



Influência de variáveis cinemáticas na economia de corrida
em corredores de longa distância

Erivelton do Nascimento Santos

Porto, 2024



Influência de variáveis cinemáticas na economia de corrida em corredores de longa distância

Dissertação apresentada com vista à obtenção do 2º ciclo em Treino Desportivo, especialização em Treino de Alto Rendimento, da Faculdade de Desporto da Universidade do Porto, ao abrigo do Decreto-Lei nº 74/2006, de 24 de março, na redação dada pelo Decreto-Lei nº 65/2018 de 16 de agosto.

Orientador: Professor Doutor Filipe Almeida Viana Conceição

Coorientador: Professor Doutor Ricardo Jorge Pinto Fernandes

Erivelton do Nascimento Santos

Porto, 2024



Santos, E. N. (2024). Influência de variáveis cinemáticas na economia de corrida em corredores de longa distância. Porto: E. Santos. Dissertação de 2º ciclo em Treino Desportivo – Treino de Alto Rendimento. Faculdade de Desporto da Universidade do Porto.

PALAVRAS-CHAVE: BIOMECÂNICA, CINEMÁTICA, ECONOMIA DE CORRIDA.

“à mon fils, mon bonheur”

Agradecimentos

- À minha mãe, ao meu pai e à minha irmã, meus pilares, pelo apoio incondicional em todas as etapas da minha vida pessoal e profissional.
- À minha companheira, Laura Le Cloirec por todo incentivo e motivação diária.
- Ao meu orientador, Professor Doutor Filipe Almeida Viana Conceição pelos ensinamentos, orientações e suportes durante o processo.
- Ao meu coorientador, Professor Doutor Ricardo J. Fernandes por toda atenção, ensinamentos e auxílio durante a construção desse trabalho.
- À minha amiga, Mestre Mayara Silva por toda ajuda e cooperação desde o início do trabalho.
- Aos meus amigos de turma, Bernardo Licastro, Felipe Sousa e Vinícius Mantuano por toda partilha e ajuda em todos os momentos do curso.
- Aos professores do mestrado, por todo incentivo e conhecimentos partilhados.
- A todos os colegas do Laboratório de Biomecânica do Porto, pelas suas contribuições durante as coletas.
- A todos aqueles que, direta ou indiretamente, fizeram parte desse processo, meus sinceros agradecimentos.

Índice

Agradecimentos	V
Índice de tabelas	IX
Índice de figuras	XI
Resumo	XIII
Abstract	XV
1. Introdução	1
2. Material e métodos	3
3. Resultados	9
4. Discussão	17
5. Conclusões	23
6. Referências bibliográficas	25

Índice de tabelas

Tabela 1	Valores médios \pm desvio padrão da idade e características antropométricas e valores de mediana e desvio interquartil da rotina de treinos dos participantes.	3
Tabela 2	Descrição das variáveis cinemáticas de contribuição (aeróbia e anaeróbia láctica) e dispêndio energético e comparação entre os três patamares de corrida.	10
Tabela 3	Coefficientes simples de regressão linear para dispêndio energético (kJ) como variável dependente nos patamares 1, 2 e 3.	12

Índice de figuras

Figura 1	Momento de repouso para obtenção dos dados fisiológicos de pré-teste.	4
Figura 2	Esquema representativo do protocolo incremental de corrida.	5
Figura 3	Coleta de amostra de sangue capilar durante o protocolo incremental de corrida para análise de lactato.	6
Figura 4	Descrição das fases do ciclo da corrida utilizada como referência para as variáveis biomecânicas do estudo.	7
Figura 5	Valores médios \pm desvio padrão e diferenças em variáveis biomecânicas e no dispêndio energético entre os três patamares de corrida.	11
Figura 6	Relação entre a variável tempo de balanço e o dispêndio energético.	13
Figura 7	Relação entre a variável tempo de passada e dispêndio energético.	13
Figura 8	Relação entre a variável frequência da passada e dispêndio energético.	14
Figura 9	Relação entre a variável comprimento do passo e dispêndio energético.	15

Resumo

A economia de corrida é influenciada por uma variada e complexa interação de fatores, dentre eles os biomecânicos, e refere-se à produção sustentada de energia e da sua conversão em movimento, refletindo a demanda energética para correr a uma velocidade submáxima constante. O objetivo desta dissertação centrou-se em compreender como alterações individuais na cinemática do ciclo gestual podem afetar a economia de corrida. Participaram do estudo 25 corredores de longa distância de 32.5 ± 8.5 anos de idade, os quais realizaram um protocolo incremental em passadeira, que consistiu em três patamares, com duração de 3 min e 30 s de recuperação. Os dados são apresentados em média e desvio padrão, mediana e desvio interquartil, enquanto uma ANOVA de uma via de medidas repetidas e uma análise post-hoc foram realizadas para comparar os valores entre os patamares. Adicionalmente, realizou-se uma regressão linear simples para analisar a relação entre as variáveis cinemáticas e o dispêndio energético. Os resultados evidenciaram que os tempos de contato e passada, assim como o duty factor apresentaram uma diminuição entre os patamares ($p < 0.01$), enquanto o tempo de voo, frequência e o comprimento do passo aumentaram a cada patamar ($p < 0.01$). O tempo de balanço teve uma relação com dispêndio energético no segundo e terceiro patamares ($p > .041$ e $.014$) explicando 17 e 23.4% da sua variabilidade. O tempo de passada apresentou associação com o dispêndio energético no primeiro e segundo patamares ($p > .016$ e $.038$) influenciando 23 e 17% da sua variação, enquanto a respectiva frequência mostrou relação no primeiro e segundo patamares ($p > .005$ e $.026$) explicando 29 e 20% do custo energético. O comprimento do passo teve associação com o dispêndio energético em todos os patamares, explicando em 29, 31 e 27.2 % da variação. Portanto, conclui-se que as alterações e as relações entre variáveis cinemáticas do ciclo gestual e economia de corrida parecem estar relacionadas à capacidade de corredores em promover ajustes individuais de trabalho mecânico interno e externo para otimizar consumo de energia.

PALAVRAS-CHAVE: CORRIDA; BIOMECÂNICA; CINEMÁTICA; FISILOGIA; ECONOMIA DE CORRIDA.

Abstract

Running economy is influenced by a variety of complex interactions, including biomechanical factors, and refers to the sustained production of energy and its conversion into movement, reflecting the energy demand to run at a constant submaximal speed. The aim of this dissertation was to understand how individual changes in the kinematics of the gestural cycle can affect running economy. Twenty-five long-distance runners aged 32.5 ± 8.5 years participated in the study, who performed an incremental protocol on a treadmill, consisting of three stages lasting 3 min and 30 s of recovery. Data are presented as mean and standard deviation, median and interquartile range, while a one-way repeated measures ANOVA and a post-hoc analysis were performed to compare values between stages. Additionally, a simple linear regression was performed to analyze the relationship between kinematic variables and energy expenditure. The results showed that the contact and stride times, as well as the duty factor, decreased between the levels ($p < 0.01$), while the flight time, frequency and step length increased at each level ($p < 0.01$). The swing time was related to energy expenditure in the second and third levels ($p > .041$ and $.014$) explaining 17 and 23.4% of its variability. The stride time was associated with energy expenditure in the first and second levels ($p > .016$ and $.038$) influencing 23 and 17% of its variation, while the respective frequency showed a relationship in the first and second levels ($p > .005$ and $.026$) explaining 29 and 20% of the energy cost. Step length was associated with energy expenditure at all levels, explaining 29, 31 and 27.2% of the variation. Therefore, it is concluded that the changes and relationships between kinematic variations of the gestural cycle and running economy appear to be related to the ability of runners to promote individual configurations of internal and external mechanical work to optimize energy consumption.

KEYWORDS: RUNNING; BIOMECHANICS; KINEMATICS; PHYSIOLOGY; RUNNING ECONOMY.

1. Introdução

Correr é uma forma fundamental de locomoção humana, um exercício físico muito popular e o padrão de movimento mais onipresente nos esportes (Folland et al., 2017). Nos últimos anos, o número de participações em corridas de rua tem aumentado consideravelmente, podendo ser explicado pela natureza desse tipo de exercício físico, que oferece uma opção de baixo custo com muito poucas despesas extras (León-Guereño et al., 2020). Embora a corrida seja considerada uma abordagem eficaz para manutenção da saúde, adicionalmente os corredores estão buscando cada vez mais melhorar seu desempenho atlético, o qual é afetado por um complexo de fatores, como o consumo máximo de oxigênio (VO_{2max}), limiar anaeróbio e economia de corrida (Liu et al., 2022; Sousa et al., 2015).

A economia de corrida refere-se à produção sustentada de energia predominantemente aeróbica e da conversão dessa energia em movimento (Folland et al., 2017), podendo ser representada pela demanda energética e expressa como o $VO_{2submáximo}$ para uma determinada velocidade de corrida (Cavanagh & Kram, 1985; Conley & Krahenbuhl, 1980). Tendo sido vastamente investigada nos últimos anos em corredores de média e longa distâncias (Barnes & Kilding, 2015; Conley & Krahenbuhl, 1980; Knopp et al., 2023; Liu et al., 2022), a economia de corrida é influenciada por uma variada e complexa interação de fatores antropométricos, bioquímicos, biomecânicos e neuromusculares (Lundby et al., 2017; Saunders et al., 2004; Tawa & Louw, 2018).

A biomecânica é o único fator que pode ser modificado tanto de forma aguda como crônica (Van Hooren et al., 2024). Considera-se que a unidade básica da corrida é o ciclo completo do movimento ou passada, desde o instante em que um pé toca o solo até o momento em que o mesmo pé volta a fazer contato. O passo refere-se a meio ciclo da corrida, ou seja, começando com o contato de um pé e terminando com o contato do outro (Cavanagh & Kram, 1989). Nesse contexto, os fatores biomecânicos cinemáticos relacionados às mudanças e fases do ciclo gestual, tais como os tempos de contato com o solo, de voo, de balanço e frequência e comprimento do ciclo (Moore, 2016) estão relacionados

com a economia de corrida (Moore, 2016; Van Hooren et al., 2024). O duty factor (relação entre os tempos de contato e de passada) é outra variável que também tem sido associada a uma corrida mais econômica (Nijs et al., 2022).

Todavia, embora diversos estudos tenham investigado a relação entre a biomecânica e a economia de corrida nos últimos anos, os resultados muitas vezes são inconclusivos ou até contraditórios (Van Hooren et al., 2024). Como exemplo, alguns pesquisadores apontam que o tempo de contato com o solo é uma fase de alto custo metabólico, sugerindo que valores inferiores resultariam em menor custo (Folland et al., 2017). Contudo, outros estudos mostraram que, tanto tempos curtos quanto longos de contato com o solo, podem ser economicamente vantajosos, dependendo das características do corredor (Cardoso et al., 2022a; Lussiana et al., 2019).

Ainda assim, uma revisão sistemática e meta-análise publicada recentemente sugere que variáveis biomecânicas podem explicar de 4-12% da variância na economia de corrida entre indivíduos quando consideradas isoladamente, e essa magnitude aumenta quando diferentes variáveis são combinadas (Van Hooren et al., 2024). A partir desse enquadramento, ter uma compreensão da ideia subjacente a economia de corrida, nomeadamente as variáveis cinemáticas do ciclo gestual da corrida, pode fornecer uma visão mais profunda sobre a complexidade desta medida. E ainda, descrever o consumo de oxigênio relacionado à uma determinada velocidade de corrida pode ser uma forma útil de comparar indivíduos entre si ou qualquer indivíduo consigo próprio em várias condições de exercício (Barnes & Kilding, 2015).

Por conseguinte, considerando as inconsistências e lacunas encontradas na literatura relacionadas a fatores cinemáticos do ciclo do movimento e a economia de corrida, a presente dissertação teve como objetivo compreender como alterações individuais na cinemática do ciclo gestual podem afetar a economia de corrida. Nesse contexto, foram definidas como hipóteses do estudo que: (i) menor tempo de contato, duty factor e comprimento do passo implicam uma maior economia de corrida; e (ii) maiores tempos de voo, balanço, passada e respectiva frequência, implicam uma maior economia de corrida.

2. Material e métodos

Participaram do presente estudo 25 corredores, sendo 11 do sexo masculino e 14 do sexo feminino. Foram incluídos na pesquisa os participantes que atenderam aos seguintes critérios de elegibilidade: (i) corredores de longa distância a partir de 5.000 m (World Athletics, 2022); (ii) do sexo feminino ou masculino com idades entre 18 e 50 anos; (iii) com mais de dois anos de experiência em treinamento de corrida e frequência de treino de no mínimo três vezes por semana (conforme Tabela 1). Não foram elegíveis para amostra corredores com histórico de doenças ou lesões cardíacas, respiratórias, metabólicas e físicas nos três meses anteriores às coletas ou que apresentaram dor ou lesão no início das coletas.

Tabela 1. Valores médios \pm desvio padrão da idade e características antropométricas e valores de mediana e desvio interquartil da rotina de treinos dos participantes.

	Média	DP
Idade (anos)	32.5	\pm 8.5
Altura (cm)	166.0	\pm 9.2
Massa corporal (kg)	64.4	\pm 12.9
IMC (kg/m ²)	23.3	\pm 3.3
	Mediana	DI
Tempo de prática (anos)	8.0	9.0
Frequência (treinos / semana)	4.0	2.0
Duração (min)	50.0	20.0
Distancia (km / semanal)	20.0	25.0

Legenda: DP – desvio padrão; DI – Desvio interquartil.

Uma solicitação ao Comitê de Ética local foi realizada para execução do estudo e aprovada sob o número 18/2023 CE-IST 1428344, bem como os participantes tiveram que ler e assinar um termo de consentimento informado, seguindo a Declaração de Helsinque. Nos instantes que antecederam a realização do protocolo incremental de corrida, foram realizados os seguintes procedimentos: (i) coleta de dados antropométricos; (ii) marcação e inserção dos marcadores para aquisição cinemática; (iii) familiarização de 5 min na passadeira com caminhada ou corrida ligeira (Lavcanska et al., 2005) a uma velocidade auto pré-selecionada pelos corredores; (iv) período de descanso de 5 min para ajuste e

calibração do analisador de gás portátil telemétrico (preso confortavelmente às costas dos corredores); (v) repouso de 2 min para obtenção de dados fisiológicos de pré-teste.



Figura 1: Momento de repouso para obtenção dos dados fisiológicos de pré-teste.

O protocolo incremental de corrida em passadeira (ver Figura 1) consistiu em três etapas de 3 min com velocidade progressiva: (i) etapa um teve como referência 7,2 km/h (2,1 m/s), velocidade de transição da marcha para corrida (Hreljac, 1993); (ii) etapa dois foi definida pela velocidade intermediária entre a menor e a maior velocidade do teste; (iii) a etapa três foi baseada no ritmo do limiar anaeróbio estimado para 5 km. Houve 30 s de recuperação entre as etapas, durante os quais foram coletadas amostras de sangue capilar para análise de lactato e nos 3^o, 5^o e 7^o min de recuperação pós-teste. As variáveis de trocas

gasosas foram medidas continuamente durante todo o protocolo e 3 min após a última etapa de corrida (Cardoso et al., 2022b).

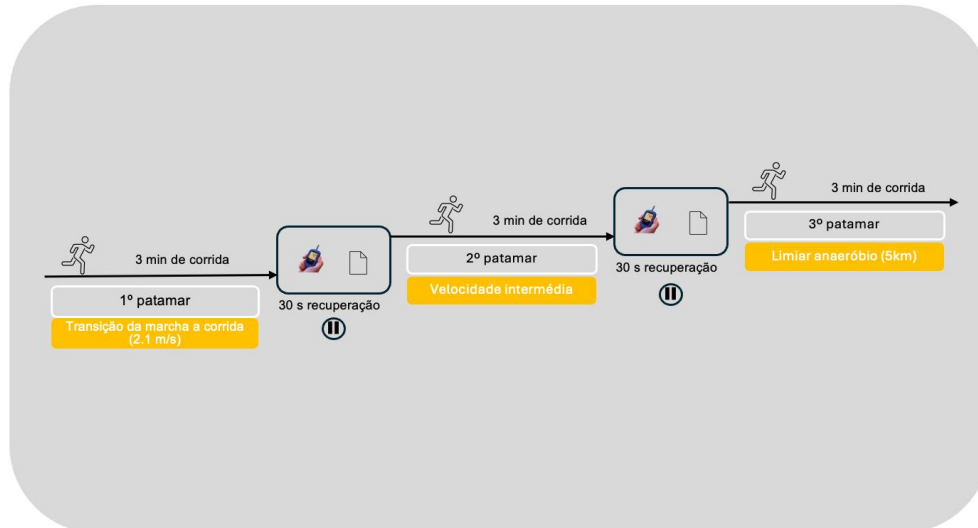


Figura 2. Esquema representativo do protocolo incremental de corrida.

Dados da composição corporal foram obtidos por meio de uma balança de bioimpedância (InBody230), obtendo-se informações relativas à massa corporal, enquanto a altura foi medida utilizando um estadiômetro (SECA 206). Um analisador de gases portátil telemétrico (K5; Cosmed, Roma, Itália), previamente calibrado, foi utilizado para obter os dados de troca gasosa a cada respiração de acordo com os procedimentos. Além disso, foi utilizada uma cinta Garmin Sensor de Frequência Cardíaca HRM dual para obter os valores relacionados a frequência cardíaca.

O dispêndio energético para cada etapa de exercício durante o protocolo incremental (E_{inc}) foi determinado por meio da adição dos equivalentes líquidos de $\dot{V}O_2$ e dos valores líquidos de $[La^-]$, usando a constante de proporcionalidade de $3 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{mM}^{-1}$ para corrida (Capelli et al., 1998; Sousa et al., 2015). O dispêndio energético estimado durante os exercícios foi considerado a soma das energias aeróbia (Bonnaerens et al.) e anaeróbia láctica (Ana_{lac}) (Sousa et al., 2014; Zamparo et al., 2011). A energia aeróbia foi calculada a partir da integral de tempo do $\dot{V}O_2$ líquido e expressa em quilojoule (kJ), assumindo um equivalente de energia de $20.9 \text{ kJ}\cdot\text{L}^{-1}$ (Zacca et al., 2020; Zamparo et al., 2011).

A Ana_{lac} foi avaliada por meio da energia derivada da produção de ácido láctico (equação 1):

$$Ana_{lac} = b [La^-]_{bnet} M$$

em que $[La^-]_{bnet}$ é o acúmulo líquido de lactato após o exercício, b é o equivalente de energia para o acúmulo de $[La^-]$ no sangue (conforme descrito anteriormente) e M (kg) é a massa do indivíduo. Essa contribuição de energia ($mL O_2$) foi então expressa em quilojoule, assumindo um equivalente de energia de $20,9 \text{ kJ}\cdot\text{L}^{-1}$ (Zacca et al., 2020; Zamparo et al., 2011).

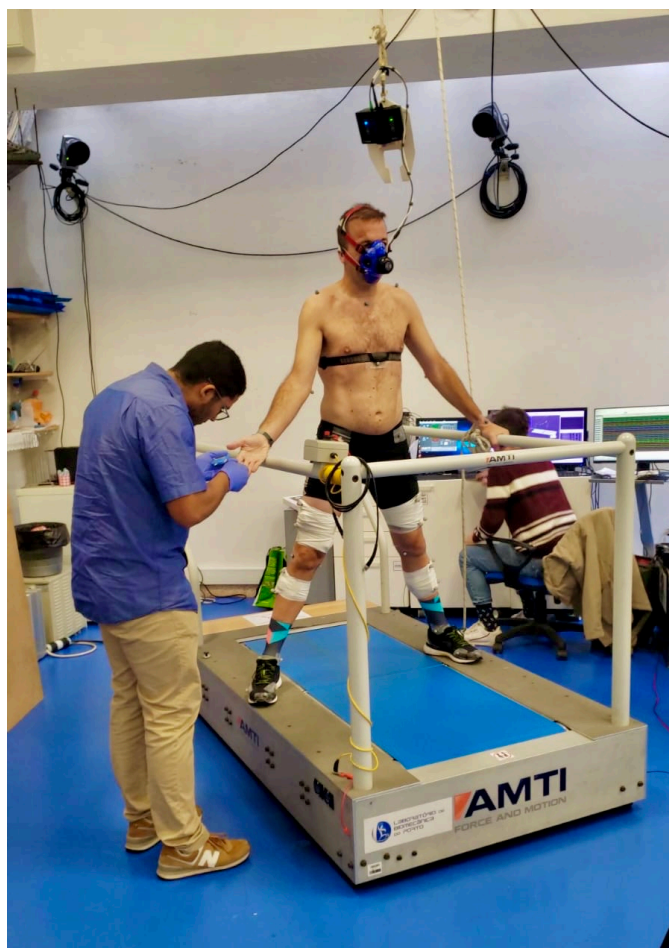


Figura 3: Coleta de amostra de sangue capilar durante o protocolo incremental de corrida para análise de lactato.

As variáveis cinemáticas foram obtidas através do software Qualisys Track Manager (QTM) integrado com uma plataforma de força e movimento AMTI (Tandem Treadmill) e definidas (Figura 2) da seguinte forma: (i) tempo de

contato (duração desde o instante de receção do pé até o instante de saída); (ii) tempo de voo (duração desde o instante de saída até o seguinte instante de receção); (iii) tempo da passada (duração entre o instante de receção até a próxima receção do mesmo pé); (iv) frequência da passada (número de ciclos completos durante um minuto); (v) tempo de balanço (duração entre o instante de saída e receção do mesmo pé); (vi) comprimento do passo (distância entre o instante de receção de um até instante de receção do pé oposto); (Dugan & Bhat, 2005; Kapri et al., 2021); (vii) duty factor (relação entre os tempos de contato e do ciclo da corrida) (Minetti, 1998). Foram utilizados como referência os últimos 30 s de cada patamar para análise das variáveis cinemáticas.

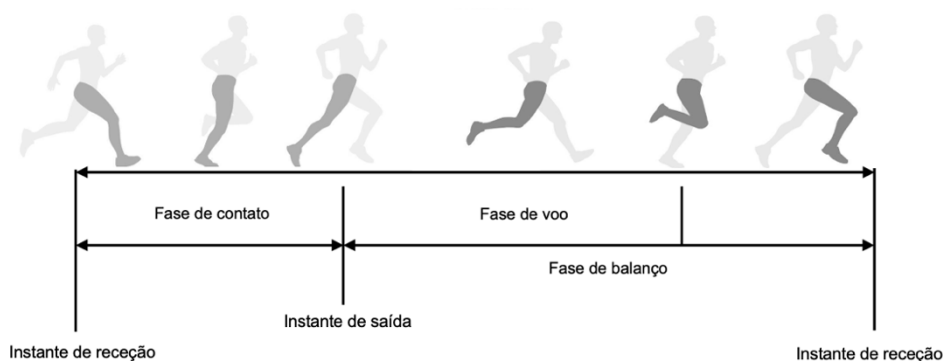


Figura 4: Descrição das fases do ciclo da corrida utilizadas como referência para as variáveis biomecânicas do estudo.

Uma análise de potência amostral foi realizada usando o G*Power 3.1.9.7 para determinar a potência alcançada com um grupo de 25 participantes. Para a ANOVA de medidas repetidas com três medições e uma correlação entre medidas de 0.5 ($f = 0.25$, $\alpha = 0.05$), a potência foi de 0.76. Para a regressão linear simples com um preditor ($f^2 = 0.15$, $\alpha = 0.05$), a potência foi de 0.45. A normalidade dos dados foi avaliada utilizando o teste de Shapiro-Wilk, no qual para os dados que apresentaram distribuição normal foi aplicado o teste T de Student para comparar as médias entre o sexo masculino e feminino. No caso de dados que não apresentaram distribuição normal, foi utilizado o teste de Mann-Whitney. Os dados descritivos estão apresentados em média e desvio

padrão para variáveis com distribuição normal e em mediana e desvio interquartil para variáveis com desvio de normalidade.

Foi realizado um teste ANOVA de uma via de medidas repetidas para comparar as médias entre os diferentes patamares de corrida, com uma análise post-hoc com correção de Bonferroni. Adicionalmente foi aplicado uma regressão linear simples para analisar a relação entre as variáveis independentes e dependente. As análises estatísticas foram realizadas utilizando dois softwares principais: IBM SPSS versão 29.0.0.0 (241) (IBM Corp., Armonk, NY) e R versão 4.3.1 (2023-06-16 ucrt) (R Core Team, 2023). Adotou-se um nível de significância de 5% ($p < 0.05$) para todas as análises estatísticas.

3. Resultados

Na Tabela 2, observamos que as variáveis cinemáticas apresentaram comportamentos semelhantes, tendo aumentado ou diminuído com o incremento da velocidade de corrida. As variáveis de tempos de contato e passada, assim como o duty factor, apresentaram uma diminuição entre os patamares ($p < 0.01$). O tempo de voo, frequência e o comprimento do passo aumentaram a cada aumento da velocidade ($p < 0.01$), enquanto o tempo de balanço não apresentou variação entre os patamares ($p > 0.1158$). Na comparação entre patamares, foram observadas diferenças ($p < 0.01$) em todas as variáveis cinemáticas, exceto entre os patamares 2 e 3 da variável tempo de voo ($p > 0.398$). Esse resultado pode sugerir que nesta fase existe uma possível estabilização, que, no entanto, é compensada pelo ajuste de outras variáveis para otimizar o ciclo da corrida.

As variáveis de contribuição aeróbia e anaeróbia láctica aumentaram com o incremento da velocidade ($p < 0.01$), tendo o mesmo acontecido com o dispêndio energético. Na comparação entre os três patamares foram observadas diferenças ($p < 0.01$) nas contribuições aeróbicas e anaeróbicas lácticas, e sendo o dispêndio energético proveniente da soma desses dois sistemas energéticos, conseqüentemente diferenças também foram verificadas ($p < 0.01$). Observou-se uma predominância da contribuição aeróbia em todos os patamares, o que era esperado, considerando as características do protocolo utilizado no estudo. De forma geral, as diferenças observadas nessas variáveis fisiológicas demonstram que maiores velocidades de corrida demandam um maior consumo de oxigênio, bem como processos anaeróbios são ativados para suprir a demanda energética total.

Tabela 2. Descrição das variáveis cinemáticas de contribuição (aeróbia e anaeróbia láctica) e dispêndio energético e comparação entre os três patamares de corrida.

	Patamar 1				Patamar 2				Patamar 3				ANOVA		Post-hoc		
	Média	DP	EP	IC 95%	Média	DP	EP	IC 95%	Média	DP	EP	IC 95%	F	p-valor	1 - 2 (p-valor)	1 - 3 (p-valor)	2 - 3 (p-valor)
Tempo de contato (s)	0.29	0.04	0.008	0.278 - 0.312	0.24	0.03	0.007	0.226 - 0.255	0.22	0.03	0.005	0.210 - 0.234	113.88	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Tempo de voo (s)	0.085	0.03	0.007	0.069 - 0.100	0.11	0.02	0.005	0.107 - 0.129	0.12	0.02	0.004	0.112 - 0.131	27.551	<.0001	<.0001	0.0001	0.398
Tempo de balanço (s)	0.46	0.04	0.009	0.441 - 0.480	0.47	0.03	0.007	0.459 - 0.489	0.46	0.03	0.006	0.450 - 0.476	2.2614	0.1152	-	-	-
Tempo de passada (s)	0.75	0.03	0.007	0.737 - 0.768	0.71	0.04	0.008	0.699 - 0.735	0.68	0.03	0.007	0.667 - 0.698	79.279	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Duty factor (s)	0.39	0.05	0.010	0.371 - 0.414	0.33	0.03	0.007	0.319 - 0.352	0.32	0.03	0.007	0.310 - 0.340	55.591	<.0001	<.0001	<.0001	0.0202
Frequência de passada (min)	79.6	4.2	0.847	77.8 - 81.3	83.8	5.0	1.004	81.7 - 85.9	87.2	4.7	0.934	85.2 - 89.1	61.672	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Comprimento do passo (m)	0.79	0.04	0.008	0.777 - 0.811	1.07	0.13	0.026	1.016 - 1.124	1.24	0.17	0.035	1.171 - 1.316	165.3	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Energia aeróbia (kJ)	118.0	22.2	4.450	108.0 - 127.0	157.0	35.3	7.060	142.0 - 171.0	182.0	43.4	8.680	164.0 - 200.0	106.19	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Energia anaeróbia láctica (kJ)	4.11	2.31	0.462	3.16 - 5.06	8.16	3.25	0.651	6.82 - 9.51	14.00	4.71	0.942	12.01 - 15.90	105.57	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Dispêndio energético (kJ)	122.0	22.1	4.410	113.0 - 131.0	165.0	35.3	7.060	150.0 - 80.0	197.0	43.4	8.690	179.0 - 215.0	141.49	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001

Legenda: DP – desvio padrão; EP – erro padrão; IC – intervalo de confiança.

De maneira geral, os resultados obtidos indicam que as velocidades definidas no protocolo permitiram alterações no ciclo da corrida, bem como proporcionaram uma maior exigência fisiológica relacionadas as demandas energéticas. A Figura 3 ilustra as alterações nos tempos de contato, do ciclo gestual e respectiva frequência, assim como as diferenças observadas na comparação entre todos os patamares. A diminuição no tempo de contato e do ciclo gestual com o incremento da velocidade parece ser um ajuste que tem como consequência o aumento na cadência. De forma geral, e considerando outras relações possíveis, os resultados sugerem que esses ajustes podem ser uma forma de otimizar o desempenho, buscando uma melhor economia de corrida.

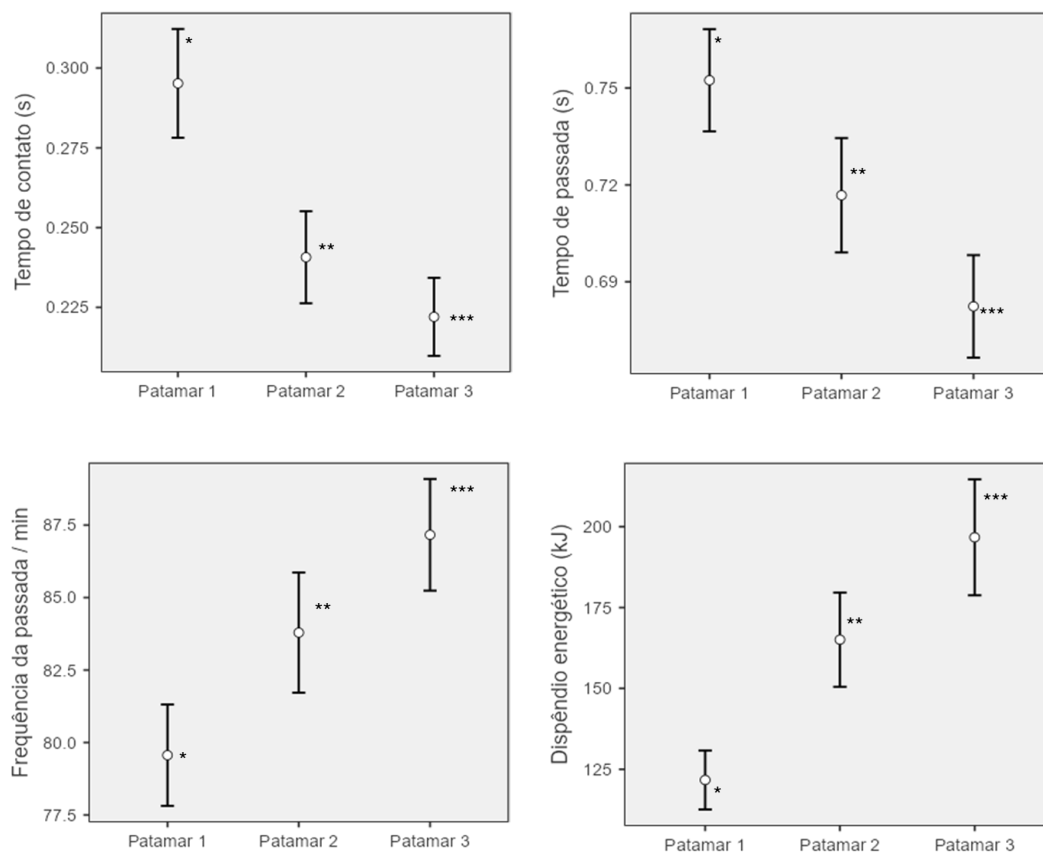


Figura 5: Valores médios \pm desvio padrão e diferenças em variáveis biomecânicas e no dispêndio energético entre os três patamares de corrida.

Adicionalmente foi aplicada uma regressão linear simples para analisar a relação e a contribuição das variáveis biomecânicas no dispêndio energético. Na Tabela

3 são apresentados os coeficientes simples de regressão linear para o dispêndio energético como variável dependente nos três patamares de corrida, enquanto as variáveis independentes incluem todas as variáveis cinemáticas do estudo. Os tempos de contato e de voo não apresentaram associações com o dispêndio energético em nenhum dos três patamares de corrida, o que pode indicar que apesar da diminuição na fase de contato e aumento na fase aérea, ambas variáveis não influenciaram em menor custo energético. O duty factor também não apresentou relação com o dispêndio energético em nenhum dos patamares, não tendo assim influência sobre a economia de corrida dos corredores.

Tabela 3. Coeficientes simples de regressão linear para dispêndio energético (kJ) como variável dependente nos patamares 1, 2 e 3.

	Patamar 1			Patamar 2			Patamar 3		
	β	p-valor	R ²	β	p-valor	R ²	β	p-valor	R ²
Tempo de contato (s)	129.47	0.243	0.06	56.82	0.790	0.00	79.52	0.797	0.003
Tempo de voo (s)	18.13	0.885	0.00	313.20	0.271	0.05	577.52	0.127	0.099
Tempo de balanço (s)	97.28	0.318	0.04	398.89	0.041*	0.17	678.1	0.014*	0.234
Tempo de passada (s)	274.97	0.016*	0.23	342.94	0.038*	0.17	421.9	0.066	0.139
Duty factor (s)	38.4	0.668	0.01	-118.06	0.530	0.02	-139.2	0.590	0.013
Frequência da passada (min)	-2.82	0.005*	0.29	-3.12	0.026*	0.20	-3.123	0.101	0.113
Comprimento do passo (m)	284.91	0.006*	0.29	149.87	0.004*	0.31	128.74	0.008*	0.272

Nota: *Houve diferenças significativas entre as variáveis.

Em contrapartida, o tempo de balanço apresentou uma relação positiva com dispêndio energético no segundo e terceiro patamar, explicando 17 e 23.4% da variabilidade da economia de corrida (ver Figura 4). Embora não tenham sido observadas alterações nessa variável em nenhum dos patamares, esse resultado mostrou que o tempo de balanço se tornou mais significativo para o dispêndio energético em patamares mais avançados. Dessa forma, entendemos que o tempo de balanço tem uma influência sobre a economia de corrida em velocidades de corrida mais altas, independente de possíveis variações, o que pode ser explicado por outros mecanismos.

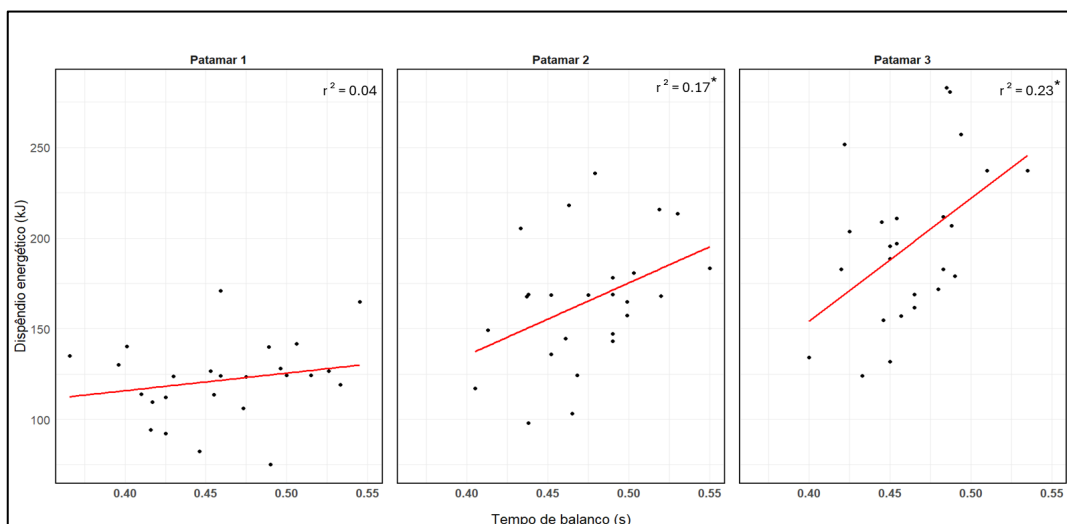


Figura 6: Relação entre a variável tempo de balanço e o dispêndio energético.

O tempo de passada apresentou relação com o dispêndio energético no primeiro patamar ($\beta = 274.97$ e $p < 0.016$) explicando cerca de 23% da variabilidade do dispêndio energético ($R^2 = 0.23$) (ver Tabela 5). Dessa forma, observamos que cada segundo adicional no ciclo da corrida aumentaria 274.97 unidades do dispêndio energético. O mesmo aconteceu de forma similar no segundo patamar ($\beta = 342.94$ e $p < 0.038$), no qual o tempo da passada explicou 17% ($R^2 = 0.17$) da variabilidade da energia utilizada. De forma geral, os resultados sugerem que o tempo de passada pode ter uma maior influência sobre economia de corrida em velocidades mais baixas.

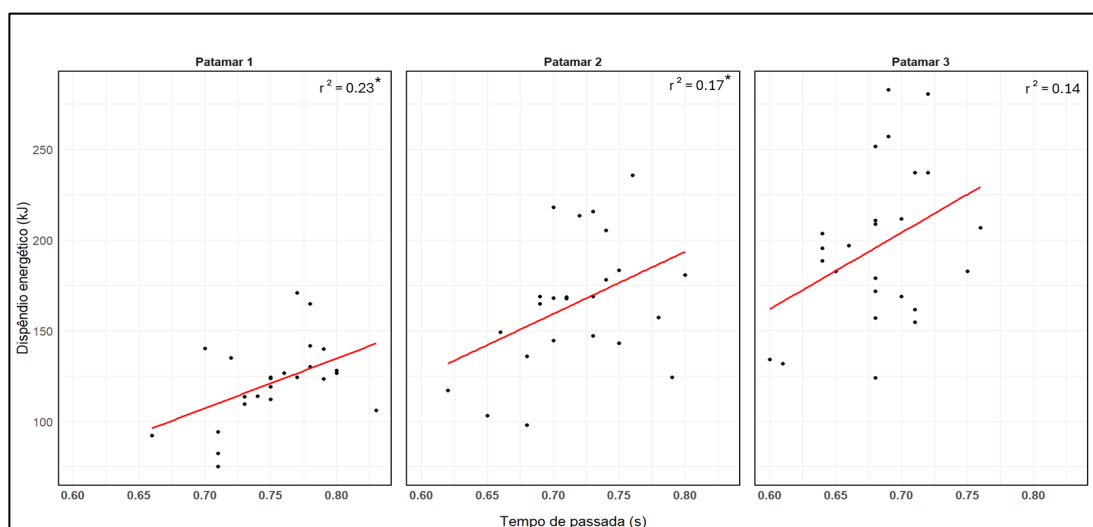


Figura 7: Relação entre variável tempo de passada e dispêndio energético.

A frequência da passada apresentou uma relação negativa com o dispêndio energético no primeiro e no segundo patamar (ver Figura 6), sendo que, no primeiro patamar, a cadência explicou cerca de 29% ($R^2 = 0.29$) da variabilidade do dispêndio energético ($\beta = - 2.82$ e $p < 0.005$). No segundo patamar ($\beta = - 3.12$ e $p < 0.026$) a frequência do ciclo foi responsável por 20% ($R^2 = 0.20$) do dispêndio energético. A partir dos resultados, observamos que cada ciclo gestual adicional por minuto reduziria cerca de 2.82 unidades do dispêndio energético no primeiro patamar e 3.12 unidades no segundo patamar.

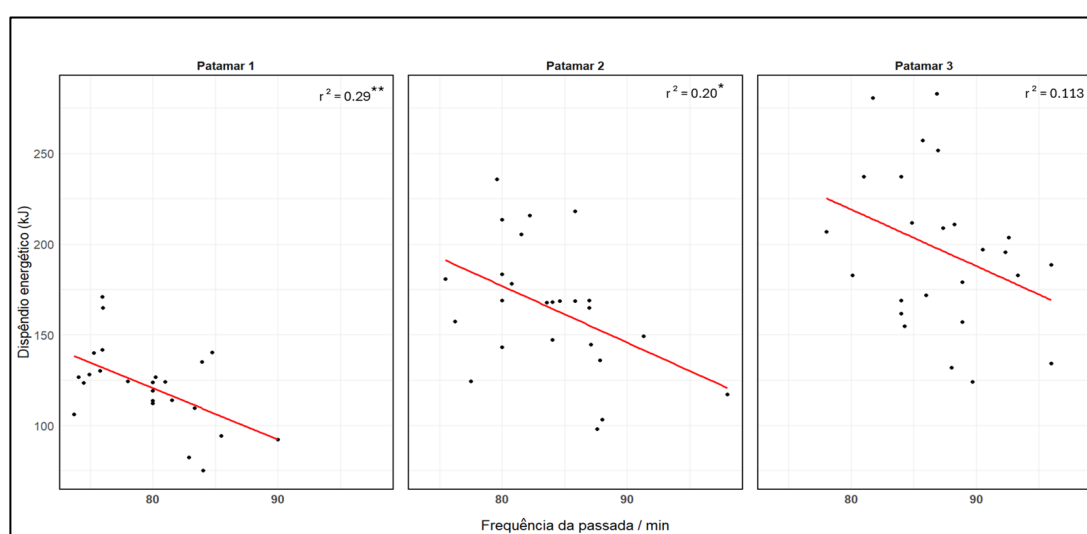


Figura 8: Relação entre a variável frequência da passada e dispêndio energético.

O comprimento do passo foi a única variável do estudo que foi relacionada ao dispêndio energético nos três patamares de corrida (ver Figura 7), sendo responsável por explicar 29% ($R^2 = 0.29$) da variabilidade do dispêndio energético no primeiro patamar ($p < 0.006$). No segundo patamar, a relação ($p < 0.004$) explicou cerca de 31% ($R^2 = 0.31$) da energia utilizada, enquanto no terceiro ($p < 0.008$) observamos uma influência de cerca 27.2% ($R^2 = 0.272$) da variabilidade do dispêndio energético provenientes dessa variável. Esses resultados sugerem que cada metro adicional no comprimento do passo aumentaria consideravelmente o dispêndio energético ($\beta = 284.91, 149.87$ e 128.74).

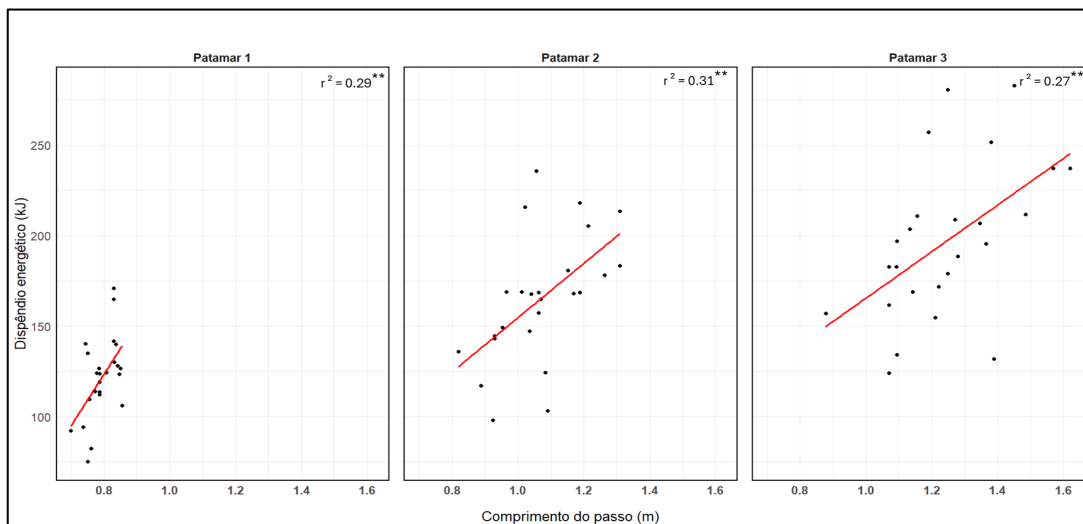


Figura 9: Relação entre a variável comprimento do passo e o dispêndio energético.

4. Discussão

Os resultados deste estudo não confirmaram as hipóteses relacionadas aos tempos de contato, voo, balanço, passada e ao duty factor. Apesar de os corredores terem diminuído o tempo em contato com o solo e aumentado a fase aérea, isso não influenciou a economia de corrida. O tempo de balanço, embora tenha impacto na economia de corrida em velocidades mais elevadas, é independente de possíveis variações. Por outro lado, um tempo de passada maior aumenta o gasto energético, especialmente em corridas mais lentas. Em contrapartida, os resultados confirmam nossas hipóteses em relação ao comprimento do passo e à frequência da passada, uma vez que passos mais curtos e cadências mais altas de corrida melhoram a economia de corrida.

A associação entre o tempo de contato e economia de corrida é, possivelmente, a que tem apresentado maior inconsistência (Van Hooren et al., 2024). Enquanto determinados estudos não apresentaram qualquer relação (Pizzuto et al., 2019; Tartaruga et al., 2012) corroborando os nossos resultados, alguns observaram uma melhor economia aquando de tempos de contatos menores (Folland et al., 2017; Santos-Concejero et al., 2013) e outros em tempos de contatos mais longos (Di Michele & Merni, 2014). Apesar da premissa de que tempos de voos mais longos seriam vantajosos economicamente, diversos estudos, assim como o nosso, não encontraram associações (Barnes et al., 2014; Pizzuto et al., 2019; Van Hooren et al., 2024) ou apontaram fracas ou moderadas relações tanto positivas como negativas entre a fase aérea e o custo energético (Nummela et al., 2007; Williams & Cavanagh, 1987).

Nosso estudo não encontrou associações entre o duty factor e a economia de corrida, corroborando com outros estudos (Lussiana et al., 2019; Patoz et al., 2020). Mecanismos sugerem que diferentes estratégias mecânicas podem ser utilizadas de forma eficiente para minimizar o custo energético em velocidades mais baixas de corrida (Lussiana et al., 2019). Os corredores que favorecem longo tempo de voo (duty factor baixo) apresentam maior produção de força e ativação muscular, produzidas por um membro inferior rígido (Moore et al., 2019). Isso implicaria no recrutamento de fibras musculares metabolicamente mais

exigentes para suprir um maior deslocamento vertical (Scholz et al., 2008) e maiores forças de travagem, indicando que esses corredores dependem do armazenamento e liberação de energia elástica para minimizar o custo energético (Lussiana et al., 2019).

Em oposição, em corredores que apresentam longo tempo de contato (duty factor alto) e perna mais complacente (menos rígida) (Moore et al., 2019), os músculos atuam em velocidades mais lentas de encurtamento, sendo necessário um menor número de unidades motoras recrutadas para produzir uma força inferior (Fletcher & MacIntosh, 2017). Essa estratégia pode indicar uma menor rigidez intrínseca dos músculos e tendões ou uma preferência por focar no trabalho de desaceleração contra a gravidade e na diminuição de forças de travagem (Moore et al., 2019). Dessa forma, os corredores mais terrestres conseguem limitar o deslocamento vertical, promovendo progressão horizontal e reduzindo assim o custo de energia (Patoz et al., 2020; Saunders et al., 2004).

Resumidamente, o duty factor não deve ser muito alto porque permite pouco tempo para o balanço da perna frente, tornando os requisitos de força e trabalho do balanço altos, e não deve ser muito baixo, porque implicam grandes forças de solo (Minetti & Alexander, 1997). A consequência líquida por trás desses mecanismos que parecem ser compensatórios, é, portanto, que corredores com diferentes características de tempo de contato e voo podem ser igualmente econômicos (Lussiana et al., 2019). Considerando esses mecanismos, é possível que haja uma prioridade na redução do custo energético, em vez de focar nas forças potencialmente prejudiciais do impacto, e isso pode ocorrer porque os sistemas musculoesquelético e neural podem não detectar as forças do impacto com tanta sensibilidade quanto o sistema cardiovascular percebe o dispêndio energético (Moore et al., 2019).

Modica e Kram (2005) estimaram que a 11km/h cerca de 20% do custo energético líquido deriva do balanço das pernas, que apoia nossos resultados. Devido aos movimentos sinérgicos para realizar suporte vertical de peso corporal, propulsão para frente e balanço de pernas, essa estimativa foi ajustada para aproximadamente 7% (Arellano & Kram, 2014). Esse ajuste destaca a

contribuição efetiva da cinemática e cinética da perna de balanço para as forças propulsivas verticais e horizontais, sendo que a energia cinética da perna de balanço pode ser temporariamente armazenada em estruturas elásticas, de modo que não seja perdida, mas possa ser reutilizada em movimentos subsequentes (Van Oeveren et al., 2021). Corredores de alto nível apresentam joelhos mais flexionados durante o balanço, porém sem diferenças nos ângulos do joelho no instante inicial de contato (Preece et al., 2019).

Isso sugere que esses corredores têm maior velocidade de extensão do joelho durante o balanço tardio, que é o instante em que os isquiotibiais absorvem o máximo da energia cinética antes do instante inicial de contato (Chumanov et al., 2012). O aumento da tensão nos isquiotibiais pode ser considerado como um mecanismo para reutilizar a energia cinética da perna oscilante e contribuir para a subsequente retração da perna (Morin et al., 2015). É importante notar que esses mecanismos foram observados em velocistas, podendo não se aplicar a corredores de longas distâncias, o que exige mais estudos para confirmação. Outro mecanismo relacionado ao balanço da perna está relacionado a ativação muscular, onde uma ativação precoce do reto femoral e a coativação mais curta do isquiotibial e gastrocnêmio foram associados a corredores mais econômicos (Heise et al., 1996).

Nossos achados para associação entre o tempo de passada e a economia de corrida contrastam com outros estudos (Pizzuto et al., 2019; Tam et al., 2018; Van Hooren et al., 2024), que não encontraram relações entre essas variáveis. Possíveis mecanismos não foram relatados até onde investigamos, mas supomos que esses possam estar diretamente ligados aos verificados nas demais variáveis que compõem o ciclo completo do movimento e foram analisadas nesse estudo. Pesquisas futuras que possam investigar o tempo de passada considerando outras variáveis cinemáticas e cinéticas poderão esclarecer a relação com a economia de corrida.

A frequência da passada tem sido amplamente investigada e associada a economia em corredores de longa distância (Folland et al., 2017; Moore, 2016; Tawa & Louw, 2018; Van Hooren et al., 2024), assim como o comprimento do

passo foi relacionado com a economia de corrida em diversos estudos (Barnes et al., 2014; Cavanagh & Kram, 1989; Hunter & Smith, 2007; Tartaruga et al., 2012; Williams & Cavanagh, 1987). Embora somente a cadência de corrida tenha apresentado moderada associação com a economia em uma recente revisão (Van Hooren et al., 2024), a relação entre essas duas variáveis determina a velocidade de corrida e parece explicar uma parcela considerável do custo de energia para correr.

Resultados similares ao do nosso estudo mostraram uma relação entre frequência e comprimento do passo com a economia de corrida (Barnes et al., 2014; Gómez-Molina et al., 2017). Em velocidades constantes de corrida, uma maior cadência resultaria na diminuição do comprimento do passo, assim como o inverso seria verdadeiro demonstrando uma dependência entre as variáveis (Moore, 2016). Esse ajuste subconsciente na mecânica da corrida foi denominado de auto otimização (Williams & Cavanagh, 1987), sugerindo que os corredores parecem escolher espontaneamente uma cadência ou comprimento economicamente, ou muito próximo, de ser ideal (Hunter & Smith, 2007; Moore, 2016). O entendimento dessa relação possibilita compreender os mecanismos em volta dos resultados encontrados nesse e em outros estudos quanto à essas variáveis.

Quando os corredores adotam uma cadência mais baixa, eles tendem a dar passos mais longos, o que resulta em uma maior travagem (Lieberman et al., 2015). Essa maior travagem (desde o instante de recepção até o instante de máxima flexão do joelho) aumenta a necessidade de uma produção maior de força propulsiva horizontal (desde o instante de máxima flexão do joelho até o instante de saída) para reacelerar o centro de massa e manter a velocidade de corrida (Van Hooren et al., 2024). E essa produção de força propulsiva envolve contrações concêntricas energeticamente exigentes, sendo um componente importante do custo metabólico da corrida (Chang & Kram, 1999; Folland et al., 2017). Portanto, a associação entre frequência da passada mais alta e melhor economia de corrida pode ser explicada parcialmente por esses mecanismos (Van Hooren et al., 2024).

Ao contrário dos nossos achados, Bragada e Barbosa (2007) não identificaram associações entre frequência e comprimento do passo e o custo metabólico, no entanto, sugeriram que as relações normalmente observadas podem ser explicadas por mecanismos ligados a processos de controle motor e a partir do modelo do pêndulo. Resumidamente, o primeiro mecanismo explica que mudanças na frequência do ciclo (moduladas pelo sistema nervoso central) estão associadas à alterações na rigidez dos segmentos e na atividade muscular em fase não propulsiva. Essas mudanças tendem a modular a coativação de músculos antagonistas, que é metabolicamente dispendiosa, aumentando assim o custo energético (Bragada & Barbosa, 2007).

Considerando que corredores mais experientes adotam uma corrida mais econômica pelo processo de auto otimização (Hunter et al., 2017), a relação entre cadência e comprimento do passo altas ou baixas pode não necessariamente indicar ineficiência. Tanto cadências altas quanto baixas podem aumentar o consumo de energia, sugerindo que os limites de desempenho não dependem apenas da produção aeróbica e anaeróbica. Mas a eficiência nessa relação pode depender da capacidade do corredor em armazenar e reutilizar energia cinética e potencial para impulsionar o centro de massa corporal (Van Oeveren et al., 2021). Portanto, as preferências individuais podem depender da reutilização do trabalho feito para mover os membros e da eficiência com a qual o corredor pode gerar força propulsiva durante o contato (Van Oeveren et al., 2021).

De forma geral, o que o nosso e os demais estudos na área parecem indicar é que, por meio do treinamento, os corredores são capazes de desenvolver uma combinação individual em suas características mecânicas para obter uma corrida que seja mais econômica. Nossos resultados parecem estar em consonância com a literatura para a maioria das variáveis associadas à economia de corrida, no entanto, nossos achados confirmam algumas inconsistências que carecem de maior aprofundamento. Na prática, o estudo pode ser um ponto de partida para novas questões de investigação, assim como oferece informações úteis no auxílio a treinadores na identificação de

individualidades em seus atletas, para que possam adotar estratégias mais precisas de treinamento.

Por fim, o presente estudo apresenta algumas limitações, que incluem a não normalização de variáveis cinemáticas, considerando diferenças individuais nos corredores, a análise de variáveis isoladas, assim como heterogeneidade da amostra e o baixo poder de inferência estatística. Considerando as interrelações mecânicas que podem determinar uma melhor compreensão da economia de corrida, pesquisas futuras devem explorar em conjunto a influência de variáveis angulares, de forças determinantes do movimento, assim como propriedades músculo-tendinosas relacionadas à economia de corrida. Pesquisas experimentais que possam testar o impacto do treinamento de longo prazo nessas variáveis podem ser relevantes para um melhor entendimento, assim como estudos com amostras mais homogêneas podem proporcionar resultados mais precisos na compreensão dessas relações.

5. Conclusões

Alterações biomecânicas triviais foram observadas nas variáveis cinemáticas com o aumento da velocidade de corrida (exceto para o tempo de balanço), assim como nas variáveis de contribuição aeróbia e anaeróbia láctica e conseqüentemente no dispêndio energético. O tempo de passada e sua respectiva frequência, o comprimento do passo e o tempo de balanço apresentaram associações moderadas com a economia de corrida. Conclui-se, portanto, que as alterações e as relações entre variáveis cinemáticas do ciclo gestual e economia de corrida parecem estar relacionadas à capacidade de corredores em promover ajustes individuais de trabalho mecânico interno e externo para otimizar consumo de energia. Os resultados encontrados e a discussão dos mecanismos sugeridos podem ser relevantes na contribuição de pesquisas sobre a temática, assim como para prática de treinadores de corrida de longas distâncias.

6. Referências bibliográficas

- Arellano, C. J., & Kram, R. (2014). Partitioning the Metabolic Cost of Human Running: A Task-by-Task Approach. *Integrative and Comparative Biology*, 54(6), 1084-1098. doi:10.1093/icb/icu033
- Barnes, K. R., & Kilding, A. E. (2015). Running economy: measurement, norms, and determining factors. *Sports Med Open*, 1(1), 8. doi:10.1186/s40798-015-0007-y
- Barnes, K. R., Mcguigan, M. R., & Kilding, A. E. (2014). Lower-Body Determinants of Running Economy in Male and Female Distance Runners. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 28(5), 1289-1297. doi:10.1519/jsc.0000000000000267
- Bonnaerens, S., Fiers, P., Galle, S., Aerts, P., Frederick, E. C., Kaneko, Y., Derave, W., & De Clercq, D. (2019). Grounded Running Reduces Musculoskeletal Loading. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 51(4), 708-715. doi:10.1249/mss.0000000000001846
- Bragada, J., & Barbosa, T. (2007). Estudo da relação entre variáveis fisiológicas, biomecânicas e o rendimento de corredores portugueses de 3000 metros. *Revista Portuguesa de Ciências do Desporto*, 7. doi:10.5628/rpcd.07.03.291
- Capelli, C., Schena, F., Zamparo, P., Monte, A. D., Faina, M., & di Prampero, P. E. (1998). Energetics of best performances in track cycling. *Med Sci Sports Exerc*, 30(4), 614-624. doi:10.1097/00005768-199804000-00021
- Cardoso, F., Coelho, E. P., Gay, A., Vilas-Boas, J. P., Pinho, J. C., Pyne, D. B., & Fernandes, R. J. (2022a). Case Study: A Jaw-Protruding Dental Splint Improves Running Physiology and Kinematics. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(5), 791-795. doi:10.1123/ijsp.2021-0338
- Cardoso, F., Monteiro, A. S., Vilas-Boas, J. P., Pinho, J. C., Pyne, D. B., & Fernandes, R. J. (2022b). Effects of Wearing a 50% Lower Jaw Advancement Splint on Biophysical and Perceptual Responses at Low to Severe Running Intensities. *Life (Basel)*, 12(2). doi:10.3390/life12020253
- Cavanagh, P. R., & Kram, R. (1985). The efficiency of human movement--a statement of the problem. *Med Sci Sports Exerc*, 17(3), 304-308.
- Cavanagh, P. R., & Kram, R. (1989). Stride length in distance running: velocity, body dimensions, and added mass effects. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 21(4), 467-479.
- Chang, Y. H., & Kram, R. (1999). Metabolic cost of generating horizontal forces during human running. *J Appl Physiol (1985)*, 86(5), 1657-1662. doi:10.1152/jappl.1999.86.5.1657
- Chumanov, E. S., Schache, A. G., Heiderscheit, B. C., & Thelen, D. G. (2012). Hamstrings are most susceptible to injury during the late swing phase of sprinting. *Br J Sports Med*, 46(2), 90. doi:10.1136/bjsports-2011-090176

- Conley, D. L., & Krahenbuhl, G. S. (1980). Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 12(5), 357-360.
- Di Michele, R., & Merni, F. (2014). The concurrent effects of strike pattern and ground-contact time on running economy. *J Sci Med Sport*, 17(4), 414-418. doi:10.1016/j.jsams.2013.05.012
- Dugan, S. A., & Bhat, K. P. (2005). Biomechanics and analysis of running gait. *Phys Med Rehabil Clin N Am*, 16(3), 603-621. doi:10.1016/j.pmr.2005.02.007
- Fletcher, J. R., & MacIntosh, B. R. (2017). Running Economy from a Muscle Energetics Perspective. *Front Physiol*, 8, 433. doi:10.3389/fphys.2017.00433
- Folland, J. P., Allen, S. J., Black, M. I., Handsaker, J. C., & Forrester, S. E. (2017). Running Technique is an Important Component of Running Economy and Performance. *Med Sci Sports Exerc*, 49(7), 1412-1423. doi:10.1249/MSS.0000000000001245
- Gómez-Molina, J., Ogueta-Alday, A., Stickley, C., Cámara, J., Cabrejas-Ugartondo, J., & García-López, J. (2017). Differences in Spatiotemporal Parameters Between Trained Runners and Untrained Participants. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 31(8), 2169-2175. doi:10.1519/jsc.0000000000001679
- Heise, G. D., Morgan, D. W., Hough, H., & Craib, M. (1996). Relationships between running economy and temporal EMG characteristics of bi-articular leg muscles. *Int J Sports Med*, 17(2), 128-133. doi:10.1055/s-2007-972820
- Hreljac, A. (1993). Preferred and energetically optimal gait transition speeds in human locomotion. *Med Sci Sports Exerc*, 25(10), 1158-1162.
- Hunter, I., Lee, K., Ward, J., & Tracy, J. (2017). Self-optimization of Stride Length Among Experienced and Inexperienced Runners. *Int J Exerc Sci*, 10(3), 446-453.
- Hunter, I., & Smith, G. A. (2007). Preferred and optimal stride frequency, stiffness and economy: changes with fatigue during a 1-h high-intensity run. *Eur J Appl Physiol*, 100(6), 653-661. doi:10.1007/s00421-007-0456-1
- Kapri, E., Mehta, M., & S, K. (2021). Biomechanics of running: An overview on gait cycle. *International Journal of Physical Education, Fitness and Sports*, 1-9. doi:10.34256/ijpefs2131
- Knopp, M., Muniz-Pardos, B., Wackerhage, H., Schonfelder, M., Guppy, F., Pitsiladis, Y., & Ruiz, D. (2023). Variability in Running Economy of Kenyan World-Class and European Amateur Male Runners with Advanced Footwear Running Technology: Experimental and Meta-analysis Results. *Sports Med*, 53(6), 1255-1271. doi:10.1007/s40279-023-01816-1

- Lavcanska, V., Taylor, N. F., & Schache, A. G. (2005). Familiarization to treadmill running in young unimpaired adults. *Hum Mov Sci*, 24(4), 544-557. doi:10.1016/j.humov.2005.08.001
- León-Guereño, P., Tapia-Serrano, M. A., & Sánchez-Miguel, P. A. (2020). The relationship of recreational runners' motivation and resilience levels to the incidence of injury: A mediation model. *PLOS ONE*, 15(5), e0231628. doi:10.1371/journal.pone.0231628
- Lieberman, D. E., Warrener, A. G., Wang, J., & Castillo, E. R. (2015). Effects of stride frequency and foot position at landing on braking force, hip torque, impact peak force and the metabolic cost of running in humans. *J Exp Biol*, 218(Pt 21), 3406-3414. doi:10.1242/jeb.125500
- Liu, B., Wu, J., Shi, Q., Hao, F., Xiao, W., Yu, J., Yu, F., & Ren, Z. (2022). Running economy and lower extremity stiffness in endurance runners: A systematic review and meta-analysis. *Front Physiol*, 13, 1059221. doi:10.3389/fphys.2022.1059221
- Lundby, C., Montero, D., Gehrig, S., Andersson Hall, U., Kaiser, P., Boushel, R., Meinild Lundby, A. K., Kirk, N., Valdivieso, P., Flück, M., Secher, N. H., Edin, F., Hein, T., & Madsen, K. (2017). Physiological, biochemical, anthropometric, and biomechanical influences on exercise economy in humans. *Scand J Med Sci Sports*, 27(12), 1627-1637. doi:10.1111/sms.12849
- Lussiana, T., Patoz, A., Gindre, C., Mourot, L., & Hebert-Losier, K. (2019). The implications of time on the ground on running economy: Less is not always better. *J Exp Biol*, 222(Pt 6). doi:10.1242/jeb.192047
- Minetti, A. E. (1998). A model equation for the prediction of mechanical internal work of terrestrial locomotion. *J Biomech*, 31(5), 463-468. doi:10.1016/s0021-9290(98)00038-4
- Minetti, A. E., & Alexander, R. M. (1997). A Theory of Metabolic Costs for Bipedal Gaits. *Journal of Theoretical Biology*, 186(4), 467-476. doi:https://doi.org/10.1006/jtbi.1997.0407
- Modica, J. R., & Kram, R. (2005). Metabolic energy and muscular activity required for leg swing in running. *J Appl Physiol* (1985), 98(6), 2126-2131. doi:10.1152/jappphysiol.00511.2004
- Moore, I. S. (2016). Is There an Economical Running Technique? A Review of Modifiable Biomechanical Factors Affecting Running Economy. *Sports Med*, 46(6), 793-807. doi:10.1007/s40279-016-0474-4
- Moore, I. S., Ashford, K. J., Cross, C., Hope, J., Jones, H. S. R., & McCarthy-Ryan, M. (2019). Humans Optimize Ground Contact Time and Leg Stiffness to Minimize the Metabolic Cost of Running. *Front Sports Act Living*, 1, 53. doi:10.3389/fspor.2019.00053
- Morin, J. B., Gimenez, P., Edouard, P., Arnal, P., Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., Brugherelli, M., & Mendiguchia, J. (2015). Sprint Acceleration Mechanics:

- The Major Role of Hamstrings in Horizontal Force Production. *Front Physiol*, 6, 404. doi:10.3389/fphys.2015.00404
- Nijs, A., Roerdink, M., & Beek, P. J. (2022). Running-style modulation: Effects of stance-time and flight-time instructions on duty factor and cadence. *Gait Posture*, 98, 283-288. doi:10.1016/j.gaitpost.2022.10.002
- Nummela, A., Keranen, T., & Mikkelsen, L. O. (2007). Factors related to top running speed and economy. *Int J Sports Med*, 28(8), 655-661. doi:10.1055/s-2007-964896
- Patoz, A., Lussiana, T., Thouvenot, A., Mouro, L., & Gindre, C. (2020). Duty Factor Reflects Lower Limb Kinematics of Running. *Applied Sciences*, 10(24), 8818.
- Pizzuto, F., de Oliveira, C. F., Soares, T. S. A., Rago, V., Silva, G., & Oliveira, J. (2019). Relationship Between Running Economy and Kinematic Parameters in Long-Distance Runners. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 33(7), 1921-1928. doi:10.1519/jsc.0000000000003040
- Preece, S. J., Bramah, C., & Mason, D. (2019). The biomechanical characteristics of high-performance endurance running. *Eur J Sport Sci*, 19(6), 784-792. doi:10.1080/17461391.2018.1554707
- R Core Team. (2023). R: A Language and Environment for Statistical Computing.
- Santos-Concejero, J., Granados, C., Irazusta, J., Bidaurrezaga-Letona, I., Zabala-Lili, J., Tam, N., & Gil, S. M. (2013). Differences in ground contact time explain the less efficient running economy in north african runners. *Biol Sport*, 30(3), 181-187. doi:10.5604/20831862.1059170
- Saunders, P. U., Pyne, D. B., Telford, R. D., & Hawley, J. A. (2004). Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Med*, 34(7), 465-485. doi:10.2165/00007256-200434070-00005
- Scholz, M. N., Bobbert, M. F., van Soest, A. J., Clark, J. R., & van Heerden, J. (2008). Running biomechanics: shorter heels, better economy. *J Exp Biol*, 211(Pt 20), 3266-3271. doi:10.1242/jeb.018812
- Sousa, A., Figueiredo, P., Zamparo, P., Pyne, D. B., Vilas-Boas, J. P., & Fernandes, R. J. (2015). Exercise Modality Effect on Bioenergetical Performance at V_O2max Intensity. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 47(8), 1705-1713. doi:10.1249/mss.0000000000000580
- Sousa, A. C., Vilas-Boas, J. P., & Fernandes, R. J. (2014). VO₂ kinetics and metabolic contributions whilst swimming at 95, 100, and 105% of the velocity at VO₂max. *Biomed Res Int*, 2014, 675363. doi:10.1155/2014/675363
- Tam, N., Tucker, R., Santos-Concejero, J., Prins, D., & Lamberts, R. (2018). Running Economy: Neuromuscular and Joint Stiffness Contributions in Trained Runners. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14, 1-22. doi:10.1123/ijsp.2018-0151

- Tartaruga, M. P., Brisswalter, J., Peyré-Tartaruga, L. A., Avila, A. O., Alberton, C. L., Coertjens, M., Cadore, E. L., Tiggemann, C. L., Silva, E. M., & Krueel, L. F. (2012). The relationship between running economy and biomechanical variables in distance runners. *Res Q Exerc Sport*, 83(3), 367-375. doi:10.1080/02701367.2012.10599870
- Tawa, N., & Louw, Q. (2018). Biomechanical factors associated with running economy and performance of elite Kenyan distance runners: A systematic review. *J Bodyw Mov Ther*, 22(1), 1-10. doi:10.1016/j.jbmt.2017.11.004
- Van Hooren, B., Jukic, I., Cox, M., Frenken, K. G., Bautista, I., & Moore, I. S. (2024). The Relationship Between Running Biomechanics and Running Economy: A Systematic Review and Meta-Analysis of Observational Studies. *Sports Med*. doi:10.1007/s40279-024-01997-3
- Van Oeveren, B. T., de Ruiter, C. J., Beek, P. J., & van Dieen, J. H. (2021). The biomechanics of running and running styles: a synthesis. *Sports Biomech*, 1-39. doi:10.1080/14763141.2021.1873411
- Williams, K. R., & Cavanagh, P. R. (1987). Relationship between distance running mechanics, running economy, and performance. *J Appl Physiol* (1985), 63(3), 1236-1245. doi:10.1152/jappl.1987.63.3.1236
- World Athletics. (2022). Our sport. *World Athletics Consult*. 22/06, 2024, disponível em <https://worldathletics.org/our-sport>
- Zacca, R., Azevedo, R., Chainok, P., Vilas-Boas, J. P., Castro, F. A. d. S., Pyne, D. B., & Fernandes, R. J. (2020). Monitoring Age-Group Swimmers Over a Training Macrocycle: Energetics, Technique, and Anthropometrics. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 34(3), 818-827. doi:10.1519/jsc.0000000000002762
- Zamparo, P., Capelli, C., & Pendergast, D. (2011). Energetics of swimming: a historical perspective. *Eur J Appl Physiol*, 111(3), 367-378. doi:10.1007/s00421-010-1433-7