

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**

*Departament d'Enginyeria Electrònica*

**ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD DEL  
RITMO CARDÍACO MEDIANTE  
TÉCNICAS ESTADÍSTICAS,  
ESPECTRALES Y NO LINEALES**

Autor: Miguel Ángel García González  
Director: Ramon Pallàs Areny

Febrero de 1998

## **CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES**

*“Una vez terminado el juego, el rey y el peón vuelven a la misma caja”*  
Proverbio italiano

## **8 Conclusiones**

Atendiendo los objetivos de la tesis, se han criticado y mejorado ciertos aspectos de la metodología de análisis de la variabilidad del ritmo cardíaco, en particular, los métodos estadísticos y espectrales. Asimismo se han realizado aportaciones que ponen de relieve la interacción entre el sistema cardiovascular y el resto de sistemas, en especial los sistemas respiratorios y renina-angiotensina.

A continuación se presentan por capítulos las principales conclusiones de la tesis así como aquellas observaciones extraídas de la medida en sujetos sanos.

### **8.1 Métodos estadísticos**

Tras presentar el conjunto de índices empleados se ha observado la gran disparidad de definiciones que es consecuencia de una falta de estandarización. A grandes trazos, los índices estadísticos se pueden clasificar en dos categorías en función de la variables que se desea cuantificar, a saber:

- Índices que estiman la anchura del histograma de la secuencia RR.
- Índices que estiman la anchura del histograma de las diferencias absolutas de la secuencia RR.

Mientras los primeros reflejan la variabilidad del ritmo cardíaco debida a todas las causas que lo modulan, los segundos son más selectivos y dan información del nivel de excitación vagal producido por reflejos rápidos (por ejemplo, mediados por los barorreceptores). No obstante, estos últimos índices no evalúan completamente el nivel de excitación vagal.

Otra posible clasificación de los índices atiende a la duración del registro. Podemos hablar de índices para maniobras o de índices para registros de larga duración. Mientras que en los primeros hay un claro predominio del empleo de los máximos y mínimos de la secuencia, los segundos emplean herramientas más robustas a artefactos aunque son susceptibles de ser mejorados.

Se ha observado que la desviación estándar está bien correlada con la mayoría de índices utilizados para la cuantificación de la variabilidad del ritmo cardíaco en maniobras. Se podría proponer, por lo tanto, como índice estándar para la estimación de la anchura del histograma de la secuencia RR ya que es un índice de uso muy extendido en muchas y diversas disciplinas. Además, es un buen índice para la predicción de muerte cardíaca súbita en pacientes post-infarto y para la diagnosis de neuropatía en diabéticos. No obstante, la desviación estándar es un índice muy sensible a artefactos. En varios trabajos de la bibliografía se han propuesto diversos índices robustos a artefactos para estimar la anchura del histograma de la secuencia RR pero el grado de correlación con la desviación estándar en ausencia de artefactos es reducido y su nivel predictivo o de diagnosis es inferior. Por lo tanto, interesa tener un índice que esté bien correlado con la desviación estándar en ausencia de artefactos y, por otro lado, sea robusto frente a artefactos. Hemos propuesto el índice MIRR (margen intercuartil de la

secuencia RR). El MIRR es un índice de cálculo rápido y hemos demostrado que es muy robusto frente a artefactos y tiene una alta correlación con la desviación estándar.

Otro índice muy utilizado para caracterizar la anchura del histograma de la secuencia RR es el  $HRV_{index}$ . Se definió para intentar eliminar el efecto de la presencia de artefactos en el registro. No obstante, dicho índice es función de la frecuencia de muestreo del ECG y no tiene una correlación alta con la desviación estándar. Como solución al primer problema se sugiere normalizar la secuencia RR a una resolución temporal de 10 ms.

Uno de los índices más utilizados para estimar la anchura del histograma de las diferencias absolutas de la secuencia RR es el índice pNN50. Dicho índice es muy robusto frente a artefactos. No obstante, presenta problemas de saturación para bajas y altas variabilidades latido a latido del ritmo cardíaco. Para solucionar este problema hemos propuesto el índice MDARR (mediana de las diferencias absolutas del índice RR). El MDARR es también un índice de cálculo rápido y hemos demostrado que es muy robusto frente a artefactos, con alta correlación con el pNN50 y no presenta limitaciones de saturación.

Por lo tanto, si se desea cuantificar la variabilidad del ritmo cardíaco debido a todas las causas que lo modulan se sugiere emplear el índice MIRR. Si se desea estimar el nivel de excitación vagal se sugiere emplear el índice MDARR.

## 8.2 Métodos espectrales

Se han mostrado las ventajas y limitaciones de los métodos espectrales con la intención de plantear una metodología para el procesado de series RR.

De acuerdo con la bibliografía, los métodos espectrales son una buena herramienta para investigar con mayor detalle las causas que originan la variabilidad del ritmo cardíaco. Tras revisar los diversos métodos para la caracterización espectral de la variabilidad del ritmo cardíaco se ha optado por el empleo de los métodos autorregresivos debido a la naturaleza casi aleatoria de la señal RR. Se ha escogido como orden del modelo aquel dictado por el criterio de la información de Akaike.

Se ha estudiado la influencia del remuestreo de la señal RR sobre la estimación espectral y se ha observado que sólo es necesario cuando se desea analizar la influencia de un oscilador exógeno y se produce un cambio en el ritmo medio que es superior a la amplitud del oscilador. Hemos demostrado que el remuestreo es contraproducente cuando se desea analizar un oscilador endógeno de gran amplitud.

Para realizar una estimación espectral fiable, se requiere que la serie RR sea estacionaria. Se ha comprobado que los tests de estacionariedad son poco fiables y se recomienda acompañarlos con una inspección visual de la señal.

La presencia de artefactos en la serie RR produce grandes errores en la estimación de los índices espectrales. Hemos propuesto la señal DRR como alternativa. El análisis espectral de la señal DRR produce unos índices espectrales de alta

correlación con los que se obtienen en la serie RR en ausencia de artefactos. Si hay artefactos, el análisis mediante la señal DRR es mucho más robusto.

Por otro lado, hemos demostrado que la variabilidad de la frecuencia de los osciladores que modulan la variabilidad del ritmo cardíaco puede ser una causa de sobrestimación de la potencia en las bandas de baja frecuencia y de muy baja frecuencia. Si no se posee una medida sobre el oscilador, se debe recurrir a métodos espectro-temporales para cuantificar este efecto. Recuérdese que una sobrestimación de la banda de baja frecuencia produce índices LF/HF elevados que pueden llevar a una diagnosis o pronosis incorrecta.

Para realizar el análisis espectral de la secuencia RR se sugieren los siguientes pasos. Si la señal es estacionaria se puede realizar el análisis espectral. En caso contrario se realiza el análisis espectro-temporal. Sólo si se está interesado en una fuente exógena y la variabilidad del ritmo medio es elevada, se realiza un remuestreo. Si hay riesgo de artefactos (en monitorización ambulatoria, por ejemplo) se analiza la señal DRR. Tras realizar la estimación espectral mediante modelos autorregresivos se cuantifican las bandas según los límites escogidos por el usuario. Recuérdese que el análisis espectro-temporal puede ser útil en la detección de la modulación de los osciladores.

### **8.3 Métodos espectro-temporales**

La no estacionariedad de la serie RR o la variación de la frecuencia de los osciladores con el tiempo puede provocar un falso diagnóstico mediante índices espectrales. Los métodos espectro-temporales ponen de manifiesto estos defectos. El análisis espectro-temporal puede ser empleado también como marcador de eventos: un cambio súbito en la frecuencia de uno de los osciladores indica el inicio de un nuevo estado de regulación cardiovascular.

Si se únicamente comprobar la estabilidad de la frecuencia de los osciladores respecto al tiempo, un análisis espectral variante con el tiempo empleando métodos autorregresivos puede ser suficiente. No obstante, la determinación de la potencia de estos osciladores con estos métodos es muy grosera con lo cual son inútiles para una cuantificación.

Las representaciones tiempo-frecuencia permiten realizar las mismas comprobaciones que los métodos espectrales variantes con el tiempo además de aportar una determinación de la potencia de los osciladores muy exacta. En cambio, el tiempo de computación con estos métodos es mayor. La representación SPWVD y el espectrograma han mostrado ser muy eficaces en el análisis de la variabilidad del ritmo cardíaco.

El empleo de ondículas es útil para el seguimiento de la variación de frecuencia de los osciladores pero además permite determinar la presencia y variación de frecuencias muy lentas, lo cual es una clara ventaja respecto a las representaciones tiempo-frecuencia. Además, pueden ser empleadas para la detección de ondas características en la serie RR. No obstante, la estimación de la potencia espectral deja mucho que desear.

## **8.4 Análisis de la dinámica no lineal**

El análisis de la secuencia RR desde un punto de vista de dinámica no lineal puede complementar la información aportada por los métodos clásicos (estadísticos y espectrales).

El empleo del biespectro muestra que la no linealidad en la secuencia RR está presente casi siempre aunque el grado de no linealidad depende del sujeto y de la situación fisiológica. Dicha no linealidad es muy elevada en casos de sueño profundo. Por otro lado, se ha hallado que a mayor no linealidad en la función de transferencia entre la respiración y la arritmia sinorrespiratoria corresponde un menor grado de variación en el espectro de la secuencia RR asociado a la forma de respirar.

Respecto al análisis de complejidad se ha hallado que la complejidad de la señal es mayor en casos de alta arritmia sinorrespiratoria y en sueño profundo. En cambio, durante la ejecución de ejercicio la complejidad de la señal es baja.

## **8.5 Análisis de registros de corta duración**

Se ha medido la variabilidad del ritmo cardíaco en ocho sujetos para evaluar la arritmia sinorrespiratoria. Las conclusiones obtenidas son las siguientes. Respecto a los índices estadísticos, hay una relación directa entre la desviación estándar (variabilidad total) y el índice pNN50 (variabilidad asociada a la actividad vagal) debido a que precisamente es la arritmia sinorrespiratoria la fuente principal de la variabilidad del ritmo cardíaco en pruebas controladas. El índice LF/HF presenta un mínimo en casos de respiración periódica mientras que la potencia de la banda de muy baja frecuencia presenta un máximo en casos de respiración libre. En baterías de pruebas este factor puede ser determinante en una mala diagnosis. La potencia de la arritmia sinorrespiratoria es máxima durante respiración periódica y mínima durante respiración libre. La arritmia sinorrespiratoria está modulada en amplitud en mayor grado durante respiración sincronizada. A mayor no linealidad se obtiene menor dependencia del índice LF/HF respecto a la forma de respirar. La relación entre el sistema respiratorio y el sistema cardiovascular es fuertemente no lineal.

Respecto a medidas realizadas durante la ejecución de ejercicio, se concluye que la variabilidad del ritmo cardíaco parece dominada por una fuerte descarga simpática (aceleración del ritmo cardíaco) que aparece en forma de ritmos de baja y muy baja frecuencia. Así mismo, la variabilidad total y la estimulación vagal disminuyen conforme se acelera el ritmo cardíaco. Además, se ha hallado que en sujetos con recuperación rápida la estimulación vagal es muy elevada mientras que en sujetos con recuperación lenta la variabilidad total es menor que en el período de reposo previo a la realización de ejercicio.

En medidas realizadas en simulación de microgravedad se ha obtenido que la medida conjunta de la variabilidad del ritmo cardíaco y de la variación de impedancia en diferentes segmentos corporales puede ser utilizada para el estudio de la regulación de fluidos asociada a cambios posturales. En ambas medidas aparecen oscilaciones comunes que podrían ser debidas a la regulación ejercida por el RAS. La mejor medida de impedancias para estudiar el efecto de la variación de impedancias sobre el sistema

cardiovascular parece ser la de las extremidades inferiores ya que se ha demostrado que el efecto del submuestreo de la respiración es mínimo en estos segmentos. El ritmo cardíaco disminuye en la mayoría de sujetos durante pruebas de microgravedad.

Respecto a las medidas realizadas en cerdos para la evaluación del reflejo producido por la angioplastia, se concluye que el reflejo provocado por la oclusión se observa en el índice MIRR como un descenso de éste seguido por un aumento al concluir la oclusión. No queda claro el efecto de la oclusión sobre el índice MDARR debido, probablemente, a la disparidad en las dosis de hexametonio y atropina. No obstante, la característica más común es un aumento del índice durante la oclusión. La oclusión provoca un descenso del índice LF/HF seguido de un aumento de éste al concluir aquella. Consecuentemente, la oclusión provoca un descenso del índice PLF (%) y un aumento del índice PHF (%) seguido de un aumento del índice PLF (%) y un descenso del índice PHF (%) al terminar la oclusión. La inyección de hexametonio provoca un aumento del índice MIRR y un descenso del índice MDARR. La inyección de hexametonio provoca una transición del índice LF/HF hacia un estado estable inferior a 0,5 y de baja variabilidad y provoca oscilaciones en los índices PLF(%) y PHF(%) con períodos del orden de cinco minutos. Por lo tanto, el reflejo producido por la oclusión depende de la presencia de hexametonio y atropina. Así pues, puede deducirse que está mediado por el sistema nervioso autónomo. El reflejo provocado por la oclusión viene dado por un aumento de la actividad vagal acompañado de una disminución de la actividad simpática durante la oclusión, seguido de un aumento de la actividad simpática acompañada de una disminución de la actividad parasimpática.

## **8.6 Análisis de registros ambulatorios de 24 horas**

Se ha investigado la presencia de variaciones comunes a lo largo de un día entero en seis sujetos sanos. Se ha cuantificado la señal en distintos dominios y se ha llegado a las siguientes conclusiones. Se obtiene un menor ritmo cardíaco, una mayor variabilidad total de la señal y mayor excitación vagal durante los períodos nocturnos que durante los diurnos. La reducción en el ritmo cardíaco asociada al período nocturno es debida principalmente a un aumento de la excitación vagal y no a un descenso de la excitación simpática. La banda LF es la dominante, en media, en registros ambulatorios. La señal RR es más no lineal y presenta mayor complejidad durante los períodos nocturnos. Parece ser, por tanto, que existe una clara correlación entre la excitación vagal, la no linealidad de la señal y su complejidad.

Por lo tanto, se puede concluir que el análisis de la variabilidad del ritmo cardíaco es útil para poner de manifiesto la interacción del sistema cardiovascular con otros sistemas fisiológicos. No obstante el procesado requerido para un correcto análisis es función de la aplicación deseada y requiere una estandarización. En la presente tesis se han presentado limitaciones y mejoras en los distintos métodos de procesado de la serie RR, también se ha propuesto emplear nuevos métodos para su caracterización como es el caso del biespectro y nuevas aplicaciones como son la medida conjunta de pletismografía de impedancia eléctrica y de variabilidad del ritmo cardíaco en situaciones de microgravedad para mejorar el conocimiento sobre la regulación de fluidos en el cuerpo humano.