

Módulo 3. Variabilidad de la frecuencia cardíaca y DFA alpha-1

Fundamentos y medición de la VFC

Introducción

La variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) se ha convertido en una de las métricas más difundidas en el campo de la fisiología del ejercicio, debido a su capacidad para reflejar el estado del sistema nervioso autónomo (SNA). A diferencia de la frecuencia cardíaca estática, medida en pulsaciones por minuto, la VFC evalúa la fluctuación continua en el tiempo que transcurre entre un latido y otro (intervalos R-R). Estas variaciones están moduladas por el equilibrio entre las ramas simpática y parasimpática del SNA, lo que nos proporciona información sobre la respuesta del organismo al estrés, la carga de entrenamiento y la recuperación.

En este bloque abordaremos cuatro aspectos principales: (1) la definición y el significado fisiológico de la VFC, (2) los factores que la modifican en el día a día y a lo largo de la vida deportiva, (3) los métodos y parámetros más empleados para medirla y (4) sus aplicaciones en la monitorización de la recuperación y la detección de fatiga.

Conceptos y fundamentos de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC)

Definición y significancia fisiológica

La variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) se entiende como la fluctuación temporal en los intervalos R-R, es decir, los que se producen entre picos sucesivos de la onda R en el electrocardiograma. En términos generales, el corazón no late como un reloj, sino que la distancia entre un latido y el siguiente varía de manera ligera, lo que refleja la modulación autonómica continua.

Conexión con el sistema nervioso autónomo (SNA)

El SNA está formado por dos ramas principales: la simpática, asociada con la respuesta de «lucha o huida» (*fight-or-flight*), y la parasimpática o vagal, que favorece la «restauración y el descanso».

La frecuencia cardíaca se regula mediante un equilibrio dinámico entre ambas ramas. Cuando la influencia parasimpática es mayor, el siguiente latido se retrasa y



se generan fluctuaciones más amplias. En cambio, cuando predomina el tono simpático, el corazón late con mayor frecuencia, de forma más regular y con menor variabilidad.

Importancia clínica y deportiva

Una VFC elevada, en parámetros como el *RMSSD*, suele interpretarse como un indicador de buena capacidad de adaptación y de menor nivel de estrés fisiológico.

Por el contrario, una VFC reducida puede relacionarse con mayor fatiga, estrés crónico o sobreentrenamiento, así como con algunas condiciones patológicas.

Homeostasis y capacidad de respuesta

La VFC refleja la capacidad del organismo para adaptarse a los cambios internos y externos, como variaciones en la temperatura, el metabolismo o las demandas del entorno.

Un sistema cardiovascular flexible, que ajuste con rapidez la frecuencia cardíaca frente a los estímulos, es señal de mayor resiliencia.

Indicador del balance autónomo (simpático vs. parasimpático)

El análisis de la VFC nos permite, de manera no invasiva, estimar la participación relativa de las ramas simpática y parasimpática. A continuación, se detallan sus principales características:

- **Control parasimpático**

Se asocia con un ritmo cardíaco más bajo y con mayor variabilidad entre latidos. Durante el reposo o el sueño profundo, el tono parasimpático predomina, lo que explica que la VFC sea más alta en estas condiciones.

- **Control simpático**

Implica un aumento de la frecuencia cardíaca y una disminución de la variabilidad. Situaciones de estrés físico o mental, elevada demanda de esfuerzo o falta de recuperación pueden manifestarse en un incremento del tono simpático y en la consecuente reducción de la VFC.

Balance dinámico

En la práctica, el organismo mantiene un equilibrio constante entre ambos sistemas. El predominio relativo de uno u otro se ve influido por factores como la hora del día,



la alimentación, la temperatura ambiente, el estado anímico o el nivel de entrenamiento.

Un sistema sano tiene la capacidad de modular ambas ramas según las necesidades, sin quedar atrapado en un estado de predominio simpático.

Factores que afectan la VFC

La VFC no es un valor fijo y puede variar de manera significativa tanto entre diferentes personas (variabilidad interindividual) como en una misma persona a lo largo del tiempo (variabilidad intraindividual). A continuación, mencionamos algunos de los factores más influyentes.

- **Estrés, descanso, nutrición y entrenamiento**

Diversos factores cotidianos influyen en la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC). El estrés psicológico y emocional, por ejemplo, puede reducirla, ya que situaciones de ansiedad, preocupación o tensión, como exámenes, competiciones importantes o problemas personales, incrementan el tono simpático. En cambio, la práctica de técnicas de relajación o *mindfulness* puede revertir este efecto y favorecer un aumento de la VFC.

La calidad y cantidad del descanso también tienen un papel fundamental. Durante el sueño profundo predomina el tono vagal, lo que se traduce en una VFC más elevada. Por el contrario, la falta de sueño o el descanso inadecuado se asocian con un aumento de hormonas de estrés, como el cortisol y la adrenalina, y con una disminución de la VFC.

Otro factor relevante es la nutrición. El consumo de cafeína, bebidas energéticas o alcohol puede alterar temporalmente el equilibrio autonómico y reducir la VFC. Por el contrario, una alimentación equilibrada en macronutrientes y micronutrientes favorece la recuperación y contribuye a mejorarla en el largo plazo.

Finalmente, el entrenamiento físico también ejerce una influencia marcada. El ejercicio agudo, especialmente de alta intensidad, activa el sistema simpático y provoca una disminución transitoria de la VFC. Sin embargo, a medida que avanzamos en la recuperación, el tono parasimpático retoma el control y la VFC aumenta de manera progresiva. A nivel crónico, un atleta con buen entrenamiento aeróbico suele presentar una VFC más alta en reposo que una persona sedentaria.

- **Variabilidad inter e intraindividual**

Cada persona posee una línea base de VFC particular, determinada en parte por factores genéticos, la condición física y el perfil psicofisiológico. Incluso siguiendo



una misma rutina de entrenamiento, dos individuos pueden mostrar respuestas distintas en sus patrones de VFC.

Del mismo modo, un mismo deportista puede experimentar fluctuaciones significativas a lo largo de los días, semanas o meses. Por ejemplo, es común observar una reducción de la VFC los lunes si el fin de semana anterior se compitió intensamente o tras un período de estrés laboral.

Por esta razón, resulta recomendable realizar una monitorización continua o repetida para obtener conclusiones válidas. Lo ideal es medir la VFC de forma regular, en condiciones similares —preferentemente en reposo y a la misma hora del día—, y analizar tendencias o patrones en lugar de atender a valores aislados. Hoy en día, las aplicaciones y dispositivos modernos facilitan llevar un registro diario que, correlacionado con la carga de entrenamiento, ofrece información valiosa sobre la evolución del estado de forma y la fatiga.

Métodos de medición y análisis de la VFC

Técnicas y dispositivos

La VFC puede medirse de manera directa mediante un electrocardiograma (ECG) o, de forma más accesible y difundida, a través de monitores de frecuencia cardíaca como cintas pectorales o relojes inteligentes. Sin embargo, es importante tener en cuenta que existen diferencias en la exactitud y la confiabilidad de los distintos sistemas.

- **Electrocardiograma (ECG) de 1 a 12 derivaciones**

El electrocardiograma (ECG) de 1 a 12 derivaciones se considera el método de referencia, ya que permite registrar con gran precisión la actividad eléctrica cardíaca. Suele emplearse en contextos de investigación o clínicos, aunque no siempre resulta práctico para los deportistas en actividades cotidianas.

- **Cintas de pecho y sensores ópticos**

Las cintas de pecho con medición de frecuencia cardíaca son muy utilizadas en el deporte, ya que ofrecen datos cercanos al electrocardiograma y con una precisión adecuada para la mayoría de las aplicaciones de VFC. En los últimos años, algunos sensores ópticos de muñeca, como los incorporados en ciertos relojes inteligentes, han mejorado su fiabilidad, aunque todavía pueden presentar artefactos cuando hay demasiado movimiento, sudor o un mal ajuste. Para el análisis de la VFC en reposo o durante actividades de baja intensidad, estos dispositivos pueden ser suficientemente precisos; sin embargo, en entrenamientos de alta intensidad, las cintas de pecho continúan siendo más recomendables.

- **Aplicaciones y *software* de análisis**

Existen diversas aplicaciones y programas, como Kubios HRV, Elite HRV o HRV4Training, que nos permiten registrar y procesar los datos de manera práctica. El cálculo de la VFC exige identificar con precisión cada intervalo R-R y aplicar distintos métodos de análisis, ya sea en el dominio del tiempo, en el de la frecuencia o mediante enfoques no lineales.

Parámetros comunes (RMSSD, SDNN)

Dentro de los múltiples índices de la VFC, dos de los más empleados en la práctica deportiva son el RMSSD y el SDNN, aunque existen otros igualmente relevantes. El RMSSD (*root mean square of successive differences*) calcula la raíz cuadrática media de las diferencias sucesivas entre intervalos R-R N-N adyacentes, es decir, aquellos correspondientes a latidos normales y sinusales, excluyendo artefactos, extrasístoles y latidos anómalos. Este parámetro es muy sensible al tono parasimpático, por lo que se considera un buen indicador de la actividad vagal. Se utiliza con frecuencia en la monitorización diaria de deportistas, ya que muestra una buena correlación con la fatiga y la recuperación.

Por su parte, el SDNN (*standard deviation of all normal R-R intervals*) mide la desviación estándar de todos los intervalos R-R normales en un periodo de registro. Refleja la variabilidad general del ciclo cardíaco, influida tanto por factores de corto plazo, como la actividad parasimpática, como por factores de más largo plazo, entre ellos los ritmos circadianos o el estrés prolongado.

Además de estos, se emplean parámetros obtenidos en el dominio de la frecuencia, como la banda de alta frecuencia (HF), asociada a la actividad parasimpática, y la de baja frecuencia (LF), relacionada con la actividad simpática, aunque su interpretación es más compleja. También se aplican índices no lineales, como ApEn, SampEn o DFA alpha-1, que permiten explorar la complejidad y fractalidad de la señal de la VFC; este último será tratado más adelante en relación con el DFA alpha-1.

Es importante destacar que los valores absolutos de cada parámetro pueden variar significativamente tanto entre personas como en un mismo individuo según la hora del día. Por ello, resulta fundamental realizar las mediciones en condiciones similares —en la misma postura, a la misma hora, y bajo un nivel comparable de ruido, hidratación y otros factores— con el fin de obtener datos consistentes en el tiempo y que reflejen cambios reales en la fisiología.

Aplicaciones de la VFC en el deporte

Monitorización de la recuperación



Uno de los usos más difundidos de la VFC es su empleo como marcador de recuperación física después del entrenamiento o la competición. La lógica es sencilla: cuando la VFC regresa con rapidez a sus valores habituales —o incluso superiores—, podemos interpretar que el deportista se encuentra recuperado y con un adecuado predominio parasimpático.

- **Control diario**

Muchos atletas y entrenadores recomiendan medir la VFC diariamente, preferentemente por la mañana al despertar, con el fin de obtener una «fotografía» del estado de recuperación frente a la carga del día anterior. Si la VFC aparece reducida de manera significativa durante varios días consecutivos, esto puede interpretarse como una señal de acumulación de fatiga o de exceso de estrés.

Este control diario también resulta útil en la periodización del entrenamiento. Al planificar los ciclos de trabajo, el seguimiento de la VFC permite ajustar la intensidad de los microciclos o anticipar la necesidad de descansos adicionales. Por ejemplo, si un deportista muestra un descenso marcado de la VFC al inicio de una semana de carga, puede ser conveniente disminuir ligeramente el volumen o la intensidad del entrenamiento para prevenir lesiones o estados de sobrecarga.

- **Integración con otras métricas**

La VFC suele complementarse con la frecuencia cardíaca en reposo, la percepción subjetiva del esfuerzo (RPE) y la calidad del sueño. La combinación de estos indicadores nos brinda una visión más completa del estado fisiológico del deportista. Además, algunas plataformas digitales utilizan algoritmos que cruzan datos de VFC, pulsaciones y sueño para generar una puntuación global de «recuperación».

Detección de fatiga y sobreentrenamiento

El sobreentrenamiento es un síndrome complejo en el que una carga excesiva, combinada con una recuperación inadecuada, conduce a una disminución crónica del rendimiento. La VFC puede convertirse en una herramienta valiosa para detectarlo en fases tempranas. En la etapa inicial, algunos estudios señalan un incremento paradójico de la VFC, posiblemente como expresión de una hiperadaptación, aunque posteriormente suele observarse un descenso sostenido debido al mantenimiento prolongado del tono simpático y a la reducción del parasimpático. El patrón exacto puede variar en función del tipo de deporte, la predisposición genética y otros factores, de modo que la monitorización continua y longitudinal resulta fundamental.



Es importante diferenciar entre fatiga aguda y fatiga crónica. La primera se relaciona con un descenso transitorio de la VFC tras una sesión de alta exigencia, pero que tiende a recuperarse en pocos días. En cambio, en el sobreentrenamiento la VFC permanece alterada durante semanas, acompañada de un rendimiento estancado o decreciente, alteraciones del sueño y, con frecuencia, cambios psicológicos como irritabilidad o desmotivación.

Ante una tendencia descendente de la VFC sin repunte en los días de descanso, el entrenador puede decidir incorporar más sesiones de recuperación activa o pasiva, reducir las cargas de trabajo, mejorar la higiene del sueño o ajustar la alimentación. Detectar y revertir esta situación a tiempo es clave para prevenir lesiones y evitar el estancamiento en la progresión deportiva.

Conclusiones

La variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) constituye una herramienta privilegiada para comprender el estado funcional del sistema nervioso autónomo y, en consecuencia, la capacidad de adaptación y recuperación del deportista. Se trata de un indicador holístico que refleja la interacción de factores fisiológicos y psicológicos —como el estrés, la nutrición, el descanso y el entrenamiento—, por lo que su interpretación siempre debe contextualizarse junto con otros datos, como el rendimiento y las sensaciones subjetivas.

En cuanto a los métodos de medición, si bien disponemos de múltiples herramientas, la constancia en la metodología resulta crítica para poder comparar valores en el tiempo; esto implica utilizar el mismo dispositivo, en la misma franja horaria y bajo condiciones similares.

La VFC tiene aplicaciones prácticas de gran utilidad, ya que funciona como un recurso de retroalimentación para regular la carga de entrenamiento, programar descansos y prevenir la acumulación excesiva de estrés. No obstante, también presenta limitaciones y desafíos: las respuestas individuales pueden variar y una interpretación inadecuada —como alarmarse por un valor bajo en un único día o asumir que un incremento puntual garantiza una recuperación óptima— puede conducir a errores de planificación.

El empleo de la VFC como indicador de salud y rendimiento se inscribe en las estrategias de monitorización interna de la carga, donde se busca un enfoque integral que contemple no solo lo que realiza el deportista (carga externa), sino también cómo su cuerpo y mente responden a esos estímulos. Esta perspectiva, unida a la creciente disponibilidad de tecnologías *wearables* y al auge de programas de análisis, anticipa que la VFC seguirá consolidando su relevancia en el entrenamiento deportivo.



Resumen de la unidad 1

La variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) es una herramienta valiosa para evaluar el balance entre la rama simpática y la parasimpática del sistema nervioso autónomo, convirtiéndose en un indicador sensible de la respuesta del organismo al entrenamiento, al estrés y a los procesos de recuperación. Entre los factores que la afectan se encuentran el descanso, la nutrición, la carga psicológica y las características individuales de cada deportista. Para su medición, las técnicas más comunes se basan en el registro de intervalos R-R mediante electrocardiograma (ECG) o dispositivos de frecuencia cardíaca, y el análisis de la señal se realiza a través de parámetros como RMSSD o SDNN. En el ámbito del alto rendimiento y de la salud deportiva, la VFC se emplea para monitorizar la recuperación, detectar estados de sobreentrenamiento y ajustar la carga de ejercicio, integrándose además con otras variables fisiológicas y subjetivas para ofrecer una visión holística del estado del atleta. De esta manera, la VFC se ha consolidado como uno de los marcadores no invasivos más efectivos para optimizar la planificación deportiva y proteger el bienestar de los deportistas.

Introducción al DFA alpha-1

Introducción

La variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) es una métrica ampliamente utilizada para monitorizar la respuesta del organismo ante diversas condiciones de estrés, incluidos el entrenamiento y la recuperación. Los métodos clásicos de análisis de la VFC, en el dominio del tiempo y la frecuencia —como RMSSD, SDNN o LF/HF— han demostrado ser útiles, aunque presentan limitaciones para captar la complejidad de la señal cardíaca, en especial durante ejercicios de intensidad variable.

En los últimos años, el enfoque no lineal del análisis de la VFC ha cobrado mayor relevancia, incorporando procedimientos como la entropía aproximada, la entropía de muestra, la correlación dimensional y el *detrended fluctuation analysis* (DFA). Dentro de esta última metodología, el parámetro DFA alpha-1 se ha consolidado como un marcador emergente para evaluar la dinámica de la variabilidad de la frecuencia cardíaca durante el ejercicio, con posible relación con distintos umbrales fisiológicos.

Este bloque se centrará en explicar el concepto y los fundamentos de DFA alpha-1, su origen en la teoría del caos y los fractales y la forma en que se interpreta en la fisiología humana. También abordaremos su significado fisiológico, la relación con la intensidad del ejercicio y la posibilidad de emplearlo como indicador de umbrales aeróbicos. Asimismo, se revisarán las tecnologías y el software disponibles para realizar este análisis y su integración con distintos dispositivos. Finalmente,

presentaremos sus aplicaciones prácticas en la planificación y el control del entrenamiento, junto con las tendencias y estudios recientes que avalan o discuten su utilidad.

Concepto y fundamentos del DFA alpha-1

Origen en la teoría del caos y los fractales

El *detrended fluctuation analysis* (DFA) es una técnica de análisis estadístico creada inicialmente para estudiar la presencia de correlaciones de largo alcance en series temporales que exhiben rasgos de comportamiento fractal o de autosimilaridad. Se originó en el campo de la física y la teoría del caos, aplicado primero al estudio de señales como el registro de pulsaciones del ADN o las fluctuaciones climáticas.

La fisiología humana, y en particular la regulación cardiovascular, puede describirse como un sistema complejo en el que existen múltiples procesos de retroalimentación (*feedbacks*) e interacciones entre subsistemas como el sistema nervioso central, el sistema nervioso autónomo, el sistema endocrino y la hemodinámica. Variables como la frecuencia cardíaca no siguen una linealidad simple, sino que muestran una dinámica interna que se asemeja a los fenómenos caóticos y fractales, donde se observan patrones de autosimilaridad en distintas escalas temporales.

En la señal de VFC, la amplitud de las fluctuaciones y la correlación entre diferentes escalas temporales revelan cómo el sistema cardíaco se autorregula. El DFA se utiliza para identificar si la serie temporal —los intervalos R-R— exhibe correlaciones persistentes, antipersistentes o comportamientos aleatorios en diferentes ventanas de tiempo. De forma simplificada, este procedimiento consiste en integrar los valores de la serie temporal, dividirlos en ventanas de longitud variable y ajustar en cada una de ellas una tendencia local, generalmente mediante una regresión lineal. Posteriormente se calcula la fluctuación o desviación respecto de la tendencia en cada ventana.

Cuando se modifica la escala, es decir, el tamaño de las ventanas, la magnitud de las fluctuaciones sigue una ley potencial cuyo exponente recibe el nombre de *alpha*. En la señal de VFC suelen reportarse dos exponentes: $\alpha-1$, asociado a escalas cortas, y $\alpha-2$, vinculado a escalas largas. En el contexto del ejercicio, el más investigado en los últimos años es el DFA $\alpha-1$.

Interpretación en el contexto fisiológico

El DFA $\alpha-1$ puede interpretarse en relación con la dinámica de la frecuencia cardíaca y el equilibrio autonómico. A continuación, se presentan tres aspectos que ayudan a comprender su aplicación en la fisiología del ejercicio.



- **Autosimilitud en la serie R-R**

Si la señal de la VFC presenta una «memoria» a corto plazo, esto se asocia a un valor de $\alpha-1$ distinto al que se observa cuando la serie se comporta como un ruido blanco, sin correlación, o como un ruido $1/f$, característico de sistemas fractales naturales. En la práctica, un valor de $\alpha-1$ cercano a 1.0 —por ejemplo, entre 0.75 y 1.0— suele considerarse típico de un sistema con propiedades fractales y correlaciones saludables, mientras que valores muy altos (superiores a 1.0) o muy bajos (menores a 0.5) indican un cambio en la dinámica, hacia mayor aleatoriedad o mayor rigidez.

- **Aplicación a la regulación autónoma**

Un rango adecuado de valores de $\alpha-1$ podría reflejar la complejidad óptima del sistema, donde existe un equilibrio entre orden y desorden en la señal. Con el aumento de la intensidad del ejercicio, se ha observado que $\alpha-1$ disminuye, lo que indicaría una pérdida de complejidad y una mayor regularidad en la frecuencia cardíaca, vinculada al predominio de la rama simpática.

- **Comparación con otros índices no lineales**

El DFA es uno de varios enfoques no lineales, junto con medidas de entropía y dimensiones fractales. Su popularidad se debe a la relativa facilidad de implementación y a su capacidad de controlar las tendencias en la serie —de ahí el término *detrended*. El interés en DFA $\alpha-1$ radica en que se ha visto que correlaciona con la intensidad del ejercicio y posiblemente con determinados umbrales fisiológicos.

Significado fisiológico del DFA $\alpha-1$

Relación con la intensidad del ejercicio

El DFA $\alpha-1$ se ha estudiado en diferentes contextos de carga y permite observar cómo varía la dinámica de la frecuencia cardíaca en función del nivel de esfuerzo.

- **Efecto del aumento de carga**

Estudios recientes muestran que, a medida que se incrementa la intensidad del ejercicio, $\alpha-1$ tiende a descender hacia valores cercanos a 0.5-0.7. Esto sugiere una mayor regularidad en la serie R-R y una supresión de la complejidad habitual. El fenómeno coincide con la activación progresiva del sistema nervioso simpático, encargado de regular la frecuencia cardíaca para satisfacer las demandas metabólicas.

- **De la zona aeróbica a la anaeróbica**



En intensidades bajas, propias de la zona aeróbica, la frecuencia cardíaca mantiene cierto componente vagal y la señal conserva mayor complejidad, lo que se traduce en valores de α -1 más altos. Al aproximarse al umbral anaeróbico o al sobrepasarlo, el tono simpático se vuelve predominante y la dinámica fractal de la VFC se reduce de forma notable, con una caída marcada de α -1.

- **Asociación con la fatiga momentánea**

En esfuerzos máximos o submáximos prolongados, el descenso de α -1 puede interpretarse como un signo de fatiga aguda. En estas condiciones, el organismo disminuye su capacidad de autoorganización autónoma y recurre a un control más rígido del ritmo cardíaco.

Indicador de umbrales aeróbicos

Investigaciones preliminares, especialmente en protocolos de ejercicio incremental, sugieren que existe un punto de quiebre en la curva de α -1 que coincide de manera razonable con el primer umbral ventilatorio o umbral aeróbico (VT1). Este hallazgo abre la posibilidad de utilizar la monitorización de DFA α -1 en tiempo real, mediante *wearables* compatibles, para estimar dicho umbral, sin necesidad de recurrir a mediciones invasivas de lactato o a costosas pruebas de laboratorio.

Si bien no existe un estándar universal, varios estudios, en particular con deportistas de resistencia, han observado correlaciones moderadas a altas entre el punto de inflexión de α -1 y el umbral ventilatorio o el umbral láctico. Sin embargo, la variabilidad individual exige cautela, ya que se trata de un sistema en desarrollo que, por ahora, conviene complementar con los métodos tradicionales.

En la práctica, un *test* incremental sencillo, realizado en laboratorio o en el terreno, puede registrar la evolución de α -1 y detectar cambios abruptos —por ejemplo, una caída de 1.0 a 0.75— que servirían como referencia para delimitar zonas de entrenamiento aeróbico y moderado. Esto abre una vía prometedora para ajustar intensidades en tiempo real, con especial utilidad en deportes de resistencia como carrera, ciclismo, remo o esquí de fondo.

Tecnologías y *software* para el análisis DFA α -1

Herramientas disponibles y su uso

El análisis de DFA α -1 puede realizarse mediante diferentes herramientas, que abarcan desde *software* especializado hasta aplicaciones móviles y *wearables* compatibles. Cada opción ofrece ventajas particulares y distintos niveles de precisión, lo que condiciona su aplicabilidad en la práctica deportiva.

- ***Software* especializado**



Kubios HRV es uno de los programas más utilizados para el análisis avanzado de VFC, ya que incluye el módulo de DFA. Permite cargar archivos de intervalos R-R en formatos estándar, como .txt o .csv, y ejecutar el análisis en distintas escalas. También existen librerías en *software* libre, como los paquetes disponibles en Python o R, que incorporan la función DFA, aunque requieren un mayor conocimiento técnico para su implementación.

- **Aplicaciones móviles**

Algunas aplicaciones orientadas a la VFC han comenzado a integrar funciones no lineales como la entropía y el DFA. Sin embargo, la precisión puede verse limitada cuando se emplean sensores ópticos de muñeca durante el ejercicio, debido a la calidad variable de la señal. Entre los ejemplos más destacados se encuentran HRV4Training y Elite HRV, que en sus versiones avanzadas han explorado la incorporación de métodos no lineales, aunque su foco principal sigue siendo el RMSSD.

- **Wearables compatibles**

Para obtener un análisis fiable durante el ejercicio, se recomienda utilizar bandas de pecho capaces de registrar los intervalos R-R con alta exactitud, con una frecuencia de muestreo mínima de 1000 Hz. Dispositivos como el Polar H10 o el Garmin HRM-Pro permiten la exportación detallada de datos R-R hacia *software* de terceros. En la actualidad, se están desarrollando soluciones de firmware que calculan alpha-1 en tiempo real e indican en la pantalla del reloj o del teléfono si el deportista se encuentra por encima o por debajo de un determinado umbral de fractalidad.

Integración con wearables y plataformas

El uso de DFA alpha-1 en la práctica deportiva suele seguir un flujo de trabajo relativamente estandarizado. El atleta registra la frecuencia cardíaca durante un test incremental o una sesión de entrenamiento utilizando una banda de pecho de alta precisión. Los datos de intervalos R-R se exportan luego a una aplicación o *software* que incluya el módulo de DFA, donde la sesión se segmenta en ventanas y se calcula alpha-1 para cada intervalo de tiempo o etapa de intensidad. Posteriormente, estos valores se analizan en conjunto con otras variables como la potencia, la velocidad, la concentración de lactato o la frecuencia cardíaca media.

En la aplicación práctica de este método existen algunos desafíos. Uno de ellos son los artefactos en la señal: si se producen errores en la detección de latidos o interferencias debidas al desplazamiento del electrodo, al sudor o a vibraciones intensas, el cálculo de alpha-1 puede verse comprometido. Aunque muchas herramientas incluyen filtros para corregir artefactos, la calidad inicial del registro sigue siendo un factor decisivo. Otro desafío importante es la interpretación en



tiempo real, ya que la mayoría de los procesamientos de DFA todavía se realizan de forma posterior a la sesión. Conseguir una retroalimentación inmediata durante el ejercicio representa una línea de desarrollo en curso.

Pese a estas limitaciones, el método ofrece aplicaciones interesantes en distintos escenarios. En pruebas de campo o de laboratorio resulta especialmente útil para tests incrementales realizados en cinta rodante o en rodillo de ciclismo, donde se dispone de datos de alta calidad. También puede aplicarse en sesiones de intervalos, permitiendo observar cómo evoluciona la dinámica de la VFC tanto durante los esfuerzos como en las pausas. Aunque menos frecuente, la monitorización diaria de alpha-1 también puede aportar información sobre la acumulación de carga y la evolución del estado fisiológico a lo largo de la temporada.

Aplicaciones prácticas en el control del entrenamiento

Optimización de cargas

El análisis de DFA alpha-1 ofrece nuevas posibilidades para ajustar las cargas de entrenamiento y complementar otros indicadores fisiológicos. Su aplicación se orienta principalmente a la determinación de zonas de intensidad, el control de la respuesta al entrenamiento y la gestión de la fatiga y la recuperación.

- **Determinación de zonas de entrenamiento**

Del mismo modo que se emplean parámetros como el lactato, la VFC (RMSSD) o la frecuencia cardíaca umbral, la inflexión en DFA alpha-1 puede servir como referencia para establecer zonas de entrenamiento aeróbicas y anaeróbicas. Por ejemplo, si un ciclista observa que alpha-1 desciende abruptamente a 0.75 en torno a los 200 W, esto podría corresponder a su primera zona de transición, mientras que valores cercanos a 0.5 en 250 W podrían relacionarse con el umbral anaeróbico.

- **Control de la respuesta al entrenamiento**

Durante periodos de alta carga, los deportistas pueden repetir tests submáximos a potencia o velocidad fija y comprobar si el valor de alpha-1 en esa intensidad se mantiene, sube o baja. Un descenso significativo con la misma intensidad podría indicar que esa carga resulta ahora más estresante, lo que refleja un mayor control simpático. Esta información complementa la frecuencia cardíaca y la percepción subjetiva del esfuerzo (RPE), permitiendo afinar la progresión o establecer necesidades de descarga.

- **Gestión de la fatiga y la recuperación**

En línea con la VFC tradicional, se ha propuesto que, en reposo, la monitorización de alpha-1 podría reflejar la complejidad del latido y, en consecuencia, la homeostasis



del sistema. Una reducción sostenida de $\alpha-1$ en reposo sugeriría una menor capacidad adaptativa. Aunque este uso aún no está tan desarrollado como el de la RMSSD, se investiga la combinación de ambos indicadores (RMSSD + $\alpha-1$) para obtener una visión más integral del estado del deportista.

Estudios recientes y tendencias

Entre 2019 y 2023 se publicaron diversos trabajos, en revistas como *Frontiers in Physiology* o *European Journal of Applied Physiology*, que documentaron la correlación entre un punto de quiebre en $\alpha-1$ y el primer umbral ventilatorio o umbral aeróbico (VT1). Aunque los resultados iniciales son prometedores, los propios autores subrayan la necesidad de reunir una mayor cantidad de datos, estandarizar los protocolos y controlar con rigor la presencia de artefactos en la señal para validar plenamente el método.

La mayor parte de la evidencia procede de atletas de resistencia, como corredores, ciclistas y triatletas. Sin embargo, ha surgido un creciente interés en analizar el comportamiento de DFA $\alpha-1$ en deportes de equipo, donde la intensidad es intermitente y se alternan esfuerzos de sprint, pausas activas y cambios bruscos de ritmo. Los primeros reportes sugieren que el parámetro es sensible a las transiciones de intensidad, aunque todavía se requiere más investigación para calibrar su aplicación en contextos de este tipo.

Las líneas de investigación futura exploran varias direcciones. Una de ellas es la retroalimentación en tiempo real, con el desarrollo de algoritmos integrados en relojes deportivos capaces de procesar la señal R-R con alta precisión y mostrar en pantalla si $\alpha-1$ se encuentra por encima o por debajo de un valor de corte asociado a un determinado umbral. Otra línea apunta a los modelos individualizados, que buscan incorporar el historial fisiológico del atleta para predecir con mayor exactitud sus umbrales a partir de $\alpha-1$. Finalmente, se investiga la relación entre la evolución de este parámetro y la adaptación a largo plazo, con preguntas abiertas sobre si puede anticipar la mejora del $VO_{2\text{máx}}$ o del rendimiento en carrera.

Conclusiones

El *detrended fluctuation analysis* (DFA) de la frecuencia cardíaca, y en particular el parámetro $\alpha-1$, ofrece una nueva perspectiva para estudiar la complejidad y la regulación autónoma del ritmo cardíaco durante el ejercicio. Sus fundamentos se apoyan en la teoría del caos y los fractales, lo que aporta un enfoque no lineal que complementa los análisis clásicos de la variabilidad de la frecuencia cardíaca. El descenso de $\alpha-1$ con el aumento de la intensidad del ejercicio sugiere una



pérdida progresiva de complejidad en el control de la frecuencia cardíaca, probablemente asociada al predominio simpático.

Diversos estudios han señalado que un cambio abrupto en $\alpha-1$ podría correlacionarse con el umbral aeróbico o ventilatorio, lo que abre la posibilidad de contar con mediciones menos invasivas para la planificación del entrenamiento. Aunque todavía no es tan accesible como los índices convencionales de variabilidad de la frecuencia cardíaca, ya existen herramientas como Kubios, librerías en Python o R y *wearables* de alta precisión capaces de recoger y procesar los intervalos R-R para calcular este parámetro.

Desde la delimitación de zonas de entrenamiento hasta el control de la fatiga y la optimización de cargas, el DFA $\alpha-1$ se perfila como un recurso prometedor, si bien aún requiere protocolos estandarizados y mejoras en la facilidad de uso para que su aplicación se generalice. En síntesis, este índice emergente tiene un gran potencial para enriquecer la monitorización fisiológica en el deporte, y a medida que se publiquen más investigaciones y se desarrollen soluciones tecnológicas integradas, es previsible que se convierta en un complemento habitual para entrenadores, fisiólogos y deportistas que busquen controlar con mayor precisión su adaptación al entrenamiento.

Resumen de la unidad 2

El DFA $\alpha-1$ se presenta como un método de análisis no lineal de la señal de la frecuencia cardíaca que aporta una medida de cómo varía la complejidad del ritmo cardíaco a lo largo de distintas escalas de tiempo. Su origen en la teoría del caos y los fractales permite comprender mejor las interacciones autonómicas que modulan la frecuencia cardíaca, en especial durante la transición de intensidades de ejercicio moderadas a elevadas. Basado en la teoría de los fractales y la autosimilitud, este enfoque examina la serie temporal de los intervalos R-R para detectar correlaciones de largo alcance y cambios en la irregularidad de la señal.

En términos fisiológicos, a medida que crece la exigencia del ejercicio el sistema se vuelve más rígido, lo que refleja el predominio simpático. Esta pérdida de complejidad en la VFC se traduce en un descenso en el índice $\alpha-1$, un cambio que puede coincidir con los umbrales aeróbicos y anaeróbicos. Aunque no está tan difundido como las métricas clásicas de la VFC, como RMSSD o SDNN, ya existen herramientas de *software* y dispositivos capaces de calcular este índice, sobre todo en el marco de protocolos de test incremental.

Entre sus posibles aplicaciones prácticas se encuentran la determinación de umbrales, la optimización de la intensidad de entrenamiento y el seguimiento de la evolución de la fatiga. Estudios recientes sugieren que existe una correlación con los



umbrales ventilatorios, si bien se requieren más evidencias para establecer guías universales. En síntesis, el DFA alpha-1 constituye un indicador emergente y prometedor de la dinámica autónoma cardíaca en contextos de ejercicio y entrenamiento. Su incorporación podría enriquecer las estrategias de monitorización de la carga interna, aportando una visión más completa de cómo se comporta la señal de la frecuencia cardíaca cuando el organismo se aproxima o supera el límite de la homeostasis aeróbica. A medida que se perfeccionen las técnicas de medición y se amplíe la investigación en distintas poblaciones atléticas, es previsible que este parámetro se consolide como un recurso valioso para entrenadores, profesionales de la salud y especialistas en rendimiento.

Referencias bibliográficas de consulta

Aubert, A. E., Seps, B., & Beckers, F. (2003). Heart rate variability in athletes. *Sports Medicine*, 33(12), 889–919. <https://doi.org/10.2165/00007256-200333120-00003>

Buchheit, M. (2014). Monitoring training status with HR measures: Do all roads lead to Rome? *Frontiers in Physiology*, 5, 73. <https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00073>

Castiglioni, P. (2011). Detrended fluctuation analysis: A scale-free view on heart rate variability. *European Physical Journal Special Topics*, 193(1), 187–204.

Goldberger, A. L., Amaral, L. A. N., Hausdorff, J. M., Ivanov, P. Ch., Peng, C. K., & Stanley, H. E. (2002). Fractal dynamics in physiology: Alterations with disease and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(1), 2466–2472. <https://doi.org/10.1073/pnas.012579499>

Malik, M. (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. *Circulation*, 93(5), 1043–1065. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.93.5.1043>

Mehagnoul-Schipper, D. J., van der Heyden, J. C. G., Colier, W. N. J. M., & Oeseburg, B. (2020). Association between fractal correlation properties of HR and performance in triathletes. *Frontiers in Physiology*, 11, 582.

Peng, C. K., Havlin, S., Stanley, H. E., & Goldberger, A. L. (1995). Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 5(1), 82–87. <https://doi.org/10.1063/1.166141>

Plews, D. J., Laursen, P. B., Stanley, J., Kilding, A. E., & Buchheit, M. (2013). Training adaptation and heart rate variability in elite endurance athletes: Opening the door to



effective monitoring. *Sports Medicine*, 43(9), 773–781.
<https://doi.org/10.1007/s40279-013-0071-8>

Rogers, B., Giles, D., Draper, N., & Epelde, G. (2021). The relationship between fractal correlation properties of heart rate variability and lactate threshold during an incremental step test in runners. *European Journal of Sport Science*, 21(10), 1–8.

Shaffer, F., & Ginsberg, J. P. (2017). An overview of heart rate variability metrics and norms. *Frontiers in Public Health*, 5, 258. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>

Task Force of The European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology, (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. *Circulation*, 93(5), 1043–1065. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.93.5.1043>

Taralov, Z., Terziyski, K., & Kostianev, S. (2015). Heart rate variability in sportsmen. *Trakia Journal of Sciences*, 13(1), 321–324. <https://doi.org/10.15547/tjs.2015.s.01.056>

