

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

“El que nada duda, nada sabe”
Proverbio griego

“El corazón tiene razones que la razón no entiende”
Pascal

Agradecimientos

Ardua tarea la de agradecer a todas las personas que me han rodeado y apoyado en la realización de esta tesis y no olvidarme ninguna.

En primer lugar, agradecer al Dr. Ramón Pallás Areny quien es el verdadero demiurgo de este trabajo. No sólo me apoyó en la concesión de la beca asociada al proyecto PB92-0891 (hecho que me introdujo en el fascinante campo de la investigación biomédica) sino que guió mis pasos hacia el estudio de la variabilidad del ritmo cardíaco. Quisiera agradecerle su magnífica manera de enseñar el método científico y sus casi infinitas sugerencias. Gracias además por su tesón, paciencia, minuciosidad en la corrección, entusiasmo hacia el tema y todas aquellas razones por las que le debo estar agradecido y que no caben aquí (pues no es costumbre que los agradecimientos abulten más que la tesis misma).

En segundo lugar, desearía agradecer a mi entorno investigador más inmediato por su doble faceta de fuente de inspiración y de "cobayas". Gracias a mis compañeros de proyecto de investigación, Mireya, Juan y Manuel, por sus críticas y felicitaciones. Gracias a toda la Divisió d'Instrumentació i Bioenginyeria por someterse a las múltiples y refinadas torturas que he maquinado (sincronizar la respiración con un osciloscopio mientras se pedalea no es un acto agradable, ciertamente) y también por las ideas aportadas. Gracias a Oscar por su siempre ácido punto de vista sobre la materia y su ayuda en el tema de medida de impedancias. Gracias a Alfonso por su ayuda en la implementación de prototipos para la medida. Gracias a Ramón Bragós, Javier, Pere y el resto de línea de bioimpedancias (Oscar incluido de nuevo) por seguir hablándome después de que cambiara de línea de investigación (y, ¡además me siguen ayudando!). Gracias a todo aquel del laboratorio que haya servido para realizar cualquier tipo de registro. Sé que es una experiencia traumática pero también inolvidable.

En tercer lugar, desearía agradecer al Laboratori de Cardiologia Experimental A del Hospital Universitari de la Vall d'Hebron su inestimable ayuda al proporcionarme el acceso a electrocardiogramas obtenidos en cerdos para evaluar el reflejo asociado a la oclusión de arterias coronarias y al fascinante (y a veces extraño para un ingeniero) mundo de la investigación clínica. Gracias al Dr. Juan Cinca por sus puntos de vista tan interesantes y por ser quien me abrió la puerta en el tema de investigación en cerdos. Gracias a Marius y Ángeles por su paciencia ante mi hambruna por registros de sus experimentos.

En cuarto lugar, desearía agradecer a mis padres su colaboración intensiva en esta tesis. Efectivamente, si no hubiera sido por su eficaz labor, no creo que esta tesis hubiera comenzado siquiera.

En quinto lugar, desearía agradecer a todos mis amigos y amigas la paciencia que han tenido conmigo (aunque siempre me hizo gracia la forma como se removían inquietos y miraban hacia otro lado cuando comenzaba a explicar algo de la tesis). Gracias a Sandra, José Luís, Sonia, Mila, Richard, etc., etc. etc. por saberme sacar a pasear en los momentos más adecuados.

Agradecimientos

Por último, debo agradecer a la Dirección General de Investigación Científica y Técnica el soporte económico a través del proyecto PB92-0891.

ÍNDICE**1. INTRODUCCIÓN**

1.1 Antecedentes	1.1
1.2 Objetivos	1.3
1.3 ECG y ritmo cardíaco	1.4
1.4 Obtención de la serie RR	1.6
1.5 Causas de la variabilidad del ritmo cardíaco	1.8
1.6 Aplicaciones de la variabilidad del ritmo cardíaco	1.9
1.7 Métodos de análisis de la variabilidad del ritmo cardíaco	1.10

2. MÉTODOS ESTADÍSTICOS

2.1 Índices convencionales: definición	2.1
2.1.1 Medidas de corta duración (maniobras)	2.1
2.1.2 Medidas de larga duración	2.2
2.1.3 Aplicaciones	2.5
2.1.4 Discusión	2.5
2.2 Limitaciones de los índices convencionales	2.8
2.2.1 Correlación de la desviación estándar con otros índices convencionales	2.8
2.2.2 Sensibilidad de la desviación estándar frente a artefactos	2.11
2.2.3 Limitaciones del índice pNN50	2.13
2.2.4 Limitaciones del HRV _{index}	2.14
2.3 Mejoras en la caracterización de la variabilidad del ritmo cardíaco mediante métodos estadísticos	2.16
2.3.1 El índice MIRR	2.16
2.3.2 El índice MDARR	2.18
2.4 Verificación	2.19
2.4.1 Comparación entre MIRR y SD	2.19
2.4.2 Comparación entre MDARR y pNN50	2.25
2.5 Conclusiones	2.30

3. MÉTODOS ESPECTRALES

3.1 Aspectos básicos	3.1
3.1.1 Interés de los métodos espectrales	3.1
3.1.2 Muestreo no uniforme	3.2
3.1.3 FFT y métodos autorregresivos (AR)	3.3
3.1.4 Índices para la cuantificación	3.4
3.2 Limitaciones de los métodos espectrales	3.8
3.2.1 Identificación de osciladores	3.8
3.2.2 Estacionariedad de la secuencia RR	3.11
3.2.3 Sensibilidad frente a artefactos	3.14
3.2.4 La definición de los índices espectrales	3.16
3.2.5 Modulación de los osciladores	3.17
3.3 Estimación espectral robusta a artefactos	3.20
3.3.1 El signo de las diferencias sucesivas de la secuencia RR (SDRR)	3.20
3.3.2 La señal DRR	3.24
3.4 Verificación experimental	3.27
3.4.1 Osciladores endógenos y exógenos	3.27
3.4.2 Estacionariedad de la secuencia RR	3.31
3.4.3 Sensibilidad frente a artefactos	3.34
3.4.4 Modulación de fuentes	3.39
3.5 Conclusiones	3.43

4. MÉTODOS ESPECTRO-TEMPORALES

4.1 Métodos espectrales variantes con el tiempo	4.2
4.1.1 Estimación espectral variante con el tiempo de señales sintéticas	4.3
4.1.2 Aplicación de estimaciones espectrales variantes con el tiempo a señales reales	4.12
4.1.3 Conclusiones	4.23
4.2 Métodos espectro-temporales	4.26
4.2.1 Propiedades de las representaciones tiempo-frecuencia	4.26
4.2.2 Representaciones espectro-temporales de señales sintéticas	4.27
4.2.3 Aplicación de representaciones tiempo-frecuencia a señales reales	4.38
4.2.4 Conclusiones	4.48
4.3 Métodos tiempo-escala (ondículas)	4.49
4.3.1 Introducción a la transformada por ondículas y análisis multirresolución	4.49
4.3.2 Aplicación de la transformada por ondículas a señales	4.50

reales	
4.3.3 Aplicación del análisis multirresolución a la detección de ondas características en la serie RR	4.54
4.3.4 Conclusiones sobre el empleo de ondículas	4.57
4.4 Conclusiones sobre los métodos de análisis espectro-temporal	4.58
5. ANÁLISIS DE DINÁMICA NO LINEAL	
5.1 Introducción	5.1
5.2 Análisis de la secuencia RR empleando el biespectro	5.2
5.2.1 Introducción al biespectro	5.2
5.2.2 Aplicación del biespectro a señales sintéticas	5.3
5.2.3 Aplicación del biespectro a secuencias RR	5.4
5.2.4 Conclusiones sobre la aplicación del biespectro	5.10
5.3 Análisis de la complejidad: caos y fractales	5.11
5.3.1 Introducción al análisis de complejidad de señales: dinámica caótica y fractales	5.11
5.3.2 Análisis de dinámica caótica con señales sintéticas	5.18
5.3.3 Análisis de dinámica caótica en señales RR	5.20
5.3.4 Conclusiones sobre análisis de complejidad	5.24
5.4 Conclusiones	5.27
6. APLICACIÓN A REGISTROS DE CORTA DURACIÓN	
6.1 Análisis de la arritmia sinorrespiratoria	6.1
6.2 Aplicación a registros durante pruebas de esfuerzo	6.16
6.3 Aplicación a estudios de microgravedad	6.23
6.3.1 Introducción	6.23
6.3.2 Método	6.24
6.3.3 Resultados	6.27
6.3.4 Conclusiones	6.31
6.4 Análisis de registros durante angioplastia practicada en cerdos	6.35
7. APLICACIÓN A REGISTROS AMBULATORIOS DE 24 HORAS	
7.1 Análisis de registros ambulatorios mediante métodos estadísticos	7.2
7.2 Aplicación a registros ambulatorios mediante métodos espectrales	7.10
7.3 Análisis de registros ambulatorios mediante biespectro	7.16

7.4 Análisis de la complejidad de registros ambulatorios	7.18
7.5 Conclusiones sobre el análisis de registros ambulatorios	7.20

8. CONCLUSIONES

8.1 Métodos estadísticos	8.1
8.2 Métodos espectrales	8.2
8.3 Métodos espectro-temporales	8.3
8.4 Análisis de la dinámica no lineal	8.4
8.5 Análisis de registros de corta duración	8.4
8.6 Análisis de registros ambulatorios de 24 horas	8.5

ANEXO: DISEÑO DE UN MONITOR AMBULATORIO DE RITMO CARDÍACO

BIBLIOGRAFÍA