

Patrones Simples de Ablación para la Terminación de Rotores en Fibrilación Auricular Crónica. Estudio de Simulación

Esteban A. Cardona¹, Juan E. Duque¹, Catalina Tobón^{1, ♯}, Miguel A. Becerra², Javier Saiz³

¹ Grupo de Investigación e Innovación Biomédica, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia

² Grupo de Electrónica y Automática, Institución Universitaria Salazar y Herrera, Medellín, Colombia

³ Grupo de Bioelectrónica, I3BH, Universitat Politècnica de València, Valencia, España

Recibido 4 de septiembre de 2013. Aprobado 20 de octubre de 2014

SIMPLE ABLATION PATTERNS FOR TERMINATING ROTORS IN CHRONIC ATRIAL FIBRILLATION. A SIMULATION STUDY

PADRÕES SIMPLES ABLAÇÃO DE RESCISÃO DE ROTORES COM FIBRILAÇÃO ATRIAL CRÔNICA. ESTUDO DE SIMULAÇÃO.

Resumen— La fibrilación auricular (FA) es la arritmia más común en la práctica clínica y por la que más se consulta en los servicios médicos. Recientemente, se ha propuesto un mecanismo de mantenimiento de la FA, el cual consiste en la existencia de uno o varios rotors que activan el tejido a alta frecuencia. La ablación es uno de los tratamientos para la FA, en FA crónica son necesarios patrones de ablación complejos, por lo que actualmente se busca el patrón ideal con un mínimo número de líneas de ablación.

En este trabajo se simula la actividad de un rotor en un modelo 2D de tejido auricular humano, bajo condiciones de FA crónica y se localiza su centro de giro (tip). Se proponen y evalúan seis diferentes patrones simples de ablación compuestos por un número reducido de líneas. El estudio demostró que aquellos patrones que atraviesan o encierran el tip del rotor y que adicionalmente se prolongan hasta una frontera de conducción son eficaces en la terminación del rotor.

Palabras claves— Ablación; Fibrilación auricular crónica; Rotor; Simulación.

Abstract — Atrial fibrillation (AF) is the most common arrhythmia in clinical practice and the most consulted in medical services. Recently it has been proposed a mechanism for maintaining the AF, which consists in one or more rotors activating the tissue at high frequency. Ablation is one of the treatments for AF, for chronic AF is needed complex ablation patterns, so currently it has been looking for an ideal pattern with a minimum number of ablation lines.

In this work activity of a rotor was simulated in a 2D model of human atrial tissue, under chronic AF conditions, and the center of rotation (tip) was located. Six different simple ablation patterns composed of a limited number of lines were proposed and evaluated. The study showed that those patterns that passed through or encloses the tip of the rotor and additionally were extended to a conduction boundary are effective in the termination of the rotor.

♯ Dirección para correspondencia: catalinatobon@itm.edu.co

Keywords—Ablation; Chronic atrial fibrillation; Rotor; Simulation.

Sumário— A fibrilação atrial (FA) é a arritmia mais comum na prática clínica e na consulta que a maioria dos serviços médicos. Recentemente, é proposto um mecanismo para a manutenção da FA, que é a existência de um ou mais rotores que activam o tecido com elevada frequência. A ablação é um tratamento para fibrilação atrial em padrões crônicos de ablação de FA necessárias são complexas, por isso eles estão atualmente buscando o padrão ideal, com um número mínimo de linhas de ablação.

Neste documento, a actividade de um rotor é simulada em um modelo em 2D do tecido atrial humano, sob condições de AF crónica e o seu centro de rotação (ponta) está localizado. São propostos e avaliados seis diferentes padrões de ablação individuais compostos de um pequeno número de linhas. O estudo mostrou que as que passam através de padrões ou encerram a ponta do rotor e se estendem para além de um limite de condução são eficazes na cessação do rotor.

Palavras-chave—Ablação; Fibrilação atrial crónica; rotor; Simulação.

I. INTRODUCCIÓN

La fibrilación auricular (FA) es el tipo más común de taquicardia auricular sostenida y por la que más se consulta en los servicios médicos. La FA consiste en un ritmo anormal, rápido, caótico y desincronizado, la cual afecta cerca del 2 % de la población en general, de los cuales, del 8 % al 11 % son mayores de 65 años de edad y su incidencia está en aumento [1].

Existen diferentes hipótesis sobre el mecanismo de la FA. La hipótesis de múltiples ondas reentrantes, consiste en la generación de múltiples frentes simultáneos de activación que continuamente reentran, fragmentan y colisionan. La FA se mantiene en función de la probabilidad de que en cada momento se forme un número de nuevos frentes igual o mayor que el que se extingue; es un proceso caótico [2, 3, 4].

La hipótesis focal consiste en la existencia de focos ectópicos que descargan impulsos a altas frecuencias, cuyos frentes de onda se propagan y fragmentan. Generalmente, los focos ectópicos se localizan en o alrededor de las venas pulmonares. Este mecanismo “focal” parece predominar en la FA paroxística [4, 5].

La hipótesis del rotor, propuesta por Jalife *et al.* [6], es un interesante desarrollo teórico del mecanismo de reentrada. Consiste de una activación en espiral o rotor (*vortex*), girando sin un obstáculo central, debido a una menor excitabilidad en su centro de giro (tip del rotor) que hace la conducción más lenta que en la periferia y puede producirse en medios homogéneos [7].

El tratamiento de la FA puede ser farmacológico o quirúrgico (ablación), siendo éste último el más usual en pacientes con FA crónica. La ablación es un procedimiento de cardiología invasiva en el que se realizan líneas de bloqueo de la conducción, lo que conlleva a una reducción de la funcionalidad contráctil de la aurícula y en ocasiones desencadenan taquiarritmias postquirúrgicas [8]. En pacientes con FA crónica, son necesarios patrones de ablación complejos y compuestos por un gran número de líneas de bloqueo, por lo que hoy por hoy se busca el patrón ideal que con un mínimo de líneas de ablación sea efectivo en terminar la FA. Su eficacia depende del

bloqueo de la fuente arritmogénica que mantiene la arritmia.

El objetivo de este trabajo es evaluar mediante simulación, la eficacia de diferentes y novedosos patrones simples de ablación en la terminación del rotor durante FA crónica.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Modelo celular

Se implementó el modelo de célula de aurícula humana formulado por Courtemanche *et al.* [9], el cual consiste en formulaciones específicas para las corrientes y concentraciones de potasio, sodio y calcio (K^+ , Na^+ , Ca^{2+}) principalmente.

Para simular condiciones de FA crónica, se introdujo en el modelo los cambios en las corrientes iónicas reportados en estudios experimentales de miocitos de células humanas de pacientes con FA crónica [10, 11]. Las conductancias para las corrientes I_{Kur} y I_{to} se redujeron en un 50 %, la conductancia para I_{Cal} fue disminuida un 70 %, mientras que la conductancia para I_{K1} se aumento en un 100 %.

La siguiente ecuación permite calcular el potencial transmembrana (V_m).

$$C_m \frac{dV_m}{dt} + I_{ion} + I_{stim} = 0 \quad (1)$$

Donde C_m es la capacidad de membrana (100 pF), I_{ion} es la corriente total iónica, I_{stim} es la corriente de estimulación.

2.2 Modelo 2D de aurícula humana

Se desarrolló un modelo 2D virtual de tejido auricular de 6 cm x 6 cm, compuesto por 22500 elementos hexaédricos. Se asumió isotropía y valores de conductividad realistas para obtener velocidades de conducción reportados en la literatura [12].

A este modelo se le acopló el modelo modificado de célula de aurícula humana.

2.3 Simulación de un rotor

Para llevar a cabo la simulación del rotor se aplicó un protocolo de estimulación cruzada S1-S2, el cual consiste en aplicar dos frentes de estimulación perpendiculares entre sí, un frente plano (S1) y un frente cuadrado (S2), permitiendo la generación de un frente de onda en forma espiral o rotor (Fig. 1).

Una vez generado el rotor, la simulación se mantuvo durante 5 segundos.

Para la localización del tip del rotor, se implementó un mapa de contornos que permitió determinar el punto de giro.

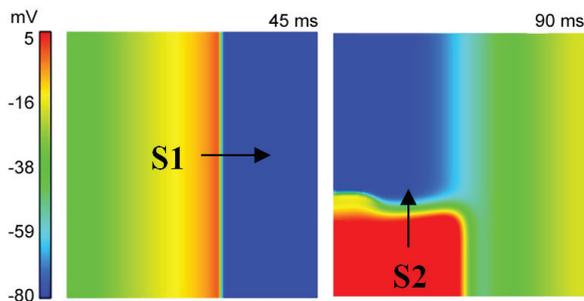


Fig. 1. Protocolo de estimulación cruzada S1-S2 en un modelo 2D.

2.3 Patrones de ablación

Se diseñaron seis diferentes patrones simples de ablación, con un número reducido de líneas. Se utilizaron formas geométricas como líneas y círculos compuestos por dos elementos de grosor, a los cuales se les asignó conductividad nula con el fin de convertirlos en líneas de bloqueo, localizadas estratégicamente en diferentes zonas del modelo (Fig. 2).

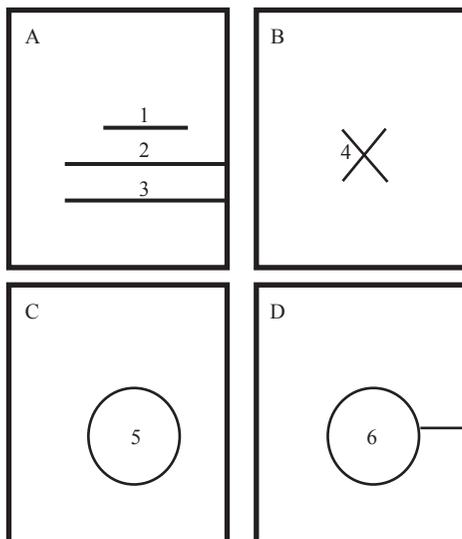


Fig. 2. Patrones simples de ablación en el modelo 2D.

A continuación se describen cada uno de los patrones simulados:

Patrón 1: línea que va desde una zona central del rotor, de 2.28 cm de largo, localizada a 2.44 cm de la frontera en el eje x y que termina 0.76 cm antes de tocar la frontera derecha del modelo (Fig. 2A).

Patrón 2: línea que va desde el centro de giro o tip del rotor, de 4.36 cm de largo, localizada a 1.76 cm de la frontera en el eje x y que termina en la frontera derecha del modelo (Fig. 2A).

Patrón 3: línea que va desde una zona baja del rotor de 4.36 cm de largo, localizada a 1.04 cm de la frontera en el eje x y que termina en la frontera derecha del modelo (Fig. 2A).

Patrón 4: cruz ubicada en la zona central del rotor (Fig. 2B).

Patrón 5: círculo que encierra la zona central del rotor (Fig. 2C).

Patrón 6: patrón 5, más una línea que va desde el círculo hasta la frontera derecha del modelo (Fig. 2D).

Para evaluar la eficacia de cada uno de los patrones simples de ablación en la terminación del rotor, fueron aplicados al modelo 2D después de 5 segundos de actividad del rotor.

III. RESULTADOS

El remodelado eléctrico auricular causó una reducción de $\approx 70\%$ en la duración del potencial de acción (Fig. 3).

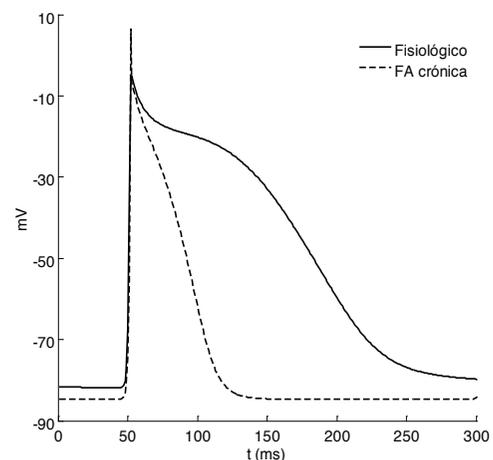


Fig. 3. Efecto del remodelado eléctrico en el potencial de acción.

Después de aplicado el protocolo de estimulación cruzada S1-S2, se obtuvo un rotor estable en el tejido virtual, girando en el sentido de las manecillas del reloj (Fig. 4). El mapa de contornos permitió localizar el centro de giro (tip) del rotor (punto rojo en Fig. 4).

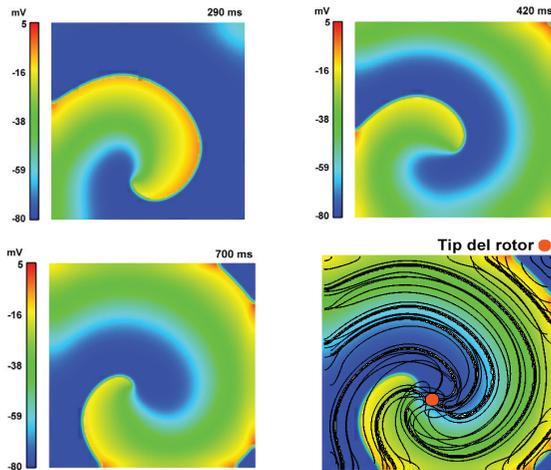


Fig. 4. Simulación de un rotor estable en tejido 2D auricular. Mapa de contornos para la localización del tip del rotor.

El patrón de ablación 1, compuesto por una línea que va desde una zona central del rotor hasta antes de tocar la frontera derecha del modelo, no fue eficaz en terminar el rotor. Al estar ubicada muy por encima del tip del rotor, éste pudo continuar girando en la parte inferior del tejido. La línea de ablación se comportó como un obstáculo anatómico para el rotor, por lo que éste continuó girando de forma estable en el sentido de las manecillas del reloj alrededor de la línea (Fig. 5).

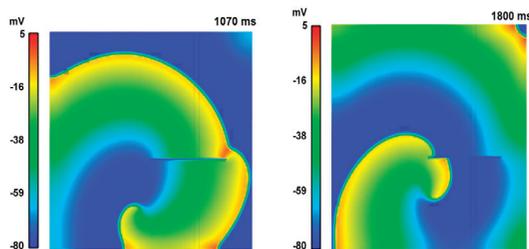


Fig. 5. Efecto del patrón de ablación 1 sobre el rotor.

Por otro lado, el patrón 2, compuesto por una línea que atraviesa el tip del rotor hasta tocar la frontera derecha del modelo, fue eficaz en la terminación del rotor. Al convertirse en un obstáculo que impidió la propagación y reentrada de la cabeza del rotor alrededor del tip, lo extinguió por completo a los 200 ms (Fig. 6).

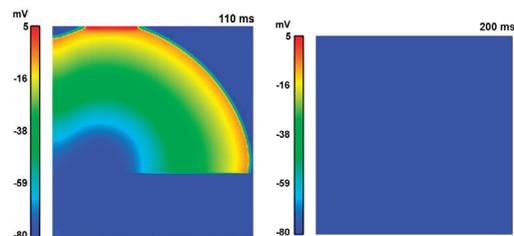


Fig. 6. Efecto del patrón de ablación 2 sobre el rotor.

El patrón 3, compuesto por una línea que va desde una zona baja del tip del rotor hasta tocar la frontera derecha del modelo, no fue eficaz en terminar el rotor. El rotor al alcanzar el comienzo de la línea, generó un nuevo frente de onda reentrante que propagó hacia la parte inferior del tejido, girando en sentido contrario a las manecillas del reloj, observándose una reentrada en figura de ocho, la cual continuó durante toda la simulación (Fig. 7).

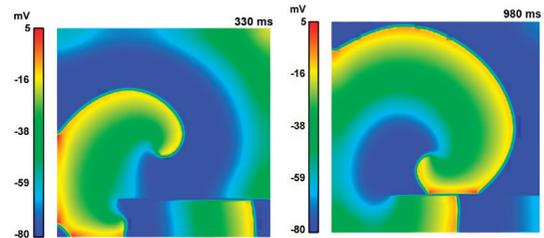


Fig. 7. Efecto del patrón de ablación 3 sobre el rotor.

El patrón 4 compuesto por una cruz en el tip del rotor, no fue eficiente en su terminación. El rotor propagó alrededor de la cruz, convirtiéndose esta en un obstáculo anatómico (Fig. 8).

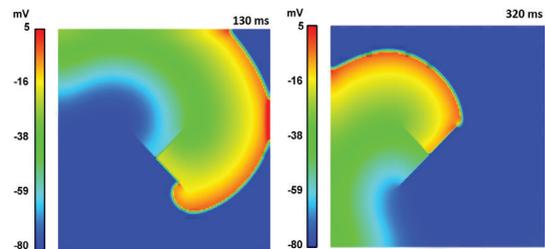


Fig. 8. Efecto del patrón de ablación 4 sobre el rotor.

El patrón 5, el cual consiste de un círculo en la zona central que encierra el centro de giro o tip del rotor, no fue eficaz en la terminación de este. La cabeza del frente de onda inicio un nuevo rotor dentro de la zona circular delimitada por el patrón de ablación, el cual finalizó a los 400 ms, ya que el área no es suficientemente grande para que éste se mantenga. Por otra parte, el rotor principal continuo girando alrededor del patrón de ablación convirtiéndose éste en un obstáculo anatómico para el circuito reentrante (Fig. 9).

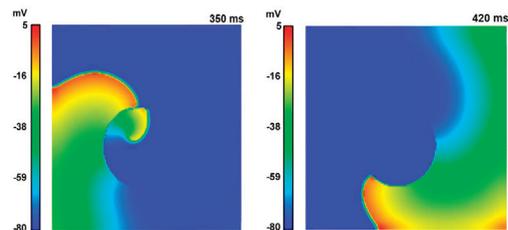


Fig. 9. Efecto del patrón de ablación 5 sobre el rotor.

El patrón de ablación 6, el cual consiste en una combinación del patrón 5 más una línea que va del círculo a una frontera del tejido, fue eficaz en la terminación de la actividad del rotor. El rotor continuó girando alrededor del patrón circular hasta chocar con la línea y extinguirse a los 270 ms. El rotor que se generó dentro del área circular finalizó a los 400 ms ya que el área no es lo suficientemente grande para mantenerlo, finalizando por completo toda actividad reentrante (Fig. 10).

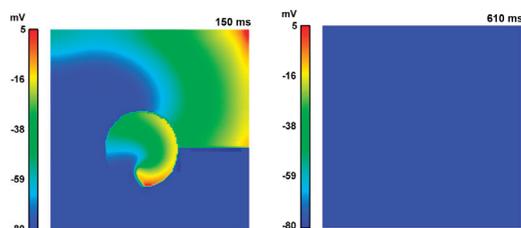


Fig. 10. Efecto del patrón de ablación 6 sobre el rotor.

IV. DISCUSIÓN

Se desarrollaron seis patrones simples de ablación, compuestos por un menor número de líneas, enfocados en terminar la actividad de un rotor, como mecanismo de mantenimiento de FA crónica.

De los seis patrones, dos de ellos fueron eficaces en la terminación del rotor. El patrón compuesto por una línea que atraviesa el tip del rotor hasta tocar la frontera derecha del modelo fue el más eficaz, al terminar el rotor a los 200 ms. El patrón que consiste en un círculo en la zona central del rotor más una línea que va del círculo a una frontera del tejido, lo terminó a los 400 ms.

Estudios experimentales [13, 14, 15] han desarrollado modificaciones al procedimiento Maze desarrollado por Cox [16], con el fin de simplificar esta técnica quirúrgica, reducir tiempos, efectos adversos y complicaciones postquirúrgicas. Las actuales investigaciones sobre ablación están encaminadas en conseguir patrones que permitan reproducir los buenos resultados obtenidos con el Maze III, utilizando fuentes alternativas de energía [17] y con procedimientos mínimos de ablación [14, 15]. Intuitivamente, el patrón de ablación ideal debería ser capaz de prevenir la arritmia con un número limitado de líneas, de longitud mínima y mantener o permitir la recuperación de la actividad mecánica de las dos aurículas durante el ritmo sinusal [18].

Los resultados de este trabajo sugieren la importancia de determinar la localización del tip del rotor y generar líneas de bloque que lo atraviesen o lo encierren, en combinación con la prolongación del patrón hasta tocar una frontera conductora. En la aurícula real, estas fronteras podrían ser los anillos auriculoventriculares,

desembocaduras de venas pulmonares o cavas u otras líneas de ablación adicionales.

Algunos estudios [19, 20] han sugerido la importancia de determinar las trayectorias preferenciales de conducción de los circuitos reentrantes en arritmias como la FA, con el fin de impedir la arritmia con el mínimo número de líneas de ablación, permitiendo al mismo tiempo una buena contracción de ambas aurículas durante el ritmo sinusal. [21], durante taquicardias focales y macrorreentrantes, con el sistema CARTO, realizó una valoración inicial de su origen auricular. Tras completar el mapa, las aplicaciones de RF se dirigieron a esos puntos de origen. Los procedimientos de ablación finalizaron con éxito en 19 pacientes (79,2 %): 10 con taquicardias focales y nueve con macrorreentradas auriculares.

IV. CONCLUSIÓN

Se desarrollaron diferentes patrones simples de ablación, compuestos por un mínimo número de líneas, de los cuales fueron eficaces aquellos que atraviesan o encierran el tip del rotor y que adicionalmente se prolongan hasta una frontera de conducción.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo fue soportado por el proyecto P14112 del ITM y 250 de la IUSH.

REFERENCIAS

- [1]. Camino A., Madrid A., Rebello J., Peña G., Soca A., Moro C. Ablación con radiofrecuencia de taquicardia ventricular monomorfa recurrente en una paciente con esclerodermia sistémica severa. *Revista española de cardiología*, 53, 405-408, 2001.
- [2]. Moe G.K. On the multiple wavelet hypothesis of atrial fibrillation. *Arch. Int. Pharmacodyn.*, 140, 183-188, 1962.
- [3]. Allesie M.A., Konings K., Kirchhof C.J., Wijffels M.. Electrophysiologic mechanisms of perpetuation of atrial fibrillation. *Am. J. Cardiol.*, 77(3), 10A-23A, 1996.
- [4]. Elizari M.V. Consenso de Fibrilación Auricular. *Revista Argentina de Cardiología*, 73, 469-485, 2006.
- [5]. Haissaguerre M., Jais P., Shah D.C., Takahashi A., Hocini M., Quiniou G., Garrigue S., Le M.A., Le M.P., Clementy J. Spontaneous initiation of atrial fibrillation by ectopic beats originating in the pulmonary veins. *N Engl J Med*, 339(10), 659-666, 1998.
- [6]. Jalife J., Davidenko J.M., Michaels D.C. A new perspective on the mechanisms of arrhythmias and sudden cardiac death: spiral waves of excitation in heart muscle. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 2, 133-152, 1991.
- [7]. García F., Cosío M. Unidades de dolor torácico. *Revista Española de Cardiología*, 56, 218-219, 2003.
- [8]. Scaglione J. Arritmias en pediatría: un enfoque práctico. Silver Horse, 2012. Capítulo 1, 7-11.

- [9]. Courtemanche M., Ramirez R.J., Nattel S. Ionic mechanisms underlying human atrial action potential properties: insights from a mathematical model. *Am J Physiol*, 275(1), H301-H321, 1998.
- [10]. Workman A.J., Kane K.A., Rankin A.C. The contribution of ionic currents to changes in refractoriness of human atrial myocytes associated with chronic atrial fibrillation. *Cardiovasc Res*, 52(2), 226-235, 2001.
- [11]. Courtemanche M., Ramirez R.J., Nattel S. Ionic targets for drug therapy and atrial fibrillation-induced electrical remodeling: insights from a mathematical model. *Cardiovasc Res*, 42(2), 477-489, 1999.
- [12]. Hansson A., Holm M., Blomstrom P., Johansson R., Luhrs C., Brandt J., Olsson S.B. Right atrial free wall conduction velocity and degree of anisotropy in patients with stable sinus rhythm studied during open heart surgery. *Eur Heart J*, 19(2), 293-300, 1998.
- [13]. Hauw T., Willem P., Arif E., Ramdat M. New strategies in the surgical treatment of atrial fibrillation, *Cardiovascular Research*, 58, 501-509, 2003.
- [14]. Sueda T., Nagata H., Orihashi K., Morita S., Okada K., Sueshiro M., Hirai S., Matsuura Y. Efficacy of a simple left atrial procedure for chronic atrial fibrillation in mitral valve operations. *Ann Thorac Surg*, 63(4), 1070-1075, 1997.
- [15]. Kottkamp H., Hindricks G., Hammel D., Autschbach R., Mergenthaler J., Borggrefe M., Breithardt G., Mohr F.W., Scheld H.H. Intraoperative radiofrequency ablation of chronic atrial fibrillation: a left atrial curative approach by elimination of anatomic "anchor" reentrant circuits. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 10(6), 772-780, 1999.
- [16]. Cox J.L. The surgical treatment of atrial fibrillation. IV. Surgical technique. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 101(4), 584-592, 1991.
- [17]. Handa N., Schaff H.V., Morris J.J., Anderson B.J., Kopecky S.L., Enriquez-Sarano M. Outcome of valve repair and the Cox Maze procedure for mitral regurgitation and associated atrial fibrillation. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 118(4), 626-635, 1999.
- [18]. Melo J., Adragao P., Neves J., Ferreira M.M., Pinto M.M., Rebocho M.J., Parreira L., Ramos T. Surgery for atrial fibrillation using radiofrequency catheter ablation: assessment of results at one year. *Eur J Cardiothorac Surg*, 15(6), 851-854, 1999.
- [19]. Sie, H.T., Beukema W.P., Elvan A., Ramdat Misier A.R. New strategies in the surgical treatment of atrial fibrillation. *Cardiovasc Res*, 58(3), 501-509, 2003.
- [20]. Oral H., Morady F. Ablation of atrial fibrillation. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 15(1), 112-113, 2004.
- [21]. González-Torrecilla E., Arenal A., Quiles J., Atienza F., Jiménez-Candil J., del Castillo S., Almendral J. La cartografía electroanatómica no fluoroscópica (sistema CARTO) en la ablación de las taquicardias auriculares. *Rev Esp Cardiol*, 57(1), 37-44, 2004.