

Análisis Espectral del ECG Como Asistencia para la Terminación de Ablación por Catéter en Fibrilación Auricular

R. Alcaraz Martínez¹, F. Hornero Sos², J.J. Rieta Ibáñez³

¹ Grupo de Inv. en Electrónica, Telecom. y Bioingeniería, Univ. de Castilla-La Mancha, España, raul.alcaraz@uclm.es

² Servicio de Cirugía Cardíaca, Hospital Clínico Universitario de Valencia, España, hornero_fer@gva.es

³ BioMIT.org, Departamento Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica de Valencia, España, jjrieta@upv.es

Resumen

La ablación por catéter (AC) es hoy en día la terapia más empleada en pacientes con fibrilación auricular (FA). Sin embargo, más allá del aislamiento eléctrico de las venas pulmonares, no existe un consenso sobre la necesidad de provocar lesiones adicionales en el caso de FA persistente. No obstante, el objetivo de todo procedimiento de AC es provocar el menor número de lesiones auriculares para mantener al paciente durante el mayor tiempo posible en ritmo sinusal. Así pues, la determinación del punto óptimo para su terminación es un aspecto muy interesante. Con este propósito, el presente trabajo explora la capacidad de algunos índices espectrales obtenidos de la señal de actividad auricular reflejada sobre el ECG de superficie. Así, la variación experimentada durante el procedimiento de AC por la frecuencia auricular dominante (FAD), su ancho de banda a 3 dB (AB_{3dB}) y la frecuencia mediana (FM) del espectro completo, se han analizado en la derivación VI de 15 pacientes. Los resultados muestran una fuerte coincidencia entre la FAD y la FM, cuyas variaciones durante el procedimiento de AC son capaces de anticipar el resultado del mismo después de un seguimiento de 3 meses con una precisión entre el 70 y el 80 %. Por tanto, la monitorización de estos índices espectrales puede ofrecer información interesante en tiempo real para valorar si debe continuar o no la AC.

1. Introducción

La fibrilación auricular (FA) es la arritmia supraventricular más comúnmente encontrada en la práctica clínica diaria, la cual provoca aproximadamente un tercio de todas las hospitalizaciones por desordenes del ritmo cardíaco [1]. Su prevalencia aumenta con la edad, tal que aproximadamente el 4 y el 15 % de la población mundial mayor de 70 y 80 años, respectivamente, sufre esta arritmia cardíaca [2]. Aunque no es mortal a corto plazo, la FA facilita la formación de trombos dentro de las aurículas, aumentando así el riesgo de sufrir accidentes cerebrovasculares y reduciendo la calidad de vida del paciente [1].

Considerando su evolución, la FA se puede clasificar en varios grupos [3]. Así, normalmente comienza con episodios paroxísticos (es decir, que terminan por sí mismos) de corta duración, los cuales tienden a ser más persistentes

con el tiempo. Por tanto, en el primer grupo se encuentra la FA paroxística (FAP), en la cual los episodios son auto-limitados y tienen una duración inferior a 7 días. En el segundo grupo se engloba a la FA persistente, la cual requiere de una intervención externa, tal como la cardioversión eléctrica o la ablación por catéter (AC), para su terminación. Cabe mencionar que aproximadamente entre el 15 y 31 % de los pacientes de FAP evolucionan a persistente en un periodo de 4 a 8 años [4]. Finalmente, en el último grupo se encuadra a la FA permanente. En este caso, no es posible recuperar el ritmo sinusal normal (RS) mediante ningún tratamiento, persiguiéndose entonces únicamente controlar la frecuencia cardíaca [3].

Cuando se inicia un episodio de FA, independientemente de su duración, el impulso eléctrico generado en el nodo sinusal se reemplaza por un patrón complejo de despolarización de las aurículas, el cual cambia de forma rápida y aleatoria con cada latido [5]. De hecho, la bien definida onda P en el electrocardiograma (ECG) de superficie se reemplaza por ondas que varían en tiempo y morfología, las cuales se denominan ondas fibrilatorias (u ondas *f*) [6]. Sin embargo, todavía no se conocen completamente los mecanismos que provocan este comportamiento, aunque existen varias teorías al respecto [5]. Así, algunos trabajos soportan la idea de que la FA es generada por uno o varios focos fibrilatorios que generan una actividad de alta frecuencia que despolariza caóticamente las aurículas. Por otro lado, otros investigadores mantienen la hipótesis de que durante la FA se pueden encontrar varios frentes de onda, llamados reentradas, que se desplazan aleatoriamente por las aurículas, provocando así su desorganizada despolarización [5].

En este contexto y a pesar de los avances conseguidos en la última década, los diferentes tratamientos que existen hoy en día todavía no son completamente eficientes para terminar de forma definitiva con esta arritmia [7]. Así, en los últimos años se está utilizando de forma habitual la AC para tratar a pacientes que no responden positivamente a un tratamiento farmacológico [8], pero la tasa de recurrencia de FA a largo plazo, en pacientes con una arritmia persistente, sigue siendo cercana al 50 % [9]. De cualquier forma, los expertos consideran que este tratamiento es esencial para mejorar la calidad de vida de los pacientes, hasta

el punto que, hoy en día, la AC se ha convertido en la primera línea de actuación terapéutica en FA y en uno de los procedimientos más practicado en todo el mundo [10].

Desde que Haïssaguerre y sus colaboradores demostraron que la aparición de una actividad eléctrica ectópica en las venas pulmonares (VPs) es la principal fuente de disparo de la arritmia, el aislamiento eléctrico de esta zona auricular se ha convertido en el procedimiento de referencia de AC [10]. Sin embargo, debido a la limitada tasa de éxito anteriormente comentada para los pacientes de FA persistente, en los últimos años han aparecido diferentes formas de complementar este procedimiento mediante la realización de lesiones auriculares adicionales. En este sentido, se pueden encontrar estrategias basadas en compartimentar las aurículas mediante la realización de líneas similares a los procedimientos de cirugía MAZE, así como en eliminar aquellos puntos auriculares que presentan un electrograma complejo y fraccionado (CFAE) o aquellas zonas que mantienen los conductores de la arritmia, denominados comúnmente rotores [11]. Lamentablemente, algunos estudios multicéntricos recientes han puesto en duda la efectividad de estos procedimientos en comparación con el simple aislamiento de las VPs, así haciéndose patente la necesidad de más ensayos clínicos [12, 13].

No obstante, a pesar de que todavía hoy no exista un consenso sobre qué protocolo de AC es más efectivo, se puede resaltar que el objetivo de cualquiera de ellos es provocar la menor cantidad de lesiones auriculares posible para mantener al paciente en RS durante el mayor tiempo posible [14]. Sin embargo, aunque no existen evidencias para mantener que la terminación de la arritmia durante la AC sea un indicador fiable de la eficiencia del procedimiento, la mayor parte de ellos terminan cuando la FA revierte y su reinducción no se consigue tras varios intentos [14]. Así pues, considerando que algunos trabajos previos han demostrado que una caída del 10 % de la frecuencia auricular dominante (FAD) estimada desde el electrocardiograma (ECG) puede ser un camino eficiente para determinar el punto óptimo de terminación de cualquier procedimiento de AC [15], en este trabajo se analizan dos parámetros espectrales, tal como son el ancho de banda a 3 dB (AB_{3dB}) de la FAD y la frecuencia mediana (FM).

2. Materiales

El estudio consideró 15 pacientes con FA persistente, de los cuales se obtuvieron el ECG estándar de 12 derivaciones así como otros registros intracardíacos antes de aplicarles un procedimiento de AC. La duración de estas señales fue de 10 segundos, empleándose para su registro una frecuencia de muestreo de 977 Hz y 16 bits de cuantificación.

El protocolo de AC utilizado se ha descrito en varios trabajos previos [16]. De forma breve, consistió en aislar las VPs y, posteriormente, eliminar áreas auriculares con una frecuencia 1.2 veces mayor que la basal. El procedimiento terminó cuando la FA revirtió a RS y su reinducción fue imposible o cuando ya no se apreciaron más áreas auriculares cumpliendo el criterio establecido.

A todos los pacientes se les realizó seguimiento de, al menos, tres meses después de la AC, observándose que, tras el mismo, la mitad de ellos aproximadamente mantenían el RS (7) y la otra mitad habían recaído a FA (8).

3. Métodos

3.1. Preprocesado del ECG

A pesar de estar disponibles las 12 derivaciones del ECG, solo se analizó la V1, ya que ésta contiene las ondas f de mayor amplitud, al tratarse de la derivación más cercana a la aurícula derecha [6]. Para facilitar su análisis posterior, en primer lugar, se le aplicó un preprocesado estándar [17]. Así, se filtró paso alto con una frecuencia de corte de 0.5 Hz para eliminar la línea base y, a continuación, se filtró paso bajo con una frecuencia de corte de 70 Hz para reducir el ruido muscular de alta frecuencia [17]. A la señal también se le aplicó un filtrado notch para eliminar la interferencia de la red eléctrica de 50 Hz [17].

Posteriormente, se extrajeron las ondas f mediante la cancelación del complejo QRST. Para ello, se detectaron todos los picos R y se obtuvo la plantilla ventricular para su sustracción como la primera componente principal de todos los complejos identificados [18]. Finalmente, se obtuvo la densidad espectral de potencia (DEP) de la señal resultante mediante el uso del periodograma de Welch, utilizando como parámetros una ventana Hamming de 4.096 puntos y un solapamiento del 50 % entre ventanas consecutivas [19].

3.2. Caracterización espectral de las ondas f

De acuerdo con una multitud de trabajos previos [20], la FAD se seleccionó como la frecuencia con mayor DEP dentro del intervalo 3–9 Hz. También se obtuvo su AB_{3dB} como la diferencia entre las frecuencias superior e inferior a dicho pico, las cuales presentaban la mitad de DEP. Finalmente, la frecuencia dividiendo el espectro en dos partes con igual DEP se consideró como la FM [21]. Este parámetro se ha estudiado ampliamente en electroencefalografía, ya que permite resumir la distribución de potencia en el espectro de una señal de forma sencilla y rápida [21].

3.3. Evaluación del funcionamiento

Para cuantificar el efecto provocado por el procedimiento de la AC sobre el sustrato auricular, los tres parámetros espectrales descritos se evaluaron antes del comienzo y de la terminación del mismo, obteniéndose así la diferencia entre ellos. Los valores obtenidos se expresan a lo largo del texto en media \pm desviación estándar para los dos grupos de pacientes, es decir, aquellos que después del seguimiento habían recaído a AF y los que todavía mantenían el RS. La existencia de diferencias estadísticamente relevantes entre ambos grupos de pacientes se estimó mediante el test paramétrico de la t -Student, considerándose un valor de $p < 0.05$ como significativo.

Por otra parte, para evaluar la capacidad predictiva de la variación sufrida por los parámetros analizados se empleó la curva ROC (Receiver Operating Characteristics). Para cada parámetro, dicha curva se construyó seleccionando

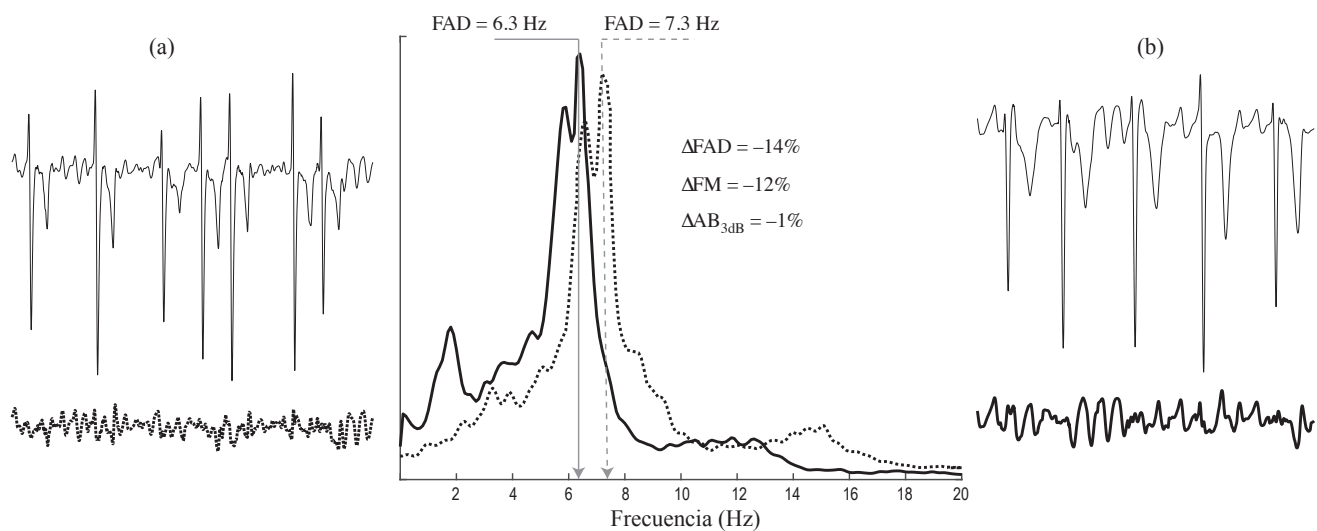


Figura 1. Ejemplo de segmentos de ECG extraídos justo antes del comienzo del procedimiento de AC (a) y de su terminación (b). También se puede observar la señal de AA extraída en cada caso, junto con sus distribuciones espectrales y la variación experimentada por los parámetros estudiados

Índice	Pacientes que mantienen RS	Pacientes que recaen a FA	<i>p</i>
ΔFAD	$-3.6 \pm 8.9 \%$	$1.3 \pm 10.3 \%$	0.1
ΔAB_{3dB}	$0.3 \pm 6.8 \%$	$0.3 \pm 9.3 \%$	0.2
ΔFM	$-2.3 \pm 7.4 \%$	$0.3 \pm 9.5 \%$	0.1

Tabla 1. Valor medio y desviación estándar de la variación experimentada por los índices espectrales analizados durante el procedimiento de AC.

automáticamente diversos umbrales dentro de su rango de valores y calculando el par sensibilidad-especificidad para cada uno de ellos. La sensibilidad se consideró como el número de pacientes que recayeron a FA al final del seguimiento correctamente clasificados, mientras que la especificidad como la proporción de pacientes en RS correctamente identificados. El porcentaje total de pacientes apropiadamente clasificados fue considerado como la precisión diagnóstica y el umbral óptimo se determinó como aquél que maximizaba esta precisión diagnóstica.

4. Resultados

Un ejemplo ilustrativo de los resultados se muestra en la Figura 1, donde se pueden observar segmentos de ECG antes del comienzo y de la terminación de la AC junto con la actividad auricular (AA) extraída de ellos y su caracterización espectral para un paciente que mantiene el RS después del seguimiento. Se debe notar que la distribución espectral mantiene su forma después del procedimiento de AC, pero se desplaza notablemente a frecuencias más bajas. Los resultados globales obtenidos para todos los pacientes se resumen en la Tabla 1 y la Figura 2. Aunque se puede observar una dispersión importante, también se puede apreciar que tanto la FAD como la FM obtuvieron diferencias estadísticamente significativas entre los dos grupos de pacientes. Además, mientras que ambos parámetros solo aumentaron ligeramente durante el procedimiento de AC para aquellos pacientes que recayeron a FA después del se-

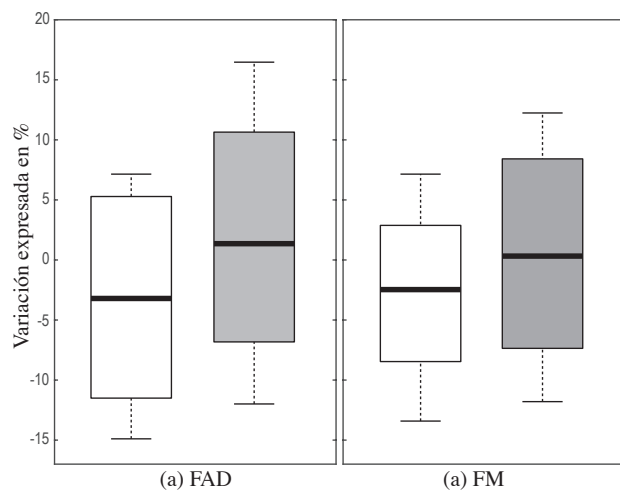


Figura 2. Diagrama de cajas y bigotes de la variación sufrida por la DAF y la FM durante el procedimiento de AC para los pacientes que mantenían el RS (caja blanca) y recayeron a FA (caja sombreada) después del seguimiento.

guimiento, se observó una caída notable para aquellos que mantenían el RS.

De acuerdo los resultados, la variación de estos parámetros también ofreció una interesante capacidad para anticipar el resultado del procedimiento de AC tras el seguimiento. Sin embargo, la FM mostró una precisión diagnóstica ligeramente superior que la FAD. De hecho, mientras que la FAD obtuvo valores de sensibilidad, especificidad y precisión del 71.4, 75.0 y 73.3 %, la FM presentó unos valores de 85.7, 75.0 y 80.0 %, respectivamente.

5. Discusión y conclusiones

Los resultados obtenidos muestran un fuerte acuerdo entre la FAD y la FM, a pesar de que ambos índices se calculan y hacen referencia a aspectos completamente diferentes. Así, mientras que la FAD es un índice aceptado por la comunidad médica por presentar información útil en muchos

contextos así como por resumir la frecuencia de despolarización auricular, la FM determina la frecuencia que divide la DEP en dos mitades iguales. Por tanto, este resultado sugiere que, aunque el espectro de las señales de AA se desplace o no en frecuencia durante el procedimiento de AC, su morfología se mantiene sin alteraciones significativas, tal como ha mostrado para un caso típico la Figura 1.

Interesantemente, los pacientes que mantuvieron el RS mostraron una caída en estos dos parámetros, mientras que aquellos que recayeron a FA presentaron valores ligeramente superiores antes y después de la AC. Este resultado está en línea con trabajos previos [15], pero la caída mostrada por la FAD es aproximadamente la mitad en valor absoluto. No obstante, considerando que la derivación V1 refleja la frecuencia fibrilatoria de la aurícula derecha [22], el resultado obtenido estaría también de acuerdo con otros trabajos que han revelado que la FAD disminuye en esta aurícula en aquellos pacientes que son capaces de mantener el RS un tiempo después del procedimiento de AC [16].

Por otro lado, la variación experimentada por la concentración espectral de potencia alrededor de la FAD, medida por el AB_{3dB} , no fue capaz de obtener diferencias estadísticamente significativas entre los pacientes que mantenían el RS al final del seguimiento y los que no lo hacían. Cabe mencionar que también se han reportado resultados muy similares cuando el AB_{3dB} se ha empleado para predecir el resultado de la cardioversión eléctrica [19]. Por lo tanto, dado que ambos procedimientos provocan alteraciones muy diferentes del sustrato auricular, se podría considerar que esta métrica tampoco podría ser un buen predictor *a priori* del resultado de otras terapias actuales utilizadas para tratar la FA, tal como la cardioversión farmacológica o la cirugía cardíaca.

Finalmente, se debe indicar que el número de pacientes analizados es limitado y, por tanto, los resultados obtenidos se deben considerar con cautela. No obstante, la monitorización no invasiva de las características espectrales de la señal de actividad auricular parece interesante para cuantificar en tiempo real la alteración provocada por el procedimiento de ablación y así poder evaluar de forma precisa y objetiva la necesidad de su continuación o terminación.

Agradecimientos

Trabajo financiado por los proyectos TEC2014-52250-R y DPI2017-83952-C3 MINECO/AEI/FEDER, UE.

Referencias

- [1] January CT, Wann LS, Alpert JS, Calkins H, Cigarroa JE, et al. 2014 AHA/ACC/HRS guideline for the management of patients with atrial fibrillation. *Circulation* Dec 2014; 130(23):e199–267.
- [2] Zoni-Berisso M, Lercari F, Carazza T, Domenicucci S. Epidemiology of atrial fibrillation: European perspective. *Clin Epidemiol* 2014;6:213–20.
- [3] Gallagher MM, Camm J. Classification of atrial fibrillation. *Am J Cardiol* Oct 1998;82(8A):18N–28N.
- [4] de Vos CB, Pisters R, Nieuwlaar R, et al. Progression from paroxysmal to persistent atrial fibrillation clinical correlates and prognosis. *J Am Coll Cardiol* Feb 2010;55(8):725–31.
- [5] Schotten U, Verheule S, Kirchhof P, Goette A. Pathophysiological mechanisms of atrial fibrillation: a translational appraisal. *Physiol Rev* Jan 2011;91(1):265–325.
- [6] Petrutiu S, Ng J, Nijm GM, Al-Angari H, Swiryn S, Sahakian AV. Atrial fibrillation and waveform characterization. A time domain perspective in the surface ECG. *IEEE Eng Med Biol Mag* 2006;25(6):24–30.
- [7] Censi F, Cianfrocca C, Purificato I. Atrial fibrillation and the 4P medicine. *Ann Ist Super Sanita* 2013;49(3):247–8.
- [8] Gerstenfeld EP, Duggirala S. Atrial fibrillation ablation: Indications, emerging techniques, and follow-up. *Prog Cardiovasc Dis* Aug 2015;.
- [9] Ganesan AN, Shipp NJ, et al. Long-term outcomes of catheter ablation of atrial fibrillation: a review and meta-analysis. *J Am Heart Assoc* Apr 2013;2(2):e004549.
- [10] Morin DP, Bernard ML, Madias C, Rogers PA, Thihalolipavan S, Estes 3rd NAM. The state of the art: Atrial fibrillation epidemiology, prevention, and treatment. *Mayo Clin Proc* Dec 2016;91(12):1778–1810.
- [11] Latchamsetty R, Morady F. Atrial fibrillation ablation. *Annu Rev Med* Aug 2017;.
- [12] Verma A, Jiang Cy, Betts TR, Chen J, Deisenhofer I, Mantovan R, Macle L, Morillo CA, Haverkamp W, Weerasooriya R, Albenque JP, Nardi S, Menardi E, Novak P, Sanders P, STAR AF II Investigators. Approaches to catheter ablation for persistent atrial fibrillation. *N Engl J Med* May 2015; 372(19):1812–22.
- [13] Nattel S, Xiong F, Aguilar M. Demystifying rotors and their place in clinical translation of atrial fibrillation mechanisms. *Nat Rev Cardiol* Sep 2017;14(9):509–520.
- [14] Baker M, Kumar P, Hummel JP, Gehi AK. Non-inducibility or termination as endpoints of atrial fibrillation ablation: What is the role? *J Atr Fibrillation* 2014;7(3):1125.
- [15] Yoshida K, Chugh A, Good E, Crawford T, Myles J, Veerareddy S, Billakanty S, Wong WS, Ebinger M, Pelosi F, Jongnarangsin K, Bogun F, Morady F, Oral H. A critical decrease in dominant frequency and clinical outcome after catheter ablation of persistent atrial fibrillation. *Heart Rhythm* Mar 2010;7(3):295–302.
- [16] Arienza F, Almendral J, Jalife J, Zlochiver S, et al. Real-time dominant frequency mapping and ablation of dominant frequency sites in atrial fibrillation with left-to-right frequency gradients predicts long-term maintenance of sinus rhythm. *Heart Rhythm* Jan 2009;6(1):33–40.
- [17] Sörnmo L, Laguna P. *Biomedical Signal Processing in Cardiac and Neurological Applications*. Elsevier Academic Press, 2005.
- [18] Alcaraz R, Rieta JJ. Adaptive singular value cancelation of ventricular activity in single-lead atrial fibrillation electrocardiograms. *Physiol Meas* Dec 2008;29(12):1351–69.
- [19] Alcaraz R, Rieta JJ. Time and frequency recurrence analysis of persistent atrial fibrillation after electrical cardioversion. *Physiol Meas* May 2009;30(5):479–89.
- [20] Yoshida K, Aonuma K. Catheter ablation of atrial fibrillation: Past, present and future directions. *Journal of Arrhythmia* 2012;28:83–90.
- [21] Hornero R, Escudero J, Fernández A, Poza J, Gómez C. Spectral and nonlinear analyses of MEG background activity in patients with alzheimer's disease. *IEEE Trans Biomed Eng* Jun 2008;55(6):1658–65.
- [22] Hsu NW, Lin YJ, Tai CT, Kao T, Chang SL, Wongcharoen W, Lo LW, Udyavar AR, Hu YF, Tso HW, Higa S, Chen SA. Frequency analysis of the fibrillatory activity from surface ECG lead V1 and intracardiac recordings: implications for mapping of AF. *Europace* 2008;10(4):438–43.