

CAPÍTULO 5

TECNOLOGIAS WEARABLES NO CONTEXTO DA CORRIDA DE ENDURANCE



<https://doi.org/10.22533/at.ed.764122513055>

Data de aceite: 20/06/2025

Guilherme G. De Agostini

Rodney C. Paixão

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas, os dispositivos vestíveis (*wearables*) deixaram de ser acessórios restritos à monitorização pontual da frequência cardíaca para se tornarem plataformas multimodais capazes de adquirir, em tempo real e em condições ecológicas, dados mecânicos, fisiológicos e bioquímicos do corredor. Tal evolução decorre de três avanços convergentes: (i) a miniaturização de sensores inerciais, ópticos e eletroquímicos; (ii) o aumento da capacidade de processamento embarcado associado a redes de comunicação de baixa latência; e (iii) a consolidação de técnicas de ciência de dados e de inteligência artificial (IA) capazes de analisar fluxos de dados heterogêneos de elevada densidade temporal.

Esses progressos criam e sustentam, inclusive, o conceito de “atleta do futuro”,

entendido como o indivíduo cuja resposta biológica é monitorada *in vivo*, de maneira automática e integrada, em algoritmos de micro prescrição do treinamento. No âmbito da corrida de endurance, os *wearables* deslocam o processo decisório do treinador de avaliações laboratoriais esporádicas para uma monitorização contínua e contextualizada com a realidade de cada atleta.

Para a comunidade científica, tal ecossistema favorece estudos de validação externa e de inferência causal em ambientes da “vida real”. Para treinadores e atletas, possibilita prescrições mais assertivas e fundamentadas, ajustadas às respostas biológicas dinâmicas do organismo.

2. PANORAMA DAS TECNOLOGIAS WEARABLES

Os dispositivos vestíveis (*wearables*) podem ser classificados de diferentes maneiras, conforme o local de acoplamento ao corpo (como punho,

tórax, pé, entre outros), o tipo de transdutor utilizado (como sensores iniciais, ópticos, eletroquímicos ou acústicos) e a sua finalidade principal (por exemplo, monitoramento da carga externa, respostas fisiológicas ou variáveis biomecânicas). Independentemente da classificação adotada, esses dispositivos, assim como qualquer outro método de coleta de dados no contexto do treinamento esportivo, devem seguir um processo estruturado em três fases para assegurar sua eficácia e confiabilidade na prática aplicada:

(i) **Validade**: refere-se ao grau de veracidade ou precisão da medida obtida por um dispositivo. Ou seja, se ele realmente mede o que se propõe a medir. A validade pode ser avaliada comparando os resultados do dispositivo com um padrão-ouro ou método de referência.

(ii) **Reprodutibilidade ou confiabilidade**: é o grau de consistência e estabilidade de uma medida. Indica se o dispositivo gera resultados semelhantes em medições repetidas, sob as mesmas condições. Pode ser avaliada intra-avaliador, inter-avaliador ou entre diferentes sessões.

(iii) **Sensibilidade**: refere-se à capacidade do dispositivo de detectar pequenas, mas significativas variações em uma variável fisiológica ou desempenho. Ex.: um sensor de variabilidade da frequência cardíaca (VFC) deve ser sensível o suficiente para captar mudanças sutis no estado autonômico do atleta, como alterações após um treino exaustivo ou uma noite mal dormida – mesmo que esses valores ainda estejam dentro da faixa normal.

3. O USO DOS DISPOSITIVOS NO TREINAMENTO DE CORRIDA DE ENDURANCE

3.1. Variáveis mecânicas

O fator duty (*duty factor* – DF), parâmetro biomecânico que expressa a proporção do tempo total de contato do pé com o solo em relação ao tempo total do ciclo da passada, é um bom indicador da economia de corrida e em alguns casos, da incidência de lesão. Fatores como o desenvolvimento da fadiga ou inclinações no terreno (subida) aumentam o tempo de contato do pé com o solo, aumentando o DF. Por outro lado, calçados minimalistas e/ou o aumento da velocidade de corrida diminuem o DF. Sua aplicação na avaliação e no treinamento pode ser direcionada para diagnóstico da técnica, ajuste de cadência, monitoramento de fadiga e personalização de calçado.

Atualmente, diversos dispositivos de sensor inercial presos no dorso do pé ou na tibia detectam eventos de contato e decolagem pelo pico de aceleração. Além destes, há relógios de corrida avançados que já fornecem o tempo de contato com o solo, qual pode ser utilizado para obter o DF dividindo-o pelo tempo da passada.

O DF é um índice simples, mas altamente informativo da estratégia temporal de contato com o solo. Ele conecta a cinemática, a cinética e a economia de movimento, permitindo classificações objetivas de estilo de corrida, previsões de sobrecarga mecânica

e monitoramento prático via *wearables*. Ao interpretar o DF, vale dizer que não existe um valor ótimo universal, pois isso depende do contexto individual de velocidade, terreno, calçado, histórico de lesões e objetivos de performance.

Além do FD, os dispositivos no dorso do pé ou no cadarço, como o Stryd® quantificam a frequência e o comprimento da passada, a oscilação vertical do corpo, a rigidez da perna e potência mecânica instantânea. Todos estes fatores são de grande valia na avaliação do atleta de endurance.

3.2. Variáveis cardiovasculares

Uma das variáveis mais utilizadas na prescrição e/ou no acompanhamento de atletas é a frequência cardíaca (FC). A frequência cardíaca instantânea (FCi) representa o valor pontual, batimento a batimento, decorrente do intervalo R-R no eletrocardiograma. Ela traduz a soma das influências simpáticas e parassimpáticas que modulam a frequência de disparo do nó sinoatrial em escalas de milissegundos. Na prática esportiva, serve como “velocímetro interno”, indicando ser um bom marcador da intensidade do exercício.

A FC média do treino pode ser utilizada para mensurar a “carga interna” no atleta, gerada pelo tempo total do treino, multiplicando a duração do exercício pelo seu valor médio. Isso cria um índice chamado de TRIMP, qual é correlacionável com a carga externa (potência, ritmo, distância). Entretanto, a FC é um marcador muito sensível às variações do ambiente externo e interno (temperatura, desidratação, estresse mental, cafeína e altitude), carecendo mais cuidados em sua utilização.

Já a VFC descreve o padrão de flutuação dos intervalos R-R ao longo de minutos, revelando a influência momento a momento do sistema nervoso autônomo. Geralmente seu uso em repouso, analisadas no domínio do tempo (RMSSD, SDNN) ou em métodos não-lineares (DFA α^1), refletem prontidão fisiológica, onde altos valores da VFC indicam predominância vagal e boa capacidade de recuperação, enquanto baixa e persistente VFC sugerem fadiga, estresse ou início de doença. Diferente da FC instantânea, a VFC não é usada para regular a intensidade da sessão de treino, mas para decidir se o atleta deve treinar forte, moderado ou até descansar no dia que ela foi mensurada, ajudando a equilibrar carga crônica e aguda.

Os *wearables* são amplamente utilizados para a medição da FC e da VFC. A cinta peitoral utiliza dois eletrodos posicionados na região torácica (esternocostal) que detectam a atividade elétrica do coração, especialmente os intervalos R-R. A medição é direta, apresenta atraso mínimo e erro típico inferior a 1 bpm, mesmo durante variações bruscas de ritmo cardíaco.

Por outro lado, os sensores ópticos de pulso utilizam LEDs que iluminam a pele, enquanto um fotodiodo capta as flutuações volumétricas do fluxo sanguíneo. A partir do sinal registrado, algoritmos processam os dados para extrair a FC. No entanto, como dependem da perfusão periférica, esses sensores são mais suscetíveis a artefatos de movimento, pressão do bracelete, coloração da pele e intensidade da luz ambiente.”

3.3. Marcadores hidroeletrolíticos

Na corrida de endurance, especialmente em distâncias superiores à meia maratona, o estado hidroeletrolítico do atleta é crucial tanto para garantir o bom desempenho quanto para preservar sua saúde. Nesse contexto, o monitoramento das concentrações dos íons sódio (Na^+) e potássio (K^+) mostra-se de grande relevância.

Durante provas de longa duração, a perda de água por meio da sudorese reduz o volume plasmático, tornando o sangue mais viscoso e, consequentemente, sobrecarregando o coração. A frequência cardíaca e o esforço percebido aumentam, o fluxo sanguíneo cutâneo diminui, o calor metabólico passa a ser dissipado com menor eficiência e a temperatura corporal central pode se elevar até valores próximos de 40 °C — especialmente em ambientes quentes e úmidos.

Por outro lado, quando há ingestão de líquidos em excesso em relação à perda por suor, ocorre diluição do sódio plasmático, o que pode levar à hiponatremia associada à hiper-hidratação induzida pelo exercício. Em maratonas, a prevalência média desse distúrbio gira em torno de 8%, mas tende a aumentar em provas mais longas ou entre atletas de ritmo mais lento, que permanecem mais tempo ingerindo líquidos ao longo da prova. Em casos extremos, a hiponatremia pode causar convulsões, edema cerebral e, se não tratada rapidamente, levar à morte.

Atualmente, adesivos cutâneos oferecem suporte no monitoramento de sódio e potássio durante treinos prolongados ou em ambientes quentes, permitindo recomendações em tempo real para reposição hídrica e salina. Dispositivos como o Gatorade® Gx (análise de cloreto/sódio no pós-exercício) e o Nix Hydration Biosensor® (com feedback contínuo) já exploram comercialmente essa abordagem. No entanto, algumas limitações ainda existem, como a variação regional na composição do suor, a necessidade de calibração por lote, o custo dos adesivos descartáveis e a maior dificuldade analítica na quantificação do potássio (K^+), já que o suor contém cerca de dez vezes mais sódio do que potássio.

Esses adesivos funcionam por meio de microcanais de coleta passiva integrados a eletrodos íon-seletivos impressos em filmes flexíveis. À medida que o suor penetra na matriz, membranas com ionóforos específicos geram sinais eletroquímicos detectados por um chip ultrafino, que os digitaliza e transmite em tempo real para o smartphone. Dessa forma, o atleta pode visualizar parâmetros como taxa de sudorese, perda acumulada de eletrólitos e receber alertas individualizados de hidratação.

3.4. Medidores de glicose sanguínea

Desde os trabalhos desenvolvidos na década de 1960, o interesse pelo metabolismo dos carboidratos e sua relação com o desempenho esportivo vem crescendo no meio científico e aplicado. Diversos estudos demonstraram que maiores reservas de glicogênio hepático e/ou muscular, bem como a administração de soluções com glicose durante o exercício, aumentam o tempo até a exaustão — um excelente indicativo de desempenho em modalidades de *endurance*.

Embora a mensuração das concentrações de glicogênio ainda não possa ser realizada de forma simples, rápida e não invasiva, o monitoramento da glicemia evoluiu consideravelmente nos últimos anos. Inicialmente, no esporte, utilizavam-se fitas descartáveis que requeriam menos de 50 µL de sangue para verificar a concentração de glicose, auxiliando na definição do tempo e da quantidade ideais para a ingestão de carboidratos durante treinos e competições.

Atualmente, sistemas de monitoramento contínuo da glicose (*Continuous Glucose Monitoring* – CGM) são capazes de quantificar, com relativa precisão, as concentrações de glicose no fluido intersticial. O princípio físico-químico mais utilizado permanece o amperométrico, que envolve: (i) uma camada enzimática de glicose-oxidase responsável por catalisar a oxidação da D-glicose em gluconolactona; (ii) a geração de peróxido de hidrogênio; e (iii) a produção de um fluxo de elétrons convertido em sinal elétrico por meio de eletrodos. A latência fisiológica entre a glicose do sangue capilar e do fluido intersticial (~5–10 minutos) é compensada por filtros digitais e modelos cinéticos, permitindo uma leitura praticamente em tempo real. Os dispositivos de última geração possuem vida útil média de 14 a 15 dias.

Em esportes de *endurance*, pesquisadores vêm utilizando os CGMs para mapear dinâmicas glicêmicas ao longo do esforço, acompanhando o metabolismo de carboidratos e avaliando a eficácia de estratégias de suplementação. Em maratonistas, por exemplo, observou-se uma correlação entre quedas de glicemia abaixo de $4,5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ e interrupções no ritmo, sugerindo um potencial valor preditivo para o planejamento de *pacing* nutricional.

Apesar de sua utilidade crescente, ainda existem desafios a serem superados. Entre eles, destaca-se a formação de cápsula fibrosa em torno do sensor após 10 a 14 dias de uso, o que aumenta a impedância à difusão de glicose. Além disso, variações locais no pH e na concentração de oxigênio podem interferir na corrente elétrica gerada, enviesando os valores medidos.

3.5. Medidores de lactato

Reconhecido como um dos grandes pilares do desempenho em provas de endurance, o monitoramento dos limiares de lactato e/ou da máxima fase estável de lactato apresenta elevada correlação com o rendimento em distâncias que variam entre 5 e 42 km. Já amplamente descrito na literatura, um valor elevado de limiar indica a capacidade de sustentar maiores velocidades de corrida sem acúmulo significativo de fadiga, sendo um indicador da fração suportável do consumo máximo de oxigênio e do nível de treinamento do atleta. Nesse sentido, medidas contínuas de lactato seriam extremamente úteis para monitorar a intensidade tanto de sessões de treino quanto de competições, reduzindo a probabilidade de adoção equivocada de estratégias de ritmo (*pacing*).

Um dos avanços mais promissores no campo dos dispositivos vestíveis é o desenvolvimento de adesivos cutâneos para monitoramento de lactato, que representam uma nova geração de biossensores metabólicos em tempo real. Esses dispositivos utilizam, predominantemente, biossensores enzimáticos amperométricos baseados na lactato-oxidase (LOx). Modelos recentes, lançados em 2025, apresentam autonomia ampliada e são capazes de monitorar concentrações entre 1 e 20 mmol·L⁻¹ por até 8 horas consecutivas de exercício prolongado.

Paralelamente à abordagem baseada em amperometria, vêm sendo testadas microagulhas condutoras que penetram até 800 µm na derme, acessando diretamente o fluido intersticial. Essa técnica reduz o atraso fisiológico de detecção para menos de 3 minutos e melhora significativamente a correlação com a lactatemia venosa, atingindo coeficientes de até $r = 0,91$ em protocolos de teste incremental.

Apesar dos avanços, ainda existem desafios analíticos importantes. Um deles refere-se à variabilidade da concentração de lactato no suor, que depende diretamente da taxa de sudorese e do gradiente térmico, resultando em significativa variabilidade inter-regional. Além disso, a relação entre as concentrações de lactato no suor e no sangue não é linear, especialmente nas primeiras dezenas de minutos de exercício intenso. Dessa forma, a adoção em larga escala ainda requer validações multicêntricas que comprovem a equivalência clínico-esportiva dos dispositivos, bem como o desenvolvimento de algoritmos capazes de traduzir os sinais brutos em métricas aplicáveis, como a identificação dos limiares de intensidade e a delimitação de zonas de esforço.

4. DESAFIOS, LIMITAÇÕES E QUESTÕES ÉTICAS

Apesar da ampla utilidade dos *wearables* na avaliação, monitoramento e prescrição do treinamento, ainda persistem desafios relevantes. Um exemplo está nas divergências entre marcas comerciais, como observado na estimativa de potência entre dispositivos Stryd® e Garmin®, cuja validade depende de modelos algorítmicos proprietários e nem sempre comparáveis. Em sensores bioquímicos, a validade fisiológica é influenciada pela cinética suor–sangue, pelo fluxo glandular e pela localização das glândulas sudoríparas, além da latência fisiológica de 3 a 5 minutos, que pode comprometer ajustes imediatos na intensidade do exercício.

Além das limitações técnicas, a obtenção e o uso de dados fisiológicos em tempo real levantam importantes questões éticas. O armazenamento, o compartilhamento e a interpretação de dados sensíveis exigem diretrizes claras quanto à privacidade, consentimento informado e transparência no uso das informações. Ademais, a adoção de tecnologias avançadas por apenas parte dos atletas pode gerar assimetria de acesso e vantagens competitivas, sendo por vezes comparada a formas tecnológicas de doping. Nesse contexto, tornam-se fundamentais programas de acessibilidade, capacitação digital e equidade no uso de tecnologias no esporte.

5. CONCLUSÃO

Os *wearables* evoluíram de simples contadores de passos para plataformas integradas de análise biomecânica, fisiológica e bioquímica, oferecendo novas camadas de inteligência ao treinamento de endurance. Quando utilizados com base em validação científica rigorosa e integrados a modelos sistematizados de tomada de decisão, esses dispositivos potencializam o desempenho atlético e contribuem para a prevenção de lesões e distúrbios fisiológicos.

No entanto, seu uso eficaz depende de uma compreensão crítica de suas limitações metodológicas, do uso ético e seguro dos dados coletados e de uma atualização constante diante da rápida evolução tecnológica. O futuro dos *wearables* no esporte dependerá não apenas da inovação em sensores e algoritmos, mas também da capacidade dos profissionais em interpretar os dados de forma contextualizada e responsável às necessidades individuais dos atletas.

REFERÊNCIAS

- ASSALVE, G. et al. Advanced wearable devices for monitoring sweat biochemical markers in athletic performance: a comprehensive review. **Biosensors (Basel)**, v. 14, n. 12, 2024.
- BERZOSA, C. et al. Assessing trail running biomechanics: a comparative analysis of the reliability of Stryd(TM) and GARMIN(RP) wearable devices. **Sensors (Basel)**, v. 24, n. 11, 2024.
- HUGHES, M.; FRANKS, I. M.; FRANKS, I. M. **Essentials of performance analysis in sport**. 2. ed. Routledge, 2015. p. ISBN 9781138022997.
- MOORE, I. S.; WILLY, R. W. Use of wearables: tracking and retraining in endurance runners. **Curr Sports Med Rep**, v. 18, n. 12, p. 437-444, 2019.
- MUNIZ-PARDOS, B. et al. Integration of wearable sensors into the evaluation of running economy and foot mechanics in elite runners. **Curr Sports Med Rep**, v. 17, n. 12, p. 480-488, 2018.
- NIJS, A.; ROERDINK, M.; BEEK, P. J. Exploring running styles in the field through cadence and duty factor modulation. **PLoS One**, v. 18, n. 12, p. e0295423, 2023.
- NUUTTILA, O. P. et al. Reliability and sensitivity of nocturnal heart rate and heart-rate variability in monitoring individual responses to training load. **Int J Sports Physiol Perform**, v. 17, n. 8, p. 1296-1303, 2022.
- REIS, F. J. J. et al. Artificial intelligence and machine learning approaches in sports: concepts, applications, challenges, and future perspectives. **Braz J Phys Ther**, v. 28, n. 3, p. 101083, 2024.
- VAN HOOREN, B. et al. Real-time feedback by wearables in running: current approaches, challenges and suggestions for improvements. **J Sports Sci**, v. 38, n. 2, p. 214-230, 2020.
- YANG, G.; HONG, J.; PARK, S. B. Wearable device for continuous sweat lactate monitoring in sports: a narrative review. **Front Physiol**, v. 15, p. 1376801, 2024.