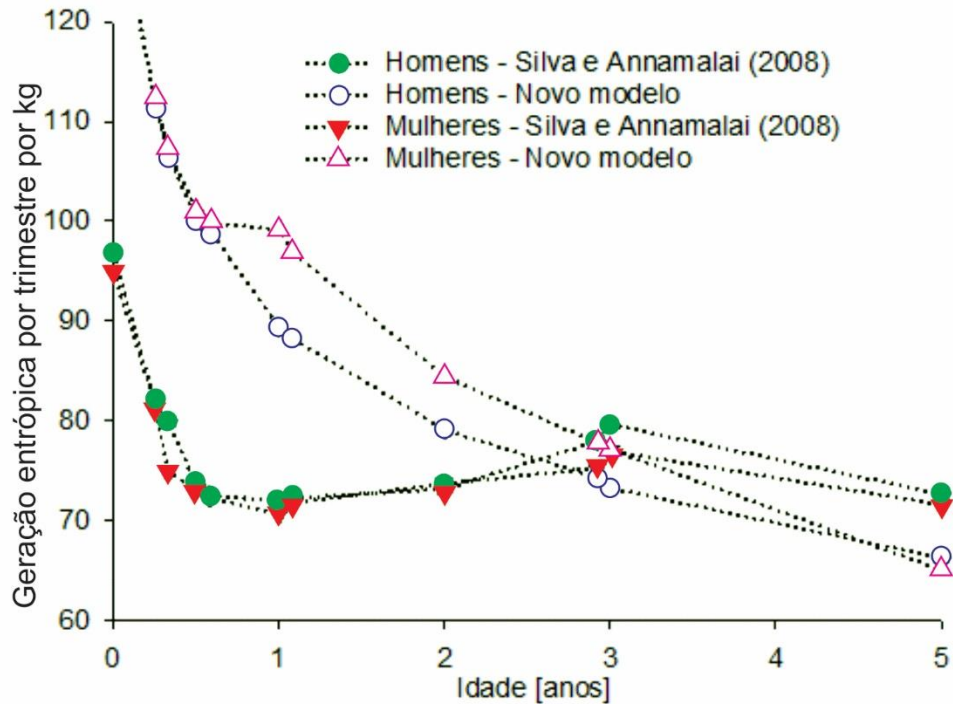
Tabela 12 - Geração entrópica para homens e mulheres

Idade [anos]	Geração entrópica por dia por kg - Novo modelo		Geração entrópica por trimestre por kg - Novo modelo		Geração entrópica por trimestre por kg - leitura Silva e Annamalai (2008)	
	Homens	Mulheres	Homens	Mulheres	Homens	Mulheres
0	1,448	1,461	133,20	134,43	96,83	94,97
0,25	1,215	1,219	111,74	112,10	81,76	81,55
0,33	1,161	1,165	106,78	107,19	79,97	74,84
0,50	1,088	1,099	100,11	101,10	73,42	73,21
0,58	1,077	1,085	99,09	99,83	72,49	72,28
1	0,971	1,078	89,34	99,18	71,91	70,65
1,08	0,960	1,054	88,28	96,93	72,19	71,74
2	0,860	0,917	79,07	84,37	73,17	73,65
2,92	0,807	0,846	74,29	77,81	77,89	75,24
3	0,796	0,838	73,25	77,10	79,62	76,96
5	0,720	0,707	66,20	65,01	72,63	71,56
8	0,591	0,577	54,39	53,05	59,93	58,47
9	0,558	0,535	51,34	49,26	56,88	53,02
12	0,520	0,481	47,87	44,21	47,92	41,58
15	0,458	0,429	42,13	39,45	42,44	36,01
18	0,425	0,430	39,14	39,55	37,92	32,91
20	0,402	0,403	36,96	37,06	36,87	34,87
30	0,392	0,394	36,05	36,28	34,01	32,29
40	0,382	0,386	35,15	35,51	32,73	30,49
50	0,372	0,378	34,24	34,74	31,66	29,02
60	0,362	0,369	33,34	33,97	30,42	27,77
70	0,353	0,361	32,43	33,20	29,37	26,46
80	0,343	0,352	31,53	32,43	28,19	25,69
90	0,333	0,344	30,62	31,66	27,04	24,90

Fonte: Elaborado pela autora

Ressalta-se que a oscilação apresentada pelos autores para os primeiros anos de vida não é mantida na nova metodologia, como pode ser observado em foco na Figura 24. O novo modelo torna a curva mais suave. Isso se deve ao fato de que as equações para cálculo de metabolismo que foram adotadas, sendo elas Harris e Benedict (1918) e FAO/WHO/UNU (1985), não são tão segmentadas como as equações metabólicas de IOM (2002), as quais foram adotadas por Silva e Annamalai (2008). Assim, a tendência dos dados é mais evidente, se mantendo ao longo do tempo.

Figura 24 - Geração entrópica para homens e mulheres de 0 a 5 anos



Fonte: Elaborado pela autora

Além disso, os dados para diferentes gêneros não apresentaram grandes discrepâncias como nos trabalhos anteriormente analisados. Seguindo uma análise detalhada dos valores encontrados, percebe-se que ocorre uma compensação para o aumento na geração entrópica dos indivíduos do sexo masculino com o aumento do peso, ou seja, homens geram maior entropia que mulheres ao longo da vida, mas, ao analisar a geração por kg de peso, os valores tornam-se próximos.

Admitindo a adequação do modelo para a descrição da realidade, os resultados apresentados permitem essa avaliação, uma vez que o corpo humano apresenta um mesmo padrão de funcionamento para ambos os sexos, pois as trocas térmicas acontecem da mesma forma assim como o metabolismo dos macronutrientes. Assim, a diferença de expectativa de vida entre homens e mulheres, conforme os dados do Banco Mundial (2020, em *Public Data* – Google, 2020), se deve muito mais pelas diferenças de hábitos e cuidados do que pela operação do sistema em si. Mais uma vez admitindo a adequação do modelo, o fato de os indivíduos do sexo masculino apresentarem um nível metabólico mais alto, pode fazer com que as reações de deterioração do organismo aconteçam de forma mais rápida, mas não pode justificar uma falha conjunta precoce.

Hershey (2010 *apud* Mady, 2014) e Silva e Annamalai (2008) definem os valores de limite de entropia gerada, reportados na Tabela 5, avaliando a geração em seus respectivos modelos. Desta forma, devem ser definidos novos valores de geração entrópica máxima que contemplem o novo modelo e as novas considerações feitas. Para tal é adotada uma metodologia semelhante à de Silva e Annamalai (2008). Considerando uma variação linear entre os pontos calculados presentes na Figura 23 e aplicando o método dos trapézios para a integração dentro da expectativa de vida, foi possível obter o limite de geração entrópica.

Em um primeiro instante, foram utilizados os valores adotados por Silva e Annamalai (2008) da CIA World Fact Book (*apud* Silva e Annamalai, 2008), para que fosse possível uma comparação entre os modelos. Aplicando as expectativas de vida de 74,63 anos para os homens e de 80,36 anos para as mulheres, obtém-se uma geração entrópica máxima de 11.892 kJ/kg.K para homens e 12.704 kJ/kg.K para mulheres, considerando um indivíduo sedentário (PA=1,2) que ingere as recomendações de macronutrientes. Como era esperado, tais valores são superiores aos que foram definidos por Silva e Annamalai (2008). Para os homens, a diferença não foi tão significativa, sendo aproximadamente 3% superior ao que havia sido determinado. Para as mulheres, a diferença foi mais relevante, sendo o valor aproximadamente 12% maior do que o valor dos autores. Conclui-se que, apesar de metodologias semelhantes, os modelos e considerações não são os mesmos, embasando a necessidade de determinação de um novo valor compatível com o modelo proposto.

Posteriormente, utilizando os dados do Banco Mundial (2020, em *Public Data* – Google, 2020) de expectativa de vida média no mundo para homens e mulheres, definiu-se os limites de geração entrópica para cada gênero. Sendo de 70,21 anos para homens e 74,7 anos para mulheres, obtém-se o limite entrópico respectivo de 11.327 kJ/kg.K e 11.972 kJ/kg.K. Todos os valores são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Limite de geração entrópica acumulada

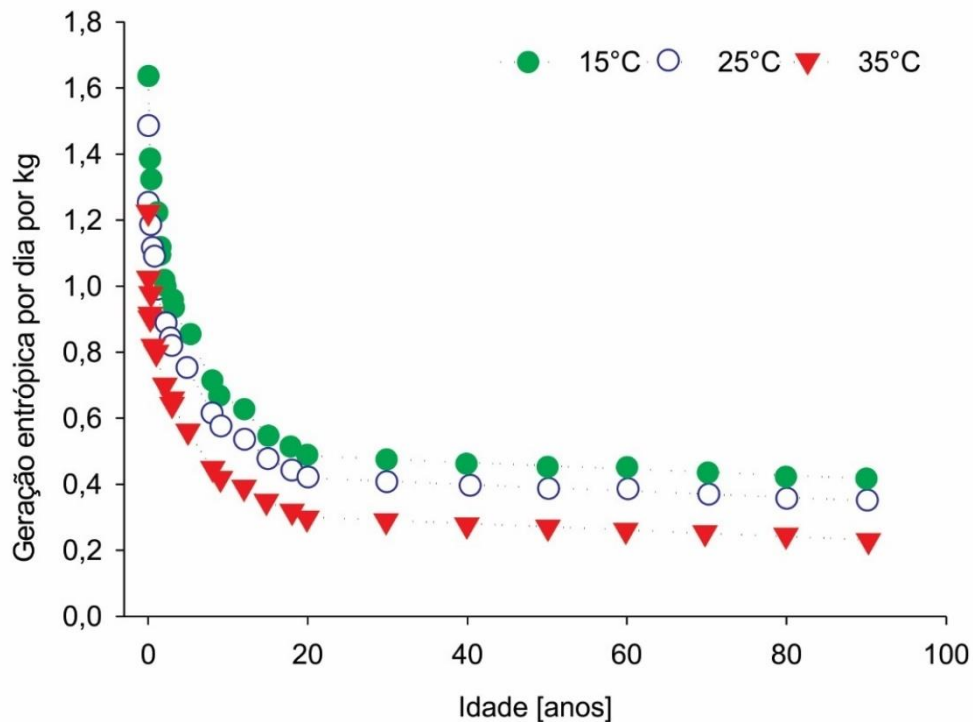
	<i>Homens</i>	<i>Mulheres</i>
<i>Hershey (2010 apud Mady, 2014)</i>	10.025 kJ/kg.K	10.678 kJ/kg.K
<i>Silva e Annamalai (2008)</i>	11.508 kJ/kg.K	11.299 kJ/kg.K
<i>Novo modelo</i>	11.327 kJ/kg.K	11.972 kJ/kg.K

Fonte: Elaborado pela autora

4.1.2 Geração entrópica no novo modelo para diferentes temperaturas

Considerando agora indivíduos do sexo masculino, com nível de atividade sedentário (FA=1,2), sem a realização semanal de exercício, padrão de 1g de gordura e 1,6g de proteína para cada kg de peso, é observada a resposta de geração entrópica quando variada a temperatura ambiente média para 15°C, 25°C e 35°C. Os dados de geração entrópica por dia por kg de peso do indivíduo para as temperaturas avaliadas são apresentados na Figura 25.

Figura 25 - Geração entrópica no corpo para 15°C, 25°C e 35°C



Fonte: Elaborado pela autora

Dessa forma, entende-se que, considerando apenas os resultados simulados, viver em locais mais quentes é melhor para a expectativa de vida, uma vez que a geração entrópica é menor quando avaliada apenas a troca térmica por evaporação. Isso se deve ao fato de que o corpo passa a perder menos calor para o meio já que a variação de temperatura entre os dois é pequena. Quanto mais frio o ambiente, maior será a tendência de perda de calor, visto que o sistema busca pelo equilíbrio.

Vale ressaltar que as avaliações não levam em consideração os diversos fatores externos característicos das localidades, que impactam diretamente na vida, como umidade relativa do ar média e acesso a ambientes climatizados. Outros fatores como saneamento básico e infraestrutura também não são levados em consideração e apresentam impacto da expectativa de vida.

Variações internas, relativas ao funcionamento do organismo, que são impactadas pelas diferentes temperaturas do meio, também não foram levadas em consideração, como a desidratação celular, a velocidade de vasodilatação e o aumento de processos inflamatórios devido à reação da pele exposta ao calor.

4.1.3 Geração entrópica no novo modelo para diferentes dietas

Supondo indivíduos do sexo masculino, com nível de atividade sedentário (FA=1,2), sem a realização semanal de exercício, e temperatura ambiente 27°C, objetiva-se agora avaliar o impacto de diferentes ingestões dietéticas na geração entrópica. Para todas as circunstâncias avaliadas, o carboidrato foi o macronutriente de complemento, ou seja, ele é o responsável por fornecer aquilo que a gordura e a proteína não derem energeticamente ao corpo, em função da taxa metabólica. Desta forma, serão avaliadas quatro situações, descritas na Tabela 14.

Tabela 14 - Dietas avaliadas

Situação avaliada	Gramatura de gordura por kg de peso	Gramatura de proteína por kg de peso
(a) ingestão padrão	1g	1,6g
(b) dieta hiper gordurosa	2g	1,6g
(c) dieta hipoprotéica	1g	1g
(d) dieta hiper proteica	1g	2,4g

Fonte: Elaborado pela autora

As situações propostas visam atingir diversos espectros populacionais. A situação (a) é a ingestão padrão como descrito em Menon e dos Santos (2012); a situação (b) simula uma ingestão exagerada de gordura, predominante entre obesos; a situação (c) é a recomendação para pessoas com patologias associadas a rim e/ou fígado, devido à metabolização proteica; e a situação (d) é o mais usual entre os atletas, devido à demanda muscular de proteínas.

A avaliação gráfica não proporciona a devida interpretação dos dados obtidos, não sendo possível notar as diferenças na geração em cada uma das situações avaliadas. Assim, a Tabela 15 apresenta os valores da geração entrópica por dia por quilograma de peso do indivíduo para as quatro situações avaliadas. Nota-se que a situação (d) (dieta hiper proteica) apresenta os maiores valores de geração entrópica para todas as idades avaliadas, enquanto a situação (c) (dieta hipoprotéica) possibilita as menores gerações entrópicas.

Tabela 15 - Geração entrópica para diferentes dietas por dia por kg de peso

Idade	Ingestão padrão	Dieta hiper gordurosa	Dieta hipoprotéica	Dieta hiper proteica
0	1,448	1,447	1,439	1,460
0,25	1,215	1,214	1,205	1,227
0,33	1,161	1,160	1,151	1,173
0,5	1,088	1,087	1,079	1,100
0,58	1,077	1,076	1,068	1,089
1	0,971	0,970	0,962	0,983
1,08	0,960	0,959	0,950	0,972
2	0,860	0,859	0,850	0,872
2,92	0,807	0,807	0,798	0,820
3	0,796	0,795	0,787	0,809
5	0,720	0,719	0,710	0,732
8	0,591	0,590	0,582	0,603
9	0,558	0,557	0,549	0,570
12	0,520	0,520	0,511	0,533
15	0,458	0,457	0,449	0,470
18	0,425	0,425	0,416	0,438
20	0,402	0,401	0,393	0,414
30	0,392	0,391	0,383	0,404
40	0,382	0,381	0,373	0,394
50	0,372	0,371	0,363	0,385
60	0,362	0,362	0,353	0,375
70	0,353	0,352	0,343	0,365
80	0,343	0,342	0,333	0,355
90	0,333	0,332	0,324	0,345

Fonte: Elaborado pela autora

Conforme havia sido levantado por Silva e Annamalai (2009), o aumento na ingestão de proteína acarreta em um aumento de geração de entropia, sendo recomendado, dessa forma, que essa ingestão seja mantida o mais baixo o possível. Percebe-se que de (d) para (a) houve um aumento na geração, enquanto de (c) para (a) houve uma redução, causada apenas pela mudança na proporção do macronutriente.

Paralelamente, ao comparar (b) com (a) nota-se que ocorre uma redução na geração entrópica com o aumento na ingestão de gordura. Apesar de não ser tão significativa, essa variação havia também sido relatada por Silva e Annamalai (2009).

4.1.4 Geração entrópica no novo modelo para diferentes níveis de atividade

Supondo um indivíduo do sexo masculino, com alimentação segundo o padrão de 1g de gordura e 1,6g de proteína para cada kg de peso e temperatura ambiente de

27°C, faz-se a variação no nível de atividade para comparar o impacto do exercício físico na geração entrópica. Serão considerados os cinco níveis de atividade, com seus respectivos tempos de prática semanais para o cálculo do fator de fração de superfície molhada. Os valores são colocados na Tabela 16.

Tabela 16 - Níveis de atividade física avaliados

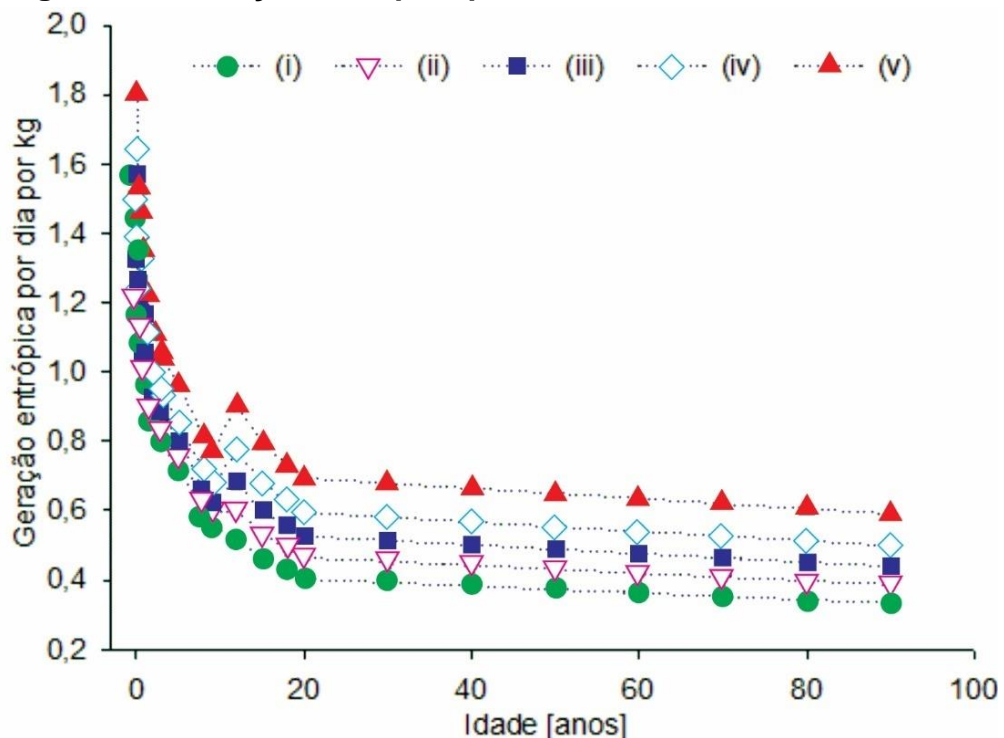
Nível	Atividade	Tempo de prática semanal	Fator de Atividade	Fração de superfície molhada
(i)	Sedentário	0	1,2	0,06
(ii)	Pouco ativo	150	1,375	0,074
(iii)	Ativo	300	1,55	0,088
(iv)	Muito ativo	500	1,725	0,107
(v)	Extremamente ativo	900	1,9	0,144

Fonte: Elaborado pela autora

Como descrito anteriormente, esses fatores de atividade são apenas considerados para indivíduos acima de 10 anos. Até os 10 anos, é considerado o fator de 5% definido por FAO/WHO/UNU (1985).

Vale ressaltar que a avaliação feita considerou um nível de atividade constante durante toda a vida, o que por vezes não é real. No entanto, para a pura avaliação do impacto da prática de atividade na longevidade, a consideração é suficiente.

Figura 26 - Geração entrópica para diferentes níveis de atividade



Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 26 são apresentados os dados de geração entrópica por dia por kg de peso do indivíduo para os diferentes níveis de atividade. Como fora encontrado pelos demais autores na bibliografia, o aumento no nível da atividade acarreta em um aumento na geração de entropia, o que acaba por reduzir a expectativa de vida, uma vez que o corpo acaba por atingir o limite da geração entrópica acumulada mais rápido.

4.2 Comparativo de estilo de vida e longevidade

Como visto, a geração de entropia é elevada com a prática de exercícios físicos e reduzida com uma maior ingestão de gordura, fazendo com que se conclua que a vida sedentária é mais longínqua. No entanto, isso contradiz as recomendações de órgãos da saúde, nas quais é indicado um nível mínimo de atividade e uma alimentação balanceada e mais rica em proteínas para que seja mantida a qualidade de vida e aumentada a vida útil do corpo. Dessa forma, propõe-se que seja feita uma avaliação quantitativa do impacto da atividade física e de bons hábitos alimentares na vida do ser humano. Para todas as situações, será considerada uma temperatura ambiente de 27°C e uma velocidade de vento de 2 m/s. Assim, propõe-se três situações a serem comparadas, descritas na Tabela 17.

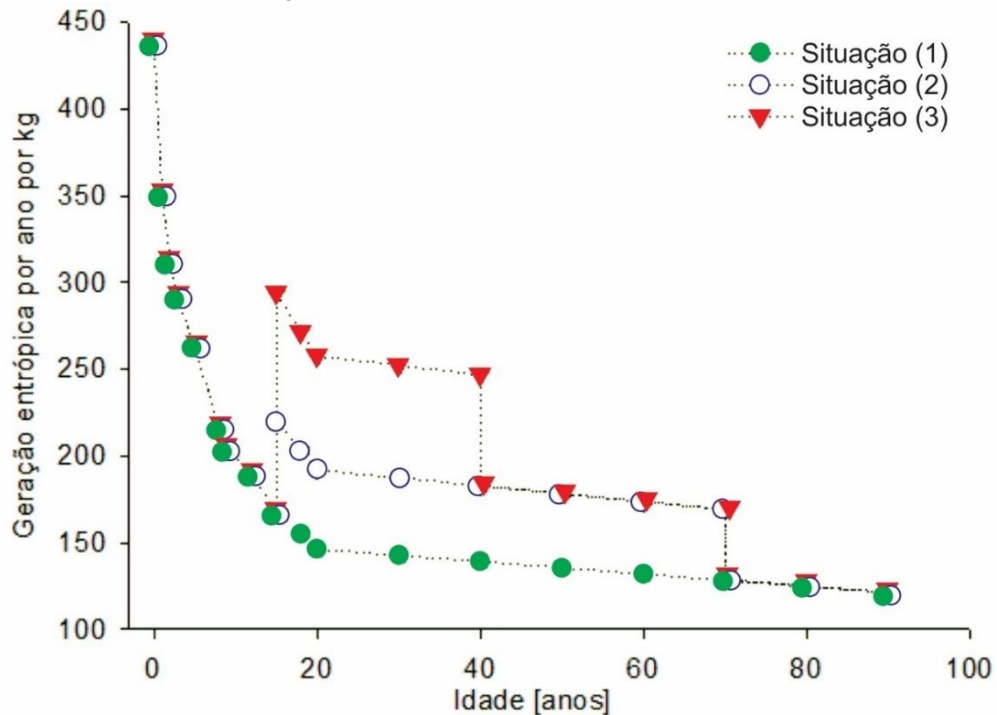
Tabela 17 - Descrição das situações avaliadas no presente trabalho

<i>Idade</i>	<i>0-15</i>	<i>15-40</i>	<i>40-70</i>	<i>70+</i>
Situação (1)	FA=1,2 2g G e 1,6g P			
Situação (2)	FA=1,2	FA=1,55		FA=1,2
	1g G e 1,6g P			
Situação (3)	FA=1,2	FA=1,9	FA=1,55	FA=1,2
	1g G e 1,6g P	1g G e 2,4g P	1g G e 1,6g P	

Fonte: Elaborado pela autora

A situação (1) representaria uma pessoa sedentária toda a vida, a situação (2) seria uma pessoa que pratica exercícios durante a fase jovem/adulta/idosas e se alimenta adequadamente sempre visando a melhoria da qualidade de vida e a situação (3) aproximaria à realidade de um atleta, que realiza uma maior carga de atividade e se alimenta na dieta hiper proteica na idade ativa (15-40 anos) e posteriormente passa a se alimentar e praticar exercícios para a manutenção da qualidade de vida.

Figura 27 - Geração entrópica para diferentes estilos de vida



Fonte: Elaborado pela autora

Os dados obtidos para as três situações comparadas são apresentados na Figura 27, em que a geração entrópica está apresentada em kJ/K por indivíduo masculino por kg de peso por ano ao longo da vida. Nota-se que ocorre uma elevação em degrau quando adicionado o nível de atividade realizado pela pessoa, que muda ao longo do tempo conforme descrito na Tabela 17 em cada situação. O degrau é formado pela condição de análise preestabelecida.

Caso os valores definidos para o indivíduo base, apresentados na Tabela 13, sejam considerados como um limite fixo de geração, como afirmado por Hershey (2010 *apud* Mady, 2014), Rahman (2007) e por Silva e Annamalai (2008), a expectativa de vida dos indivíduos descritos pelas situações (2) e (3), descritos na Tabela 17, seriam de 56,29 e 47,04 anos, respectivamente. Esses valores chamam ainda mais à atenção quando comparados à redução de expectativa de vida que fora definida por Henriques (2018) para uma pessoa hipertensa, equivalente a 4,4 anos. Mesmo que o resultado de redução fosse esperado, conforme foi apresentado pelos autores citados, não se imaginava que a variação fosse tão mais relevante do que uma situação patológica grave. Paralelamente, nota-se que a expectativa de vida do indivíduo apresentado pela situação (1) seria de 70,36 anos, valor ligeiramente superior à expectativa base. Assim, ressalta-se que esses resultados contradizem

diversos estudos e afirmações que definem que a prática de atividade física e a alimentação adequada aumentam a longevidade humana.

Desta forma, o presente trabalho induz uma modificação no conceito de limite de geração entrópica ao longo da vida. Sugere-se que o valor definido seja específico para um grupo avaliado, podendo ser alterado conforme as condições às quais o indivíduo é exposto, como a temperatura ambiente do local em que a pessoa vive e o nível de atividade praticada. Assim, a modelagem estaria mais adequada à realidade.

Visto que o enfoque do trabalho é a avaliação da geração entrópica afetada pela prática de exercícios físicos, são avaliados novos limites em função da expectativa de vida que pode ser atingida com o hábito de se exercitar. Em função dos valores calculados por Dhana *et al.* (2016) para o aumento da expectativa de vida pela atividade, apresentados na Tabela 5, novos valores de limite de geração de entropia foram definidos, apresentados na Tabela 18. Para tanto, foi considerado que o nível “moderado” é equivalente à situação (2) avaliada e o nível “intenso” é equivalente à situação (3).

Para tal procedimento, os valores de aumento de expectativa definidos por Dhana *et al.* (2016) foram acrescidos ao valor de expectativa de vida média mundial considerada, de 70,21 anos para homens, resultando em diferentes expectativas de vida de acordo com o nível e a modalidade praticada. Desta forma, foram definidos novos pontos para o intervalo da integração numérica das curvas da Figura 27. Ou seja, o limite de geração entrópica acumulada que se dava em 70,21 anos igual a 11.327 kJ/kg.K, passou a ser dado em diferentes valores finais de acordo com as melhorias adquiridas pela atividade física. E assim novos valores de entropia gerada acumulada nos períodos estimados foram definidos.

Tabela 18 - Geração entrópica limite em função dos níveis de atividade [kJ/kg.K]

Caminhada	<i>Moderado</i>	13.883
	<i>Intenso</i>	15.526
Ciclismo	<i>Moderado</i>	13.985
	<i>Intenso</i>	15.833
Trabalho doméstico	<i>Moderado</i>	13.883
	<i>Intenso</i>	15.501
Esportes	<i>Moderado</i>	14.113
	<i>Intenso</i>	15.514
Jardinagem	<i>Moderado</i>	14.062
	<i>Intenso</i>	15.705

Fonte: Elaborado pela autora

5 CONCLUSÃO

Os objetivos inicialmente propostos para este estudo foram adequadamente desenvolvidos.

A parte inicial de levantamento bibliográfico levou à confirmação da não completa modelagem do padrão de geração entrópica pelo corpo humano. Notou-se que a defasagem da adequada modelagem se deve à complexidade e às diversas adaptações que são sofridas pelo corpo humano a fim de se adaptar ao meio em que se insere. Paralelamente, foi possível a compreensão e utilização dos modelos encontrados uma vez que todos os conceitos e associações feitas estão corretas e coerentes com as Leis da Termodinâmica.

O modelo descrito por Aoki (1989, 1990), que fora um embrião para a modelagem, se baseia em dados experimentais de um indivíduo específico. Apesar de ter possibilitado a adequada compreensão e reprodução, o modelo é pouco abrangente, devido à dependência de dados citada.

O modelo proposto por Rahman (2007) busca tornar o modelo de Aoki (1898, 1990) mais genérico. De fato, as proposições feitas por Rahman (2007) são pertinentes e cumprem seu papel de aumentar a independência dos dados experimentais. No entanto, devido à falta de detalhes dos procedimentos e a incompatibilidade de equações propostas, a reprodução exata do modelo de Rahman (2007) não foi possível. Esse modelo, por outro lado, contribuiu fortemente para o desenvolvimento do novo modelo proposto no presente trabalho.

O modelo de Silva e Annamalai (2008) apresentou boa descrição e uma acurácia na reprodução, em que os valores encontrados demonstraram uma compatibilidade de aproximadamente 95% dos valores lidos no artigo referência. No entanto, os autores não propõem nenhum tipo de interação entre o corpo e o meio. Sendo assim, esse modelo foi usado como base para o modelo proposto no presente trabalho.

Assim, o intuito do presente trabalho foi integrar a avaliação termodinâmica do organismo na micro escala, a partir da análise do metabolismo dos nutrientes, com o processo macro do corpo, a partir das trocas com o meio.

A elaboração de um novo modelo para definir a geração entrópica pelo corpo humano foi possível e adequada, visto a devida contemplação dos aspectos objetivados e pela similaridade com os dados previamente estabelecidos. Após a

aplicação das Leis Termodinâmicas ao corpo humano, o uso de bancos de dados sobre crescimento e peso médios da população, a aplicação das recomendações médicas de alimentação e exercício e o uso de equações para a definição do metabolismo e relação do corpo com o meio, foi possível definir um modelo que forneça a entropia gerada pelo indivíduo ao longo da vida. Com isso, pôde-se relacionar a taxa de geração entrópica ocasionada pela prática de atividade física e pelo ambiente ao qual o indivíduo está inserido com a longevidade, mantendo uma simplicidade matemática do modelo e trazendo inovação à modelagem desse sistema.

A validação do modelo por simulações foi realizada. O modelo foi capaz de definir uma geração entrópica acumulada de 11.327 kJ/kg.K para homens e 11.972 kJ/kg.K para mulheres, seguindo a expectativa de vida de respectivamente 70,21 e 74,7 anos conforme as referências mencionadas.

Os valores definidos no presente trabalho para limite de geração entrópica acumulada são, de modo geral, superiores aos valores definidos em trabalhos anteriores. As principais razões para isso são: a diferença na forma de calcular a taxa metabólica e os diferentes valores obtidos; as interações com o meio que são consideradas, as quais não são valoradas por Silva e Annamalai (2008) e nem descritas por Hershey (1974 *apud* Silva e Annamalai, 2008), e que aumentam o valor de geração entrópica; e a diferença da expectativa de vida para o caso base, que foi aproximadamente 5 anos menor no novo modelo, devido à diferenças em bancos de dados regionais.

Nesse modelo foram aplicadas algumas variações em parâmetros para que fossem comparadas algumas situações às quais o ser humano está susceptível. Nisso, concluiu-se que as menores gerações entrópicas ocorrem quanto o indivíduo é sedentário, mora em um lugar mais quente e apresenta uma dieta com maior ingestão de gorduras e menor ingestão de proteínas do que é recomendado. O nível de atividade foi, dentre as variáveis, a que apresentou maior impacto na geração entrópica. Assim, a partir da análise dos dados encontrados, conclui-se que a melhor condição é a não prática de atividades físicas, uma vez que a realização dessa causa um aumento da desordem dos sistemas e conseqüente falha precoce. Ou seja, a vida sedentária seria mais longínqua do que uma vida ativa.

Paralelamente, pelo levantamento do impacto da realização de atividade física na longevidade, comprovou-se que, conforme esperado, os estudos e recomendações afirmam que a prática adequada de exercícios proporciona uma melhoria na

expectativa de vida. Isto permitiu a inferência de que o conceito entrópico de que a longevidade é reduzida com a prática de atividade não é verossímil. Em análise realizada com dados de Dhana *et al.* (2016), notou-se que a entropia gerada acumulada pode ter um aumento de aproximadamente 40% com a prática de atividade física, em função do acréscimo na expectativa de vida gerado pelo hábito.

Por isso, o presente trabalho conclui e propõe que o valor de limite de entropia gerada acumulado deva ser, na verdade, variável. Partindo de um modelo base, modificando-o em função do estilo de vida e do meio no qual se insere, um organismo é capaz de resistir a maior ou menor geração entrópica antes da falha conjunta.

Os dados utilizados tanto para o modelo proposto quando para a reprodução dos demais modelos são descritos, a fim de permitir a reprodução dos estudos e possibilitar que outros pesquisadores possam comparar e sugerir alterações e melhorias na modelagem. Objetiva-se com isso a melhoria continuada do modelo, visto a forte aplicação que o mesmo pode possibilitar, abrangendo cada vez mais detalhes e aspectos externos às variações que o corpo pode sofrer quando submetido à atividade. Assim, graças ao forte potencial de utilização desta modelagem, investe-se para que os resultados sejam cada vez mais próximos à realidade. O uso de duas frentes de variáveis possibilita uma melhor comparação entre o processo e a bioanálise, tornando o indivíduo parte integrante do meio.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O modelo que foi sugerido no presente trabalho não contempla o ganho de expectativa de vida que é possibilitado com a prática regular de exercícios e de hábitos saudáveis. Desta forma, seria possível o aprimoramento do trabalho caso fosse definido um modelo híbrido. Nesse, a atividade física poderia ser contabilizada como um fator positivo, sendo esse definido, por exemplo, em função do tipo de atividade, grupamentos musculares recrutados e intensidade do exercício. Assim, o valor máximo de geração entrópica acumulada seria específico para cada pessoa.

No entanto, a definição desse fator não é trivial. Acredita-se serem necessários diversos parâmetros para que seja possível uma modelagem verossímil.

Segundo Mady (2014), “na verdade, nenhum dos resultados estaria errado ou inválido, apenas que a atividade física ajuda a manter o funcionamento do corpo e a evitar doenças (que podem levar a uma morte prematura), mas se praticada em excesso pode levar a um envelhecimento precoce.” Com esta afirmação, sugere-se que seja feita uma análise de otimização para o tempo e o tipo de esporte mais adequados para cada pessoa, sendo também influenciado pelo ambiente no qual ela se insere.

Sendo mais estruturada a relação de estilo de vida e longevidade, pode ser estabelecida uma relação de idade entrópica e cronológica, um conceito com uso em crescimento e grande aceitação. Poderia ser descrito se um certo nível de atividade é capaz de envelhecer ou rejuvenescer a pessoa. Ao mesmo tempo, se poderia afirmar quanto tempo uma determinada patologia é capaz de reduzir na expectativa de vida de seu portador.

Após uma minuciosa avaliação, entende-se uma demanda de aprimoramento de modelos e relações do funcionamento do corpo humano à luz da Termodinâmica. Nenhum dos modelos descritos levam em consideração, por exemplo, alterações fisiológicas do exercício físico, diferentes composições corporais ou a melhoria na eficiência dos processos que pode ocorrer com o aquecimento corpóreo durante e após a atividade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE NETO, Cyro; PELLEGRINI, Luiz Felipe; FERREIRA, Maurício Silva; OLIVEIRA JR, Silvio de; YANAGIHARA, Jurandir Itizo. **Exergy Analysis of Human Respiration under Physical Activity**. Laboratory of Environmental and Thermal Engineering, USP, Brazil. *Int. J. of Thermodynamics* 1301-9724. Vol. 13 (No. 3), pp. 105-109, 2010.

American Meteorological Society – AMS. **Glossary of Meteorology: Teten's formula**. Last edited: 20/Fev/2012. Disponível em: <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Tetens's_formula>. Acesso em: 09 nov. 2020.

ANNAMALAI, Kalyan.; SILVA, Carlos. **Entropy Stress and Scaling of Vital Organs over Life Span Based on Allometric Laws**. Texas A&M University, Texas, USA. *Entropy* 2012, 14, 2550-2577; doi:10.3390/e14122550

AOKI, Ichiro. **Entropy productions on the Earth and other planets of the Solar System**. Osaka Medical School, Osaka, Japan. *Journal of the Physical Society of Japan*. Vol. 52, No. 3 (1983) 1075-1078

AOKI, Ichiro. **Entropy flow and entropy production in the human body in basal conditions**. Osaka Medical School, Osaka, Japan. *J. Theor. Biol.*, 141: 11-21, 1989.

AOKI, Ichiro. **Effects of exercise and chills on entropy production in human body**. Osaka Medical School, Osaka, Japan. *J. Theor. Biol.*, 145:421 - 428, 1990.

AOKI, Ichiro. **Entropy production in human life span: a thermodynamical measure for aging**. Osaka Medical College, Japan. *Age*, Vol. I J, 29-31, 1994.

AQUILINI, Eleonora; COSENTINO, Ugo; PASQUALETTI, Nicola; SIGNORI, Francesca. **Julius Robert Mayer and the principle of energy conservation**. *ChemTexts* (2021) 7:22. <https://doi.org/10.1007/s40828-021-00147-w>

BORGNACKE, Claus; SONNTAG, Richard E. **Fundamentos da Termodinâmica**; Série Van Wylen. Tradução da 7ª edição americana, Editora Blucher, 2009.

BURTON, AC; BAZETT, HC. **A study of the average temperature of the tissues, of the exchanges of heat and vasomotor responses in man by means of a bath calorimeter**. (1936) *American Journal of Physiology-Legacy Content*, 117(1), 36–54. doi:10.1152/ajplegacy.1936.117.1.36

CALLE, Eugenia E; KAAKS, Rudolf. **Overweight, obesity and cancer: epidemiological evidence and proposed mechanisms**. *Nature Reviews Cancer*, (2004), 4(8), 579–591. doi:10.1038/nrc1408

CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION/National Center for Health Statistics - CDC. **CDC Growth Charts**: United States. Number 314. December 4, 2000 (Revised)

CHAPRA, Steven C.; CANALE, Raymond P. **Métodos numéricos para engenharia**. Tradução técnica: Helena Castro. Quinta edição. Porto Alegre: AMGH, 2011.

COTES, J. E. **The role of body temperature in controlling ventilation during exercise in one normal subject breathing oxygen**. From the Pneumoconiosis Research Unit of the Medical Research Council, Llandough Hospital, Penarth, Glamorganshire. *J. Physiol* (1955) 129, 554-563

DHANA, Klodian; KOOLHAAS, Chantal M.; BERGHOUT, Mathilde A.; PEETERS, Anna; IKRAM, M. Arfan; TIEMEIER, Henning; HOFMAN, Albert; NUSSELDER, Wilma; FRANCO, Oscar H. **Physical activity types and life expectancy with and without cardiovascular disease: the Rotterdam Study**. October 13, 2016. *Journal of Public Health*, Vol. 39, No. 4, pp. e209–e218. doi:10.1093/pubmed/fdw110 |

Faculdade de Medicina da UFMG. **Obesidade é o principal fator de risco associado aos jovens que morrem por COVID-19**. 30 de abril de 2020. Disponível em: <<https://www.medicina.ufmg.br/obesidade-e-o-principal-fator-de-risco-associado-aos-jovens-que-morrem-por-covid-19/>>. Acesso em: 09 nov. 2020.

The World Health Organization, The Food and Agriculture Organization of the United Nations, The United Nations University - FAO/WHO/UNU. **Energy and protein requirements**. 1985, Office of Publications, World Health Organization, Geneva, Switzerland. Disponível em: < <http://www.fao.org/3/aa040e/AA040E00.htm#TOC>>. Acesso em: 17 jan. 2021

FONTANA, Luigi; HU, Frank B. **Optimal body weight for health and longevity: bridging basic, clinical, and population research**. USA. *Aging Cell* (2014) 13, pp391–400. Doi: 10.1111/accel.12207

FRIED, Linda P; TANGEN, Catherine M; WALSTON, Jeremy; NEWMAN, Anne B; HIRSCH, Calvin; GOTTDIENER, John; SEEMAN, Teresa; TRACY, Russell; KOP, Willem J; BURKE, Gregory; McBURNIE, Mary Ann. **Frailty in Older Adults: Evidence for a Phenotype**. *Journal of Gerontology: MEDICAL SCIENCES* (2001) Vol. 56A, No. 3, M146–M156.

GARCIA, Matheus Martinez; OLIVEIRA JR, Silvio de; MADY, Carlos Eduardo Keutenedjian. **Human body exergy analysis as a function of body fat and muscle percentage. Applications to thermal comfort conditions**. 16 Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. November 07-10, 2016, Vitória, ES, Brazil.

GARCIA, Matheus Martinez; UNE, Rafael Yoshimori; OLIVEIRA JR, Silvio de; MADY, Carlos Eduardo Keutenedjian. **Exergy Analysis and Human Body Thermal Comfort Conditions: Evaluation of Different Body Compositions**. São Paulo, Brazil. *Entropy* 2018, 20, 265; doi:10.3390/e20040265

GIVONI, B.; GOLDMAN, R. F. **Predicting rectal temperature response to work, environment, and clothing**. US Army Research Institute of Environmental Medicine, Massachusetts, U.S.A. *Journal of Applied Physiology*, Vol. 32, No. 6, June 1972.

HARDY, James D. **The radiation of heat from the human body.** *The human skin as a black-body radiator.* Affiliation with the New York Hospital, USA. February 24, 1934.

HARDY, James D; DuBOIS, Eugene F. With technical assistance of G. F. Soderstrom. **The technic of measuring radiation and convection.** Cornell Medical School, New York (1938) *The Journal of Nutrition*, 15 (5), 461-475.

HARRIS, J. Arthur; BENEDICT, Francis G. **A biometric study of human basal metabolism.** Nutrition Laboratory and Station for Experimental Evolution, Carnegie Institution of Washington. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 4, n. 12, p. 370, 1918.

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

HENRIQUES, Izabela Batista; OLIVEIRA JR, Silvio de. **Tumour cells and life expectancy: an exergy approach.** USP, Brazil. *Int. J. Exergy*, Vol. 31, No. 2, 2020

HENRIQUES, Izabela Batista; MADY, Carlos Eduardo Keutenedjian; OLIVEIRA JR, Silvio de. **Évaluation exergetique des changements metaboliques sur l'esperance de vie des fumeurs.** 2020, ISTE OpenScience, openscience.fr.

HOCHSTEIN, Stefan; RAUSCHENBERGER, Philipp; WEIGAND, Bernhard; SIEBERT, Tobias; SCHMITT, Syn; SCHLICHT, Wolfgang; PREVOROVSKA, Světlana; MARSIK, František: **Assessment of physical activity of the human body considering the thermodynamic system.** *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, August 2015. Source: PubMed.

Institute of Medicine – IOM. **Dietary Reference Intakes (DRI) for Energy, Carbohydrate, Fiber, Fat, Fatty Acids, Cholesterol, Protein, and Amino Acids.** The National Academies Press, Washington, D.C., USA. www.nap.edu. 2002.

KANDJOV, Iwajlo M. **Heat and mass exchange processes between the surface of the human body and ambient air at various altitudes.** Medical Climatology Department, Bulgaria. *Int J Biometeorol* (1999) 43:38–44

KAVEH, Mohammad; ABBASPOUR-GILANDEH, Yousef; NOWACKA, Malgorzata. **Optimisation of microwave-rotary drying process and quality parameters of terebinth.** *Biosystems Engineering* 208 (2021) 113-130.

KUDDUSI, Lütfullah. **Thermodynamics and life span estimation.** *Energy* 80 (2015) 227e238.

LADDU, Deepika R; LAVIE, Carl J; PHILLIPS, Shane A; ARENA, Ross. **Physical activity for immunity protection: Inoculating populations with healthy living medicine in preparation for the next pandemic.** *Progress in Cardiovascular Diseases* 64 (2021) 102–104

LEE, Duck-chul; BRELLENTHIN, Angelique G.; THOMPSON, Paul D.; SUI, Xuemei; LEE, I-Min; LAVI, Carl J. **Running as a Key Lifestyle Medicine for Longevity.** *Progress in Cardiovascular Diseases* 60 (2017) 45 – 55, ScienceDirect. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pcad.2017.03.005>

LESKINEN, Tuija; STENHOLM, Sari; AALTO, Ville; HEAD, Jenny; KIVIMÄKI, Mika; VAHTERA, Jussi. **Physical activity level as a predictor of healthy and chronic disease-free life expectancy between ages 50 and 75.** *Age and Ageing* 2018; 47: 423–429 doi: 10.1093/ageing/afy016. Published electronically 15 March 2018

LU, Shu-Hua; DAI, Yu-Tzu. **Normal body temperature and the effects of age, sex, ambient temperature and body mass index on normal oral temperature: A prospective, comparative study.** Taiwan. *International Journal of Nursing Studies* 46 (2009) 661–668. doi: 10.1016/j.ijnurstu.2008.11.006

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

MADY, Carlos Eduardo Keutenedjian; ALBUQUERQUE, Cyro; FERNANDES, Tiago Lazzaletti; HERNANDEZ, Arnaldo José; SALDIVA, Paulo Hilário Nascimento; YANAGIHARA, Jurandir Itizo; OLIVEIRA JÚNIOR, Silvio de. **Exergy performance of human body under physical activities.** *Energy* 62 (2013) 370 - 378

MARCELL, Taylor J. **Sarcopenia: Causes, Consequences and Preventions.** *Journal of Gerontology: Medical Sciences* (2003) Vol. 58A, No. 10, 911-916.

MENON, Daiane; DOS SANTOS, Jacqueline Schaurich. **Consumo de proteína por praticantes de musculação que objetivam hipertrofia muscular** (*Protein consumption by bodybuilding practitioners aiming muscle hypertrophy*). Clínica Médica do Exercício e do Esporte, Universidade de Caxias do Sul – UCS, RS, Brasil. *Rev Bras Med Esporte* – Vol. 18, no 1 – Jan/Fev, 2012

Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Boletim Epidemiológico Especial - 14.** Brasil, 26 de abril de 2020. Disponível em: <www.saude.gov.br/coronavirus>. Acesso em: 09 nov. 2020.

MOLLIET, Débora Silva; MADY, Carlos Eduardo Keutenedjian. **Exergy analysis of the human body to assess thermal confort conditions: Comparison of the thermal responses of males and females.** *Case Studies in Thermal Engineering* 25 (2021) 100972

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N.; BOETTNER, Daisie D.; BAILEY, Margaret B. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia.** Tradução de *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 7th ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

NIEMAN, David C; WENTZ, Laurel M. **The compelling link between physical activity and the body's defense system.** *Journal of Sport and Health Science* 8 (2019) 201-217. Appalachian State University, United States of America.

Organização Mundial da Saúde – OMS (World Health Organization – WHO). **Physical activity**. Fevereiro/2018. Disponível em: <<https://www.who.int/>>. Acesso em: 09 nov. 2020.

Organização Pan-Americana de Saúde – OPAS (Pan American Health Organization – PAHO). **OMS lança novas diretrizes sobre atividade física e comportamento sedentário**. Novembro/2020. Disponível em: <<https://www.paho.org/pt/noticias/26-11-2020-oms-lanca-novas-diretrizes-sobre-atividade-fisica-e-comportamento-sedentario>>. Acesso em: 02 out. 2021.

PATEL, Arvind Kumar; RAJPUT, S. P. S. **Thermodynamic life cycle assessment of humans with considering food habits and energy intake**. *Saudi Journal of Biological Sciences* 28 (2021) 531–540.

Public Data – Google, 2020. **Indicadores de Desenvolvimento Mundial**, dados do Banco Mundial, última atualização em 8 de abril de 2020. Disponível em: <<https://www.google.com/publicdata/directory?hl=pt&dl=pt#!dp=Banco+Mundial>>. Acesso em: 18 nov 2020.

RAHMAN, Mohammad Azizur: **A novel method for estimating the entropy generation rate in a human body**. *Thermal Science*: Vol. 11 (2007), No. 1, pp. 75-92

RAMOS, Vinícius Faria; PINHEIRO, Olivert Soares; COSTA JR., Esly Ferreira da; COSTA, Andréa Oliveira Souza da. **A method for exergetic analysis of a real kraft biomass boiler**. *Energy* 183 (2019) 946-957

ROSEN, Marc A. **Assessing energy technologies and environmental impacts with the principles of thermodynamics**. *Applied Energy* 72 (2002) 427–441

SCHNEIDER, Patrícia; MEYER, Flávia. **As equações de predição da taxa metabólica basal são apropriadas para adolescentes com sobrepeso e obesidade?** Sociedade Brasileira de Medicina do Esporte. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Brasil. *Rev Bras Med Esporte*, Vol. 11, Nº 3 – Mai/Jun, 2005

SILVA, Carlos; ANNAMALAI, Kalyan.: **Entropy generation and human aging: lifespan entropy and effect of physical activity level**. Texas A&M University, Texas, USA. *Entropy* 2008, 10, 100-123; DOI: 10.3390/entropy-e10020100

SILVA, Carlos; ANNAMALAI, Kalyan. **Entropy Generation and Human Aging: Lifespan Entropy and Effect of Diet Composition and Caloric Restriction Diets**. Texas A&M University, Texas, USA. *Journal of Thermodynamics*, 2009, Article ID 186723, 10 pages doi:10.1155/2009/186723

SILVA, Suzimara Reis; BONATO, Gabriel; COSTA JR., Esly Ferreira da; SARROUH, Boutros; COSTA, Andréa Oliveira Souza da. **Specific chemical exergy prediction for biological molecules using hybrid models**. *Chemical Engineering Science* 235 (2021) 116462

SILVEIRA, Matheus Pelinski da; FAGUNDES, Kimberly Kamila da Silva; BIZUTI, Matheus Ribeiro; STARCK, Édina; ROSSI, Renata Calciolari; SILVA, Débora Tavares de Resende e. **Physical exercise as a tool to help the immune system against COVID-19: na integrative review of the current literature.** *Clinical and Experimental Medicine*, 2020. Brazil. <https://doi.org/10.1007/s10238-020-00650-3>

SUN, Qi; TOWNSEND, Mary K; OKEREKE, Olivia I; FRANCO, Oscar H; HU, Frank B; GRODSTEIN, Francine. **Adiposity and weight change in mid-life in relation to healthy survival after age 70 in women: prospective cohort study.** *BMJ*: first published as 10.1136/bmj.b3796 on 29 September 2009.

SUND-LEVANDER, Märtha; FORSBERG, Christina; WAHREN, Lis Karin. **Normal oral, rectal, tympanic and axillary body temperature in adult men and women: a systematic literature review.** Nordic College of Caring Sciences. Sweden. *Scand J Caring Sci*; 2002; 16; 122–128

TOSS, Fredrik; WIKLUND, Peder; NORDSTRÖM, Peter; NORDSTRÖM, Anna. **Body composition and mortality risk in later life.** Sweden. Published by Oxford University Press on behalf of the British Geriatrics Society. *Age and Ageing*, 2012; 41: 677–681 doi: 10.1093/ageing/afs087.

TRELA, Marian; KWIDZIŃSKI, Roman. **Thermodynamics aspects of a resonant method for detection and destruction of pathogens.** Gdańsk, Poland. E3S Web of Conferences 70, 03015 (2018) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20187003015>

TURHAN, Cihan; AKKURT, Gulden Gokcen. **The relation between thermal comfort and human-body exergy consumption in a temperate climate zone.** Turkey. *Energy & Buildings* 205 (2019) 109548.

WANG, Lijuan; YIN, Hui; DI, Yuhui; LIU, Yanfeng; LIU, Jiaping. **Human local and total heat losses in different temperature.** *Physiology & Behavior*, 157 (2016) 270–276. China.

WANG, Haiying; HU, Songtao. **Analysis on body heat losses and its effect on thermal sensation of people under moderate activities.** *Building and Environment*, 142 (2018) 180–187. China.

WEYH, Christopher; KRÜGER, Karsten; STRASSER, Barbara. **Physical Activity and Diet Shape the Immune System during Aging.** Germany/Austria. *Nutrients* 2020, 12, 622; doi:10.3390/nu12030622.

WILLETT, Walter C; DIETZ, William H; COLDITZ, Graham A. **Guidelines for healthy weight.** *New England Journal of Medicine*. (1999) Review Article. DOI: 10.1056/NEJM199908053410607. Source: PubMed

WINETT, Richard A; CARPINELLI, Ralph N. **Examining the validity of exercise guidelines for the prevention of morbidity and all-cause mortality.** (2000) *Annals of Behavioral Medicine*. DOI: 10.1007/BF02895119. Source: PubMed

APÊNDICE A – Valores lidos com o GetData Graph Digitizer 2.26 de geração entrópica por kg de peso por trimestre em função da idade em anos de acordo com Silva e Annamalai (2008) para homens e mulheres

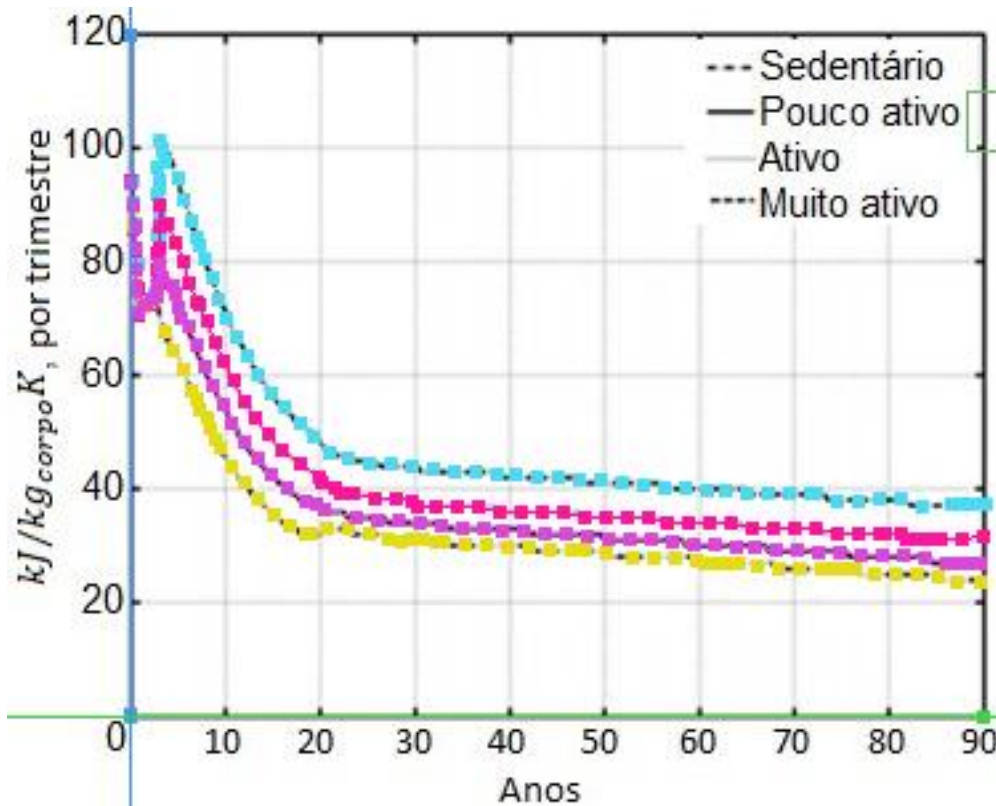
	Homens	9,013	56,883	46,234	32,052
0,016	96,832	9,507	55,369	47,418	31,936
0,066	95,155	9,984	53,832	48,602	31,819
0,115	93,478	10,477	52,318	49,786	31,656
0,164	91,801	11,003	50,827	50,970	31,516
0,197	90,147	11,595	49,359	52,138	31,377
0,181	88,470	12,204	47,915	53,322	31,214
0,148	84,696	12,813	46,471	54,507	31,074
0,230	81,761	13,454	45,073	55,674	30,981
0,362	79,967	14,145	43,722	56,859	30,888
0,526	73,422	14,901	42,441	58,026	30,748
0,576	72,490	15,707	41,207	58,783	30,631
0,674	71,861	16,546	39,995	59,194	30,585
0,822	70,860	17,418	38,877	59,951	30,422
0,987	71,908	18,372	37,922	61,135	30,352
1,118	72,187	19,408	37,154	61,546	30,282
1,382	72,420	19,967	36,874	62,730	30,119
1,595	72,770	20,493	36,501	63,915	30,002
1,924	72,956	21,612	35,989	65,082	29,886
2,089	73,166	22,763	35,639	66,266	29,746
2,352	73,399	23,931	35,383	67,451	29,630
2,549	73,655	25,082	35,080	68,618	29,513
2,747	74,167	26,250	34,778	69,803	29,373
2,747	74,563	27,418	34,521	70,970	29,210
2,813	74,959	28,586	34,288	72,155	29,071
2,813	75,262	29,770	34,079	73,339	28,954
2,928	77,894	30,115	34,009	74,507	28,814
3,174	79,618	30,954	33,916	75,691	28,628
3,454	78,081	31,299	33,823	76,875	28,488
3,947	76,543	32,138	33,753	78,059	28,349
4,359	74,983	33,306	33,590	79,243	28,209
4,720	74,167	34,490	33,450	79,786	28,185
4,934	73,515	35,658	33,310	80,970	27,999
5,082	72,630	36,826	33,147	81,595	27,929
5,378	70,976	38,010	33,007	82,780	27,813
5,740	69,392	39,178	32,868	83,947	27,673
6,135	67,808	39,819	32,704	85,132	27,510
6,513	66,224	40,362	32,728	86,316	27,393
6,875	64,640	41,546	32,611	87,484	27,254
7,237	63,056	42,714	32,495	88,668	27,137
7,632	61,496	43,898	32,332	89,852	27,044
8,059	59,935	45,066	32,192		
				Mulheres	
8,520	58,397			0,082	94,969

0,115	93,291	9,145	52,131	51,793	28,721
0,132	91,614	9,375	51,060	52,977	28,581
0,132	89,937	9,507	50,547	54,145	28,418
0,148	88,260	9,819	49,499	55,313	28,232
0,148	86,583	10,132	48,591	56,464	27,999
0,164	84,906	10,099	47,869	57,615	27,766
0,197	83,229	10,444	46,984	58,783	27,859
0,230	81,551	11,316	44,049	59,967	27,766
0,230	79,874	11,842	42,534	63,997	27,370
0,230	78,197	12,220	41,579	65,165	27,114
0,296	74,843	12,434	41,090	66,349	27,044
0,543	73,212	12,780	40,089	67,516	26,997
0,576	72,281	13,322	38,994	68,701	26,811
0,461	72,211	13,421	38,691	69,424	26,718
0,822	70,650	13,635	38,155	69,852	26,462
1,118	71,745	13,915	37,526	70,609	26,718
1,168	72,304	14,260	36,734	71,020	26,648
1,628	72,933	14,622	36,012	71,776	26,508
2,549	73,655	15,641	34,288	72,961	26,438
2,681	73,701	16,151	33,776	74,145	26,415
2,747	74,167	17,763	32,914	75,313	26,322
2,747	74,703	19,095	34,451	76,480	26,019
2,977	75,239	19,770	34,824	77,665	25,996
2,993	76,963	20,247	34,871	79,704	25,670
3,470	75,448	20,954	34,638	80,033	25,693
3,602	74,517	22,122	34,358	81,217	25,623
5,230	71,558	23,290	34,055	82,040	25,600
5,609	69,998	24,457	33,729	82,401	25,577
5,970	68,437	29,359	32,565	83,224	25,483
6,349	66,853	30,526	32,285	84,391	25,344
6,694	65,246	32,434	31,936	85,576	25,204
7,023	63,639	39,819	30,492	86,760	25,041
7,303	62,614	41,003	30,468	87,516	24,971
7,303	60,936	42,155	30,072	88,701	24,878
7,763	59,399	48,273	29,280	89,885	24,901
7,895	58,467	49,441	29,047		
8,224	56,860	48,750	29,210		
8,651	54,624	49,934	29,024		
8,734	53,715	50,609	28,861		
9,013	53,017	51,102	28,745		

APÊNDICE B – Comparativo entre os valores definidos na reprodução do modelo de Silva e Annamalai (2008) e valores lidos no gráfico

Idade [anos]	Geração entrópica por kg de peso por trimestre		Valor lido no gráfico [kJ/kg.K por trimestre]	Comparação entre valores	
	forma (a)	forma (b)			
0	92,86	89,65	96,8321	95,9%	100,4%
0,25	86,45		81,761	105,7%	
0,33	70,46	70,70	79,9674	88,1%	92,2%
0,50	70,94		73,4218	96,6%	
0,58	68,59	69,08	72,4901	94,6%	95,7%
1	69,56	69,56	71,9078	96,7%	96,7%
1,08	69,50		72,1873	96,3%	
2	70,18	70,18	73,1656	95,9%	95,9%
2,92	70,55		77,8942	90,6%	
3		77,41	79,618		97,2%
5		69,33	72,6299		95,5%
8		56,01	59,9348		93,5%
9		53,43	56,8833		93,9%
12		44,47	47,9152		92,8%
15		39,96	42,4412		94,2%
18		35,97	37,9222		94,8%
20		33,65	36,874		91,3%
30		32,54	34,0089		95,7%
40		31,43	32,7277		96,0%
50		30,32	31,6562		95,8%
60		29,21	30,4216		96,0%
70		28,10	29,3734		95,7%
80		26,99	28,1854		95,8%
90		25,88	27,044		95,7%

APÊNDICE C – Valores lidos com o GetData Graph Digitizer 2.26 de geração entrópica por kg de peso por trimestre em função da idade em anos de acordo com Silva e Annamalai (2008) para homens em diferentes níveis de atividade



	Sedentário	9,003	48,783	42,118	29,418
		9,408	47,143	44,330	28,995
0,000	93,333	10,623	43,915	46,573	28,836
0,280	89,524	11,963	40,900	47,913	28,836
0,280	86,191	13,427	38,042	50,156	28,783
0,561	77,619	15,047	35,397	52,866	27,831
0,561	74,286	16,916	33,280	55,109	27,672
0,841	71,429	18,536	31,905	57,414	27,672
1,402	71,905	19,003	31,852	59,626	27,302
1,963	72,857	20,685	33,069	60,498	26,614
2,523	73,333	22,897	32,857	61,838	26,825
2,928	72,116	25,109	32,011	62,741	26,720
2,928	71,217	27,259	30,847	64,081	26,561
3,520	67,513	28,692	30,688	66,293	26,296
4,517	64,127	29,502	30,794	68,474	25,926
5,514	60,741	30,935	30,794	70,717	25,714
6,417	57,249	32,274	30,688	72,960	25,503
6,885	55,556	33,178	30,476	74,330	25,926
7,321	53,810	35,389	30,053	75,203	25,767
8,006	52,222	37,632	29,788	76,542	25,661
8,318	50,476	39,875	29,683	78,474	24,921

80,685	24,709	28,224	34,127	2,866	81,376
82,991	24,815	30,467	33,704	2,960	82,434
85,203	24,074	30,654	34,127	2,960	86,243
87,290	23,439	32,679	33,280	3,022	90,053
89,626	23,545	34,922	33,069	3,614	86,825
		37,165	32,910	3,988	86,614
	Pouco Ativo	39,377	32,540	4,735	83,545
		41,558	32,169	5,576	80,000
0,093	93,810	43,801	31,958	6,293	76,085
0,187	90,000	46,044	31,799	7,103	72,910
0,436	86,243	48,256	31,482	7,165	72,540
0,561	82,434	50,436	31,111	8,037	69,365
0,654	78,624	52,679	30,952	8,941	65,873
0,623	74,815	54,922	30,794	9,844	62,328
0,654	75,767	57,134	30,423	10,841	58,836
0,779	71,058	59,315	30,000	11,932	55,450
1,713	72,381	61,558	29,841	13,146	52,275
2,305	73,175	63,801	29,735	14,517	49,312
2,773	73,598	66,013	29,418	16,075	46,667
2,773	75,079	68,224	29,048	17,944	44,339
2,804	75,714	70,467	28,889	19,813	42,116
2,960	78,889	72,710	28,783	20,062	40,847
3,146	79,471	74,922	28,466	21,464	39,841
3,458	77,196	77,134	28,095	22,025	38,995
4,455	75,503	79,377	27,989	23,645	39,048
4,361	75,926	81,620	27,884	25,826	38,148
4,860	74,233	83,832	27,407	28,069	38,042
4,984	71,958	86,013	26,667	29,813	37,619
5,452	70,159	87,477	26,667	30,218	36,878
6,044	68,571	88,193	26,667	32,305	36,667
6,916	65,079	89,720	26,667	34,548	36,825
7,757	61,534			36,791	36,667
8,692	58,042		Ativo	38,972	35,820
9,720	54,603			41,215	35,714
10,779	51,270	0,000	94,286	43,458	35,714
11,994	48,095	0,280	89,524	45,670	35,503
13,396	45,132	0,312	85,714	47,882	34,974
14,891	42,328	0,498	81,905	50,125	34,815
16,542	39,841	0,654	78,095	52,368	34,762
18,411	37,831	0,748	75,291	54,579	34,550
19,502	36,931	0,841	71,429	56,760	34,021
20,467	36,296	0,779	71,058	59,003	33,862
21,277	36,138	0,841	70,476	61,246	33,810
21,589	35,503	2,181	72,593	63,458	33,598
23,801	34,762	2,991	76,138	65,670	33,069
26,013	34,392	2,866	78,624	67,913	32,910

70,156	32,857	2,960	84,550	34,112	42,963
72,368	32,646	2,866	84,974	36,355	42,857
74,579	32,116	3,209	88,360	38,567	42,540
76,822	31,958	2,928	92,116	40,748	42,222
79,128	32,064	2,960	92,698	42,991	42,064
79,751	31,905	2,991	94,074	45,234	41,905
81,402	31,958	2,897	96,508	47,446	41,587
81,932	31,005	3,022	101,323	49,657	41,270
83,271	30,741	3,489	100,159	51,869	41,005
84,175	30,952	3,645	97,672	54,081	40,582
85,452	30,952	4,922	94,868	56,262	40,159
87,695	30,952	4,922	94,603	58,474	39,894
89,938	31,217	5,545	90,900	60,717	39,683
		6,324	87,302	62,928	39,365
	Muito Ativo	6,885	84,497	65,140	39,048
		7,196	83,069	67,383	38,889
0,156	94,286	7,757	80,582	69,626	38,836
0,249	90,476	8,567	77,037	71,869	38,836
0,436	86,667	9,377	73,492	72,399	38,836
0,717	79,418	10,218	69,894	74,548	37,831
0,498	76,508	11,184	66,455	76,791	37,566
0,654	75,767	12,274	63,122	79,034	37,884
0,623	74,815	13,427	59,841	81,277	37,884
0,779	74,868	14,735	56,825	83,427	36,825
0,748	72,751	16,262	54,127	86,636	36,931
0,779	71,058	17,882	51,482	87,913	36,931
0,841	71,852	19,439	48,836	88,879	36,931
2,305	72,857	21,122	46,402	89,439	36,984
2,648	74,074	23,053	45,027	90,156	36,931
2,835	76,561	25,203	44,444		
2,960	79,418	27,446	44,074		
3,053	80,106	29,657	43,598		
2,991	83,915	31,869	43,122		