

## VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA CARDIACA: CONCEPTO, MEDIDAS Y RELACIÓN CON ASPECTOS CLÍNICOS (I)

### HEART RATE VARIABILITY: DEFINITION, MEASUREMENT AND CLINICAL RELATION ASPECTS (I)

#### CONCEPTO DE VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA CARDIACA (VFC)

La frecuencia cardiaca (FC) es uno de los parámetros no-invasivos más utilizado en el análisis y en la valoración de la actividad cardiaca. En una persona sana, en reposo, los latidos se van produciendo con una frecuencia variable, es decir, el tiempo (en milisegundos) entre dos latidos va variando latido a latido. Este aspecto representa el concepto de variabilidad de la frecuencia cardiaca -VFC- (HRV, *Heart Rate Variability*), que se define como la variación de la frecuencia del latido cardiaco durante un intervalo de tiempo definido con anterioridad (nunca superior a 24 horas) en un análisis de periodos circadianos consecutivos<sup>1</sup>. La manera habitual de medir esta variabilidad es a partir del electrocardiograma (ECG), donde se detecta cada una de las ondas R y se calcula el tiempo entre las diferentes ondas R consecutivas o intervalo RR. Este intervalo RR mide el período cardiaco y la función inversa mide la FC. La serie de intervalos RR es lo que llamamos VFC (Figura 1).

La VFC es el resultado de las interacciones entre el Sistema nervioso autónomo -SNA- (con su equilibrio simpático-vagal) y el sistema cardiovascular<sup>2</sup>. El análisis adecuado de este parámetro permite el estudio de la actividad del SNA de manera no-invasiva (lo cual es especialmente importante en el ámbito de la medicina deportiva). La actividad del SNA se basa en un equilibrio entre el sistema nervioso simpático (SNS) y el sistema nervioso parasimpático (SNP). En un estado de reposo predomina la estimulación vagal (SNP), mientras que en estados de ansiedad, stress y ejercicio físico predomina la estimulación del SNS:

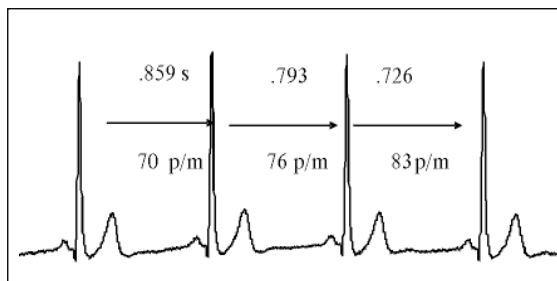


FIGURA 1. Variación de la Frecuencia Cardiaca (FC) latido a latido. A partir del ECG, se calcula el intervalo entre picos R-R y se expresa la VFC en segundos (s) y la FC en latidos por minuto (p/m)

\*Este trabajo ha sido realizado gracias a los proyectos de I+D SEJ2005-05113 y DEP2006-56125-C03/PREV concedidos por el Ministerio de Educación y Ciencia, y al proyecto SGR2005-00318 reconocido por la Generalitat de Catalunya.

#### CORRESPONDENCIA:

Gil Roldas. Avda. Aristides Maillol s/n 08028 Barcelona  
E-mail: gil.rodas@fcbarcelona.cat

Aceptado: 01-02-2007/ Revisión n.º 202

Gil Roldas<sup>1</sup>

Carles Pedret  
Carballido<sup>2</sup>

Juan Ramos<sup>3</sup>

Lluís Capdevila<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Servicios Médicos F.C. Barcelona  
<sup>2</sup>Servicios Médicos Real Federación Española de Hockey Hierba  
<sup>3</sup>Escola Medicina de l'Esport Universitat de Barcelona Unitat Medicina Esport Hospital Comarcal Sant Antoni Abad (Vilanova i la Geltrú)  
<sup>4</sup>Mútua Activa  
<sup>3</sup>Dpto. de Ingeniería Electrónica Universidad Politécnica de Catalunya  
<sup>4</sup>Laboratorio de Psicología del Deporte Universidad Autónoma de Barcelona

- El SNP se encarga de realizar una rápida disminución de la FC por impulsos eléctricos vagales de alta frecuencia. Este proceso viene dado por la liberación de acetilcolina por parte del nervio vago. Algunos de sus efectos son la contracción pupilar, la disminución de la FC y de la contractilidad cardíaca, el aumento de la motilidad y de la secreción del tracto gastrointestinal, el aumento de la secreción de insulina, el aumento de la secreción bronquial y la relajación de los esfínteres vesical y anal entre otras funciones. Básicamente, el SNP gestiona los cambios reflejos de la FC debidos a señales procedentes de los barorreceptores arteriales y del sistema respiratorio.
- El SNS aumenta la FC mediante impulsos lentos de baja frecuencia. La respuesta es más lenta que la del SNP (necesita 20-30 latidos para producirse). Este proceso está basado en la liberación de adrenalina y de noradrenalina. Entre sus efectos principales se encuentran la dilatación pupilar, el aumento de la frecuencia y de la contractilidad cardíaca, la vasoconstricción, el aumento de lipólisis, el aumento de gluconeogénesis y glicogenólisis, la disminución de la motilidad y de la secreción del tracto gastrointestinal, la contracción de los esfínteres y el aumento de la sudoración. El SNS es el responsable de los cambios en la FC debidos a stress físico y mental<sup>1,3</sup>.

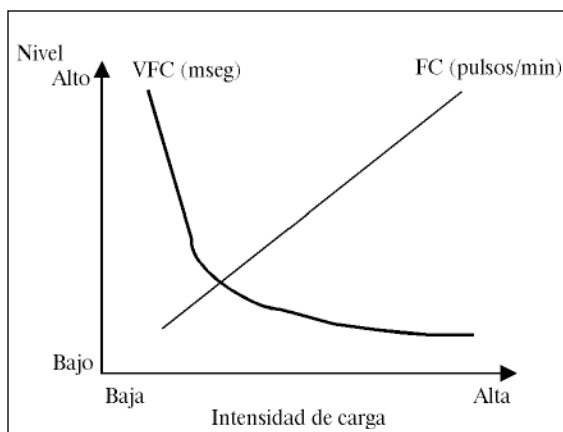
La relación entre la FC y la VFC respecto a la intensidad y la carga de trabajo es inversamente proporcional; es decir, cuanto más aumentan la FC y la carga de trabajo, más disminuye la VFC (esta disminución es especialmente pronunciada en los primeros momentos del esfuerzo físico) (Figura 2).

Hay muchos y variados factores que pueden influir en el análisis de la VFC. Por ejemplo, puede influir el propio sistema nervioso central con determinados procesos mentales y emociones, el sistema termorregulador, el sistema respiratorio, el sistema barorreceptor y el sistema renina-angiotensina-aldosterona. Además de todos los citados hay que tener también en cuenta los factores que afectan reconocidamente a la FC en sí misma, como pueden ser la edad (la FC aumenta con la edad), el género (en general, la FC es mayor en las mujeres), la posición del cuerpo (la FC es menor en posición supina), la hora del día (la FC es más alta a primeras horas de la mañana), la temperatura, la ingesta de alcohol, de cafeína o de medicaciones diversas (atropina, beta bloqueantes, fenilefrina...), el consumo de tabaco, la condición física de resistencia, el stress y la actividad muscular, entre otros<sup>4,5</sup>.

La determinación adecuada del equilibrio del SNA, principalmente mediante la VFC y en menor parte por la sensibilidad barorrefleja y quimiorrefleja, nos puede aportar información muy útil y valiosa tanto en personas enfermas como en personas sanas.

- En personas enfermas nos puede aportar información de su pronóstico, patogénesis y estrategias de tratamiento en los casos de patología cardiovascular<sup>6</sup>, progreso de la diabetes mellitus<sup>7</sup>, control del estado de fibromialgia<sup>8</sup> y síndrome de fatiga crónica<sup>9</sup>.
- En personas sanas nos puede aportar información acerca de estados de adaptación al estrés físico<sup>10</sup> y psíquico<sup>11</sup>, y concretamente en el deportista de la adaptabilidad al entrenamiento, o a la competición, pudiendo ser un buen marcador predictivo de estados de sobreentrenamiento<sup>12,13</sup>.

**FIGURA 2.**  
Relación de la frecuencia cardíaca (FC) y de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) con la intensidad de la carga de trabajo  
(Fuente: 1)



Así pues, la VFC es un valor para la medición de la actividad neurovegetativa y de la función del SNA que describe la capacidad del organismo (en especial del aparato cardiovascular) para cambiar el intervalo temporal latido a latido, dependiendo de la intensidad de carga de trabajo, para poder adaptarse a las demandas cambiantes tanto externas como internas.

## MÉTODOS DE MEDIDA DE LA VARIABILIDAD DE FRECUENCIA CARDIACA

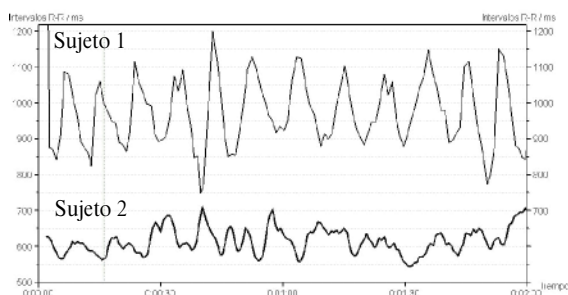
La VFC como método no-invasivo para evaluar la regulación autonómica de la FC se empezó a utilizar con finalidades diagnósticas en 1965 (Hon y Lee, 1965)<sup>14</sup> pero no fue aplicada en el ámbito de la medicina deportiva hasta 1996, que fue cuando aparecieron los primeros aparatos portátiles de registro de la FC que permitieron realizar mediciones de campo con la fiabilidad y calidad de los electrocardiógrafos de laboratorio<sup>1</sup>. En la actualidad se dispone de varios métodos para la medida de la VFC y de sus diferentes parámetros:

- Condiciones de laboratorio: se realizan medidas durante un corto periodo de tiempo (2 – 5 minutos) antes y después de poner a prueba el sistema nervioso autónomo mediante fármacos, ejerciendo control de la ventilación (señalización de la frecuencia respiratoria con metrónomo) y/o mediante diferentes tipos de tests ortostáticos<sup>15</sup>.
- Electrocardiograma de 24 horas: generalmente mediante un registro Holter, se mide toda la actividad cardiaca mientras el sujeto estudiado realiza todas sus actividades habituales. Esta medida se utiliza básicamente para valorar el riesgo de enfermedades concretas (cardiovasculares, diabetes mellitus, fibromialgia, síndrome de fatiga crónica...), aunque también puede resultar útil para la valoración de disfunciones del SNA<sup>2,3</sup>.
- Durante el ejercicio físico: con la aparición y perfeccionamiento de los aparatos portátiles

inalámbricos POLAR se tiene la opción de medir de manera válida y fiable la VFC mediante el registro de los intervalos RR mientras el sujeto en estudio realiza cualquier actividad, incluido el ejercicio físico<sup>3</sup>.

Normalmente, una vez recogida la secuencia electrocardiográfica con alguno de los métodos especificados, se traspasan los datos a un sistema de software que realiza una selección de los intervalos RR normales, eliminando los RR detectados en latidos anormales y, a veces, con la posibilidad de detectar y corregir errores de registro. Posteriormente el sistema remuestra la serie RR de intervalos irregulares a instantes de tiempo regulares mediante un algoritmo de interpolación lineal. A partir de estas mediciones se calculan los diferentes parámetros de la VFC, en función del tiempo o de la frecuencia, tal como se explicará posteriormente<sup>16</sup>. Habitualmente, la forma más fácil, rápida y simple de representar gráficamente la VFC es mediante tacogramas, donde el eje vertical representa los intervalos RR (en milisegundos) y el eje horizontal representa el tiempo transcurrido (Figura 3).

Como se expondrá más adelante, hay diversas maneras de procesar los datos que se obtienen de la medida electrocardiográfica de la VFC. Quizás se proponen muchos parámetros para analizar y valorar, y se ofrece relativamente poca información acerca de la relación directa de todos estos parámetros con diagnósticos claros y con situaciones clínicas o clínico-deportivas concretas. No obstante, se conoce relativamente bien la relación entre los diferentes parámetros de estudio de la VFC<sup>2</sup>.



**FIGURA 3.** Ejemplo de tacogramas que representan la VFC a partir de intervalos RR consecutivos del latido cardiaco (milisegundos de tiempo entre latidos cardiacos consecutivos), para dos sujetos en reposo. (Fuente: 1)

## PRINCIPALES PARÁMETROS ESTUDIADOS

Existen diferentes métodos para analizar la VFC, que permiten obtener múltiples y variados parámetros. Actualmente, los métodos más utilizados son los que se basan en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia, las medidas geométricas de los intervalos RR y las variables no-lineales, entre las que se encuentran el *Heart rate turbulence*, el *power law slope* y el *Poincaré plot*<sup>2,3</sup>.

### Parámetros del dominio temporal

Definimos las variables de tiempo como los diferentes parámetros estadísticos que resultan de la medición electrocardiográfica de los intervalos RR normales. Estos intervalos RR normales son analizados estadística y matemáticamente para obtener los distintos parámetros. Entre estos, los más utilizados y fáciles de calcular, y los que más información nos pueden aportar, son los siguientes:

- RRSD: Es la desviación estándar de todos los intervalos RR del periodo medido. Es un indicador independiente de las frecuencias para definir el concepto de la variabilidad total. De todas maneras, hay que tener en cuenta el valor de la FC para evitar evaluaciones erróneas de esta variabilidad (si es limitada o no).

- RMSSD: Es la raíz cuadrada del valor medio de la suma de las diferencias al cuadrado de todos los intervalos RR sucesivos. Este parámetro informa de las variaciones a corto plazo de los intervalos RR y se utiliza para observar la influencia del Sistema nervioso Parasimpático (SNP) sobre el sistema cardiovascular. Se asocia directamente a la variabilidad a corto plazo.
- pNN50: Porcentaje de los intervalos RR consecutivos que discrepan en más de 50 ms. entre sí. Un valor elevado de pNN50 nos proporciona valiosa información acerca de variaciones altas espontáneas de la FC.
- SDANN: Desviación estándar de los periodos NN (o RR) con una media de medida de 5 min.
- ASDNN (índice): Índice de las desviaciones estándar de todas las medidas de los intervalos RR de 5 min. a lo largo de 24 horas.

Los valores comentados anteriormente son, posiblemente, los parámetros más utilizados correspondientes al dominio temporal. Los demás parámetros representados en la Tabla 1 son variantes estadísticas que están altamente relacionadas entre sí. La representación gráfica

**TABLA 1.**  
Parámetros de análisis de la VFC en la dimensión temporal, mediante los valores en milisegundos entre intervalos consecutivos de los latidos cardiacos, útiles en periodos de registro cortos (5 minutos o menos).  
(<sup>1</sup>La abreviación RR puede llevar al equívoco, porque también se utiliza para la tensión arterial. Por este motivo a menudo se suele utilizar la expresión "R-R" o "NN" (normal a normal) para el intervalo entre dos latidos)

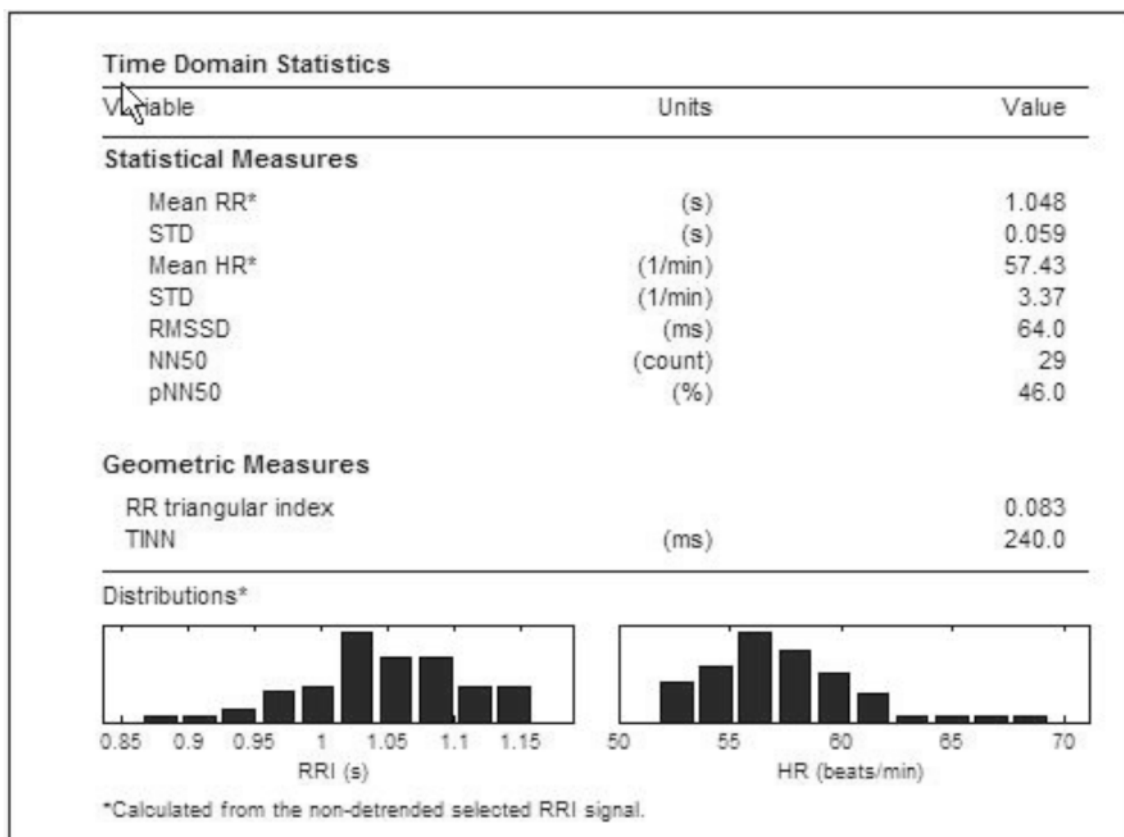
Parámetro	Otras nomenclaturas	Unidad	Definición
RR <sup>1</sup>	NN	ms	Intervalo entre dos latidos (picos de R en el ECG).
AvRR	RRmw	ms	Duración media de todos los intervalos RR.
RRSD	SD, SDR	ms	Desviación Estándar de todos los intervalos RR. Se conoce como Variabilidad Total.
RMSSD	r-MSSD ó rMSSD	ms	Raíz cuadrada de la media de la suma de las diferencias al cuadrado de todos los intervalos RR.
SDSD	ΔRRSD	ms	Desviación estándar de la diferencia entre intervalos RR consecutivos.
pNN50		%	Porcentaje de intervalos RR consecutivos, que discrepan más de 50 ms entre sí.
DL		ms	Longitud del diámetro longitudinal del 95% de la elipse de confianza.
DQ	DW	ms	Longitud del diámetro transversal del 95% de la elipse de confianza.
SD1	Stdb, SOQ, SD Transversal	ms	Desviación estándar de los intervalos ortogonales de los puntos RR <sub>i</sub> , RR <sub>i</sub> +a al diámetro transversal de la elipse.
SD2	Stda, SOL, SD Longitudinal		Desviación estándar de los intervalos ortogonales de los puntos RR <sub>i</sub> , RR <sub>i</sub> +a al diámetro longitudinal de la elipse.

en el dominio temporal, como se ha explicado anteriormente, se realiza mediante tacogramas, y estos a la vez se pueden representar como histogramas (representación que nos muestra la frecuencia de intervalos de diferente duración). En la Figura 4 se muestra una representación gráfica mediante histogramas de distribución de los intervalos RR y de la frecuencia cardiaca (HR) a modo de ejemplo.

Los parámetros obtenidos en el dominio del tiempo se ven influenciados por cambios en la actividad del SNS y del SNP, circunstancia que hace que estas medidas no sean específicas para calcular de manera concreta el equilibrio simpático-vagal. Son parámetros útiles para detectar anomalías de la actividad del Sistema Nervioso Autónomo pero no se pueden utilizar para cuantificar cambios específicos de la actividad del SNS y SNP<sup>17-20</sup>. Por otro lado, el hecho de

que los valores temporales sean inversamente proporcionales a la fracción de eyección cardiaca provoca que el valor predictivo que poseen sea más complicado de valorar de lo que a primera vista parece, ya que en esta valoración se deben tener en cuenta los mecanismos neurales y no-neurales<sup>21</sup>.

La actividad del SNP sobre los parámetros de tiempo se observa debido a que la VFC disminuye cuando disminuye la actividad vagal. En cambio, los efectos opuestos de la actividad del SNS son más complicados de observar y de objetivar, ya que hay que tener en cuenta efectos que los influyen de manera directa, como puede ser una bradicardia, la acción de algunos neurotransmisores (noradrenalina...), y el efecto de la ventilación entre otros. Hay que destacar que varios de los estudios realizados hasta el momento consideran que las variables de tiempo deberían



**FIGURA 4.** Ejemplo de resultados del análisis de la VFC en el dominio del tiempo para un registro de 5 minutos. Se muestran los parámetros estadísticos estándar (statistical measures), los índices geométricos (geometric measures) y la representación gráfica mediante histogramas de distribución de los intervalos RR y de la frecuencia cardiaca (HR) (Software HRV Analysis, Universidad de Kuopio, Finlandia)

tener un importante papel en la estratificación del riesgo de morbi-mortalidad, especialmente en pacientes cardiovasculares<sup>22,23</sup>.

### Parámetros del dominio frecuencial (espectro de frecuencias)

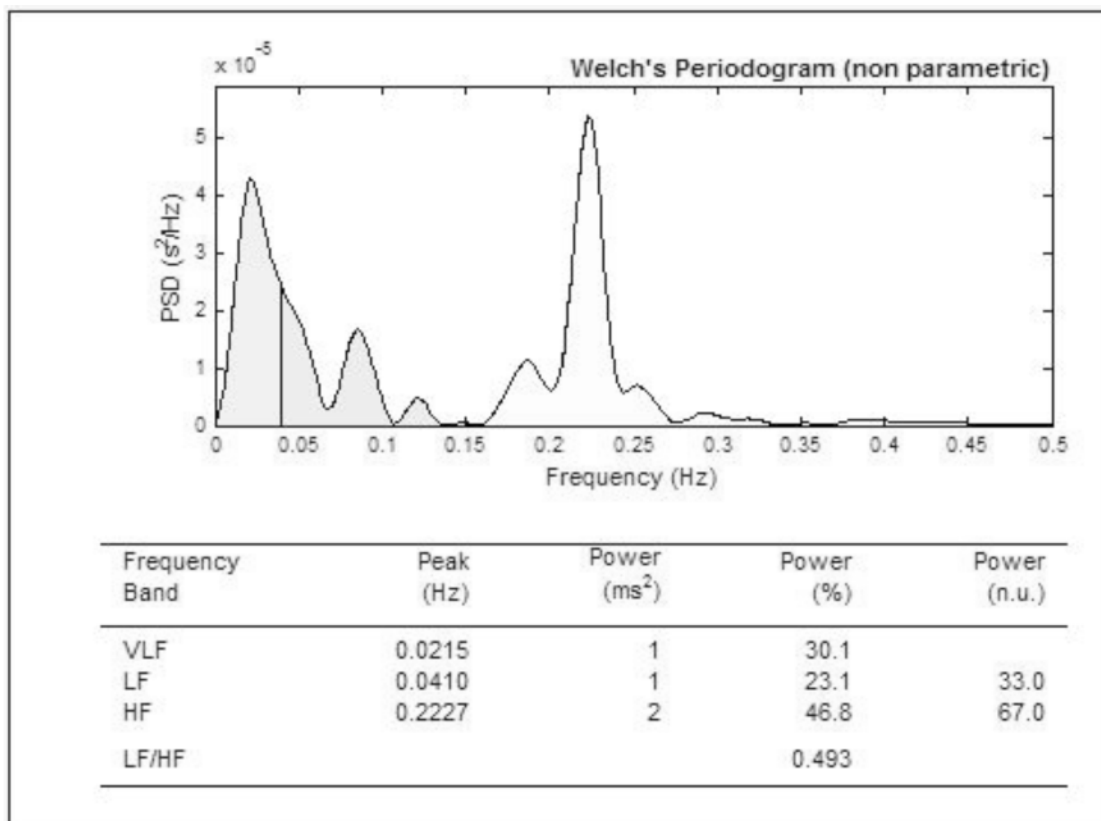
La medida del espectro de frecuencias de la VFC se obtiene a partir de una transformación matemática, habitualmente la Transformada de Fourier, aunque existen otros métodos, que permite descomponer la energía (potencia) de la señal RR en diferentes componentes frecuenciales. Estos diversos componentes espectrales se correlacionan con los diferentes componentes del sistema nervioso autónomo. De esta forma, la mayor parte de la potencia de la señal se encuentra en un margen de 0 a 0,4 Hz y se clasifica de la siguiente manera:

- TP (total power): Potencia total. Este parámetro se considera el espectro general. Es la varianza de todas las componentes de los intervalos RR inferiores a 0,4 Hz.
- ULF (ultra low frequency): Abarca el rango de frecuencias inferiores a 0,003 Hz. Son más visibles en periodos largos de medida (24 horas) y se han asociado de manera muy significativa con el parámetro SDANN de la variable de tiempo.
- VLF (muy baja frecuencia): En este rango de frecuencias (0,003 a 0,04 Hz) muy bajas muestran las influencias hormonales, vasomotoras y termoreguladoras y también la influencia del sistema renina-angiotensina-aldosterona.
- LF (baja frecuencia): Situada entre 0,04 y 0,15 Hz. Es la zona más controvertida en su interpretación ya que puede atribuirse a influencias del SNS y/o a las del SNP. De todas maneras, según diferentes estudios, parece ser que en registros a largo plazo nos proporciona más información sobre la actividad del SNS. Las influencias del SNP se dan cuando existe una frecuencia respiratoria baja (inferior a 7 ciclos/min.). También se considera

una zona representativa de la actividad baroreceptora (el circuito baroreceptor tiene una frecuencia aproximada de 0,1 Hz.).

- HF (alta frecuencia): Se encuentran situadas entre 0,15 y 0,4 Hz. La HF está claramente relacionada con la actividad del SNP y tiene un efecto relacionado con la relajación sobre la FC<sup>24,25</sup>. La frecuencia respiratoria también juega un papel importante en la influencia sobre este espectro de frecuencia (como se expondrá posteriormente, la frecuencia respiratoria afecta de manera significativa las medidas de la VFC). Cuando cambia la frecuencia respiratoria de manera destacable también cambia el pico de HF, esto demuestra hasta qué punto es importante la influencia de la frecuencia respiratoria. El pico de HF se anula con la administración de atropina<sup>2,4</sup>.
- Proporción LF/HF: De esta proporción entre las bajas frecuencias y las altas del resultado del análisis espectral de la VFC se puede estimar la influencia vagal (relacionada con la relajación y las HF) y la simpática (relacionada con el stress y las LF). Así podemos estimar el equilibrio simpático-vagal<sup>25</sup>. Según los resultados publicados por un gran número de estudios (citados anteriormente), si predomina la influencia de SNS de manera permanente, puede ser causa de trastornos de salud, depresiones, sobreentrenamiento o lesiones musculares en el caso de los deportistas, y puede perjudicar en general el equilibrio biofísico de la persona. En este caso, encontraríamos que la VFC está disminuida. Una VFC alta parece ser un indicador de buena salud, de menor morbi-mortalidad si hablamos de un estado post-enfermedad, o de correcta tolerancia a las cargas de trabajo y a los entrenamientos en el caso de los deportistas. Debido a la controversia en la interpretación de las LF de forma aislada, se utiliza la proporción LF/HF para estimar de manera más efectiva la actividad del SNS.

El análisis del espectro de frecuencias se suele realizar en medidas electrocardiográficas de



**FIGURA 5.** Ejemplo de resultados del análisis de la VFC en el dominio de la frecuencia para el mismo registro de 5 minutos de la Figura 4. Se muestran los parámetros estándar del análisis espectral y su representación gráfica (Software HRV Analysis, Universidad de Kuopio, Finlandia)

cortos periodos de tiempo (aproximadamente 5 min. o equivalentes de 2 min.) donde se analizan los picos de las diferentes frecuencias que se observan (obviamente también se pueden realizar análisis frecuenciales en periodos más largos de hasta 24h.). El test completo se realiza con el sujeto en decúbito supino y posteriormente se valora la evolución del espectro frecuencial y de los diferentes parámetros cuando se pasa de la po-

sición en decúbito a la de semi-incorporado o de pie. Por regla general, el hecho de ponerse de pie o de semi-incorporarse implica un aumento del valor de LF (considerado mediado por el SNS) y una disminución del valor de HF (mediado por el SNP)<sup>26-29</sup>. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de los resultados del análisis de la VFC en el dominio de la frecuencia para el mismo registro de 5 minutos de la Figura 4.

*La bibliografía se encuentra en la segunda parte del artículo*