

Validación de un algoritmo para el cálculo automático de la distancia inter lesión en la ablación por catéter de radiofrecuencia de Fibrilación Auricular

F. Setién Dodero¹, F. Fanjul Vélez¹, J. L. Arce Diego¹

¹ Grupo de Ingeniería Biomédica, Departamento de Tecnología Electrónica e Ingeniería de Sistemas y Automática (TEISA), Universidad de Cantabria, Av. de los Castros 46, 39005 Santander, España

fanjul@unican.es, arcedj@unican.es

Resumen

La Fibrilación Auricular (FA) es un trastorno del ritmo cardíaco caracterizado por contracciones auriculares rápidas e irregulares, que puede aumentar el riesgo de accidente cerebrovascular (ACV) y disminuir la calidad de vida de los pacientes. Una de las técnicas principales para tratar la FA es la ablación con catéter de RF, que implica aislar eléctricamente las venas pulmonares del resto de la aurícula, a base de lesiones puntuales rodeando las venas. Todavía existe discusión en la comunidad sobre cuál es la distancia entre lesiones óptima para mejorar los resultados a largo plazo de la ablación de FA. Se ha desarrollado una herramienta en Python que, partiendo de los datos del procedimiento de ablación de FA, encuentra la secuencia óptima de ablaciones que rodea a las venas pulmonares y de esta forma puede calcular la distancia entre toda la secuencia de lesiones. El algoritmo automatizado demostró ser efectivo en la mayoría de los casos y en casi la totalidad de los casos de forma semiautomática. El trabajo deja disponible una herramienta para la comunidad que puede ayudar a la hora de optimizar la ablación de FA. En el futuro se podría mejorar el algoritmo para que fuera 100% automático, aunque ahora mismo ya es de utilidad y existen varios estudios clínicos que están en marcha utilizando esta herramienta.

1. Introducción

1.1. La Fibrilación auricular

La fibrilación auricular (FA) es un trastorno del ritmo cardíaco caracterizado por contracciones rápidas e irregulares. En condiciones normales, el corazón late de manera regular y coordinada, con un patrón de contracciones rítmicas que permiten que la sangre circule eficientemente por todo el cuerpo. Sin embargo, en la FA, las señales eléctricas que controlan el ritmo cardíaco se vuelven caóticas, lo que resulta en una actividad auricular desorganizada y rápida. Durante un episodio de FA, las aurículas no se contraen de manera efectiva, lo que puede llevar a la formación de coágulos sanguíneos en el corazón. Estos coágulos pueden desprenderse y llegar a órganos importantes como el cerebro, donde pueden causar un accidente cerebrovascular (ACV) o ictus.

La FA afecta a un 4,4% de la población mayor de 40 años y a un 8,5% de la población mayor de 60 años, multiplica entre 1,5 y 3,5 el riesgo de muerte y es la causa principal de entre un 20%-30% de los ICTUS. Existe tratamiento farmacológico, pero este fracasa hasta en un 80% de los casos, en consecuencia, para evitar accidentes vasculares

se anti-coagula a los pacientes, lo que a su vez resulta complicado y no está exento de riesgos. Aunque todavía se desconocen las causas fisiológicas exactas que la desencadenan, se conocen dos principios sobre la enfermedad:

- Cuando la aurícula entra en FA pierde contractilidad, lo que con el tiempo produce dilatación auricular, esta dilatación modifica las propiedades eléctricas del tejido cardíaco favoreciendo que la FA se mantenga[1]
- Haïssaguerre [2] descubrió que con frecuencia los disparadores originales de la FA se encuentran en los ostiums de las venas pulmonares y eso dio inicio a la ablación con catéter de la FA. Se sabe también que hay otros focos extra pulmonares, aunque de menor relevancia [3]

En una situación normal, el ritmo del corazón lo marca el nodo sinusal, que está compuesto de unas células especializadas para tal propósito. Después la actividad eléctrica se propaga por todo el corazón proporcionando un latido sincronizado. En ocasiones, puede haber células localizadas en cualquier parte del miocardio, que se exciten y produzcan un latido de forma similar al propio nodo sinusal. En los ostiums de las venas pulmonares se produce una transición de tejido entre el cardíaco y el venoso, y es precisamente allí donde es frecuente que se generen estos latidos ectópicos que pueden arrancar un episodio de FA.

1.2. Ablación con catéter

El objetivo actual del tratamiento no farmacológico consiste en el aislamiento eléctrico de las venas pulmonares del resto de la aurícula. Existen diferentes técnicas para realizar este aislamiento y la ablación con catéter de radiofrecuencia (RF) es una de las más habituales. También se puede realizar con balones de crioablación, balones láser, de forma quirúrgica o con catéteres de electroporación. En la ablación por catéter se introduce un catéter de poliuretano y mallado de acero en la vena femoral y se accede hasta al corazón. Se necesita realizar punción transeptal, para poder pasar del lado derecho del corazón al lado izquierdo. Los catéteres se pueden deflectar para moverse libremente por la cavidad, la punta de 3,5mm de platino permite aplicar energía de radiofrecuencia sobre el tejido. La ablación se produce de forma térmica, cuando

la corriente de radiofrecuencia atraviesa el tejido cardiaco, se calienta produciéndose muerte celular cuando el tejido supera los 50°C de temperatura [4]. Es necesario realizar varias aplicaciones de forma precisa y circular para aislar la vena pulmonar del resto de la aurícula.

1.3. Navegadores

El movimiento del catéter dentro del corazón del paciente tradicionalmente se realizaba apoyado por fluoroscopia, una técnica que permite ver en tiempo real la posición del catéter utilizando rayos-X. La principal desventaja de esta técnica, más allá de utilizar radiaciones ionizantes, es que solo permite visualizar una imagen en dos dimensiones.

La ablación de los ostiums de las venas pulmonares en la aurícula izquierda requiere de una visualización más precisa. Para este propósito y otros se desarrollaron los Navegadores electro-anatómicos (Figura 1). En la punta de los catéteres se sitúa un sensor de posicionamiento magnético, que permite tanto la visualización del catéter como la reconstrucción de mapas del interior cardiaco con información eléctrica del miocardio. Durante todas las aplicaciones de RF se graban la posición, la fuerza, temperatura y demás parámetros de la ablación.



Figura 1: Mapa de una aurícula izquierda con el navegador Carto3 y las lesiones de radiofrecuencia rodeando a las venas pulmonares.

2. Antecedentes y Motivación

El Haddad M, Taghji P, Philips T, et al. [5] demostraron que las lesiones en la ablación circunferencial de la FA debían ser contiguas para lograr un aislamiento duradero, Mattias Duytschaever [6] propuso y validó el protocolo CLOSE como método para lograr la ablación efectiva y duradera de las venas pulmonares. Esta estrategia se ha visto confirmada en 17 centros en el estudio VISTAX [7]. En este estudio se sacaron del protocolo aquellos pacientes que no cumplían el criterio de >6mm de contigüidad entre lesiones próximas. Desde entonces ha habido poca discusión sobre el tamaño adecuado de la distancia inter-lesión y otros parámetros de la ablación. Hay muy pocos estudios que hayan analizado si una distancia inter-lesión de >5mm puede ser más adecuada que los 6mm del protocolo CLOSE. El procedimiento de evaluación de la distancia inter-lesión automático y accesible para toda la comunidad permitirá analizar grupos grandes de pacientes y posiblemente dar luz a esta cuestión.

2.1. Definición del problema

Aunque la medida de la distancia entre dos lesiones es una operación trivial, no lo es tanto determinar cuál es la siguiente lesión con la que se debe medir la distancia. En una ablación circunferencial el electrofisiólogo trata de realizar una secuencia ordenada de lesiones, pero lamentablemente, el procedimiento es complejo, y muy

pocas veces sucede que todas las ablaciones sigan un orden. Además, en muchas ocasiones se producen zonas donde se repiten las ablaciones por falta de estabilidad o el camino se desvía de la trayectoria esperada. Para poder medir la distancia interlesión necesitamos determinar una secuencia de lesiones contiguas que rodea la vena con saltos tales que se minimice la distancia inter lesión (Figura 2). Lo que implica ignorar aquellas lesiones fuera de la secuencia de distancias mínimas.



Figura 2: Secuencia de lesiones buscada, los números indican el orden en que fueron realizadas las quemaduras.

3. Objetivos

El objetivo de este trabajo es validar un sistema automático de medida de la distancia inter-lesión. Este sistema requiere de un algoritmo que encuentre la secuencia de ablaciones contiguas de forma circular y permitirá estudiar el efecto de la distancia inter-lesión en el éxito de la ablación de FA.

4. Métodos

A continuación se describe la metodología seguida en el trabajo, desde la selección de pacientes hasta la descripción de la herramienta implementada.

4.1. Selección de pacientes y ablación

Se utilizaron datos provenientes de dos Hospitales diferentes: en el primer Hospital se analizaron 227 ablaciones de FA tanto paroxística como persistente. Los procedimientos se realizaron según protocolo CLOSE, ablaciones circunferenciales con una distancia interlesión objetivo de 6mm, en unos pocos pacientes se realizaron ablaciones adicionales del istmo cavo-tricúspide y de la vena cava superior; en el segundo Hospital se analizaron 450 ablaciones de FA tanto paroxística como persistente. En este grupo de ablaciones se juntaron diversas técnicas de ablación:

- Protocolo CLOSE con una distancia interlesión objetivo de 6mm.
- Aislamiento circunferencial de las venas con la técnica de *dragging* (desplazamiento continuo del catéter). En este caso se etiqueta una lesión nueva cada vez que el desplazamiento supera los 4mm.
- Líneas adicionales, en función del paciente se añade a la ablación circunferencial una o varias líneas como: línea de techo, línea anterior (entre la válvula mitral y la vena superior derecha) y línea de box posterior (entre las venas inferiores)

Se extrajeron los datos del Navegador Carto3, que proporciona la posición y el valor de la lesión en cada punto en un fichero separado por comas (csv).

4.2. Herramienta construida

Para medir la distancia interlesión se realizó un software en Python con las conocidas librerías de computación científica y aprendizaje automático: Pandas, Numpy, Sklearn, Scipy y Matplotlib. Para crear una interfaz semi automática se utilizó la librería Tkinter. La herramienta construida ejecutaba la siguiente secuencia de pasos:

- Eliminar lesiones sobrantes (opcional o semi-automática), se pueden eliminar aquellas lesiones que vayan a dificultar los siguientes pasos.
- Agrupación (automática o semi-automática), se separan las dos coronas y las posibles líneas.
- Búsqueda de la secuencia (automática o semi-automática)
- Cálculo de la distancia interlesión (automática)

4.3. Agrupación de las coronas

La ablación de FA como mínimo consiste en realizar dos coronas, una izquierda y otra derecha, además de otras posibles líneas. El primer paso es separar las dos coronas y las posibles líneas. Para esta labor utilizamos el algoritmo Kmeans, que en el caso de dos coronas funciona correctamente un 100% de las veces. Cuando existen líneas adicionales no siempre es así dificultando los pasos posteriores (Figura 3).

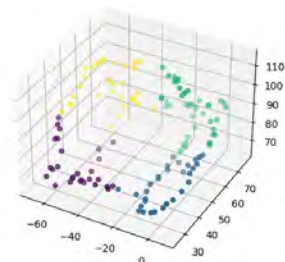


Figura 3: Kmeans no es capaz de diferenciar las líneas de las coronas

4.4. Buscando la secuencia

4.4.1 El camino más corto

El problema de la búsqueda del camino más corto entre dos puntos es un problema muy estudiado en teoría de grafos y existen varios algoritmos que lo solucionan como Algoritmo de Dijkstra, Algoritmo de Bellman - Ford, Algoritmo de Floyd - Warshall o el Algoritmo de Johnson [8]–[9].

Sin embargo, el problema del camino más corto circular no es un problema clásico de la computación. Existen autores como M. J. Atallah [10] que sugieren soluciones eficientes con un cambio a coordenadas polares.

Una solución más sencilla, es ejecutar cualquier algoritmo del camino más corto dos veces, una para el viaje de ida y otra para la vuelta de forma que se genere un camino circular. Esta es la solución que hemos adoptado.

4.4.2 La función distancia

Si directamente creamos un grafo con todas las lesiones y utilizamos la distancia geométrica, los algoritmos de

camino más corto no resolverán nuestro problema. La distancia más corta es siempre la línea recta, pero nosotros queremos buscar la distancia más corta pasando por encima de todas las lesiones, para obtener así una secuencia (Figura 4).

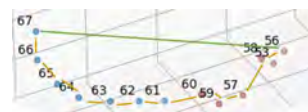


Figura 4: Camino más corto la línea recta en verde, camino buscado en naranja.

La modificación que realizamos es elevar a un exponente la distancia geométrica, para que de esta forma la suma de distancias pequeñas sea más corta que un solo salto grande.

Después de realizar varias pruebas afinando el algoritmo se decidió utilizar el algoritmo de Floyd–Warshall con la siguiente definición de distancia:

- Las distancias menores de 3mm, se consideran 0mm. Esto evita excesivos saltos cuando se acumulan las lesiones por falta de estabilidad.
- La distancia en general es la distancia lineal elevada al 5 exponente. Subir el exponente más no tenía ningún efecto y con exponentes menores en ocasiones “saltaba lesiones”.
- Si la distancia es mayor de un límite (12mm), se considera infinita. Distancias mayores no tenían sentido en el problema y de esta forma reducíamos el trabajo del algoritmo.

4.4.3 La selección de los puntos iniciales

Para crear un camino circular realizamos la siguiente secuencia:

1. Escogemos un punto inicial y un punto final.
2. Buscamos la secuencia del punto inicial al final.
3. Borrarnos del grafo todos los puntos (lesiones) por los que hemos pasado.
4. Buscamos la secuencia del punto final a la inicial.

En general casi cualquiera pareja de puntos iniciales y finales sirve para el propósito. Solo no son adecuados, aquellos puntos que van a quedar fuera de la secuencia óptima circular. En las primeras pruebas probamos con los dos puntos más alejados de la corona con el objetivo de balancear el número de puntos en cada semi-trayecto. Resultó que con mucha frecuencia los puntos más alejados entraban dentro de los pocos que no estaban en la secuencia óptima. Intentamos buscar alternativas como puntos que estaban a un porcentaje de la distancia máxima, pero finalmente no fuimos capaces de encontrar una solución mejor que establecer los puntos iniciales de forma aleatoria. En caso de fallo, se puede reintentar el algoritmo de forma semiautomática.

5. Resultados

Se realizaron sucesivas ejecuciones del algoritmo, en una primera ejecución se procesaron los datos de forma automática, supervisados por un operador solo para

comprobar el nivel de éxito alcanzado. En el caso de que el funcionamiento no fuera correcto, se realizaba una segunda ejecución de forma semiautomática. En esta segunda ejecución, se podían borrar lesiones o establecer los puntos iniciales, final y algunos intermedios para la búsqueda del camino circular (Tabla 1).

5.1. Validación del algoritmo

En el 94% de los casos del grupo 1 y el 73% de los casos del grupo 2, el algoritmo realizó correctamente la segmentación de ambos círculos de ablación y determinó la secuencia de las lesiones de ablación de forma totalmente automática. Solo en tres de los casos (0,4%) no fue posible encontrar la secuencia de lesiones ni siquiera de forma semiautomática. Si bien es cierto que la calidad de las lesiones de estos casos, básicamente una nube de puntos, les excluiría de cualquier estudio clínico con mucha probabilidad.

Grupo	Éxito automático	Éxito semi-automático	Fallo	Total
Grupo 1	214	12	1	227
Grupo 2	328	120	2	450

Tabla 1: Resultados del algoritmo

5.2. Análisis de los errores

Tan solo tres orígenes explicaban la mayor parte (99,6%) del fallo del algoritmo automático:

1. La selección incorrecta de los puntos iniciales.
2. Las líneas de ablación contiguas a las coronas
3. Agrupaciones de lesiones o bucles, habitualmente en la parte inferior de las venas.

Todos los problemas se pueden mitigar con facilidad en la ejecución semiautomática. El primero de los problemas es trivial, y basta con ejecutar de nuevo el algoritmo y dejar que escoja otros puntos iniciales. Para evitar que el camino siga líneas de ablación, basta con no seleccionar ningún punto inicial en las líneas. Se puede repetir la ejecución hasta que funcione correctamente o seleccionar los puntos directamente. Finalmente, para evitar los bucles en las aglomeraciones de lesiones, es necesario marcar puntos intermedios y de esta forma evitar que el algoritmo entre y salga de estas creando un lazo (Figura 5).

6. Conclusión

Este trabajo muestra el proceso para utilizar un algoritmo semi-automático para medir la distancia interlesión de un procedimiento de ablación de FA y además lo deja disponible para la comunidad [11]. Este dato es importante para optimizar el procedimiento de ablación con catéter de RF, dado que aún no existe todavía un valor óptimo para la eficacia y la eficiencia. Aún no es posible utilizarlo de forma 100% automática, aunque en la mayoría de las ocasiones el operador no tendrá nada más que aceptar los resultados.



Figura 5: La secuencia esperada (naranja) se ve frustrada por una acumulación de lesiones (verde), sucede con cierta frecuencia en la parte inferior de las venas.

Agradecimientos

Este Trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto del Plan Nacional de I+D+i “Cribado diagnóstico de microorganismos mediante microscopia avanzada e inteligencia artificial en patologías humana” (PID2021-127691OB-I00), del Ministerio de Ciencia e Innovación, cofinanciado con fondos FEDER.

Referencias

- [1] cardiofamilia.org, «Fisiopatología de la fibrilación auricular». Cátedra de Terapias Avanzadas en Patología Cardiovascular.
- [2] D. C. Shah, M. Haïssaguerre, y P. Jaïs, «Catheter ablation of pulmonary vein foci for atrial fibrillation: PV foci ablation for atrial fibrillation.», *Thorac Cardiovasc Surg*, vol. 47 Suppl 3, pp. 352-356, ago. 1999, doi: 10.1055/s-2007-1013198.
- [3] W.-S. Lin *et al.*, «Catheter ablation of paroxysmal atrial fibrillation initiated by non-pulmonary vein ectopy.», *Circulation*, vol. 107, n.º 25, pp. 3176-3183, jul. 2003, doi: 10.1161/01.CIR.0000074206.52056.2D.
- [4] E. H. David, «Biophysics and Pathophysiology of Radiofrequency Lesion Formation», en *Catheter Ablation of Cardiac Arrhythmias*, 2019.
- [5] M. El Haddad *et al.*, «Determinants of Acute and Late Pulmonary Vein Reconnection in Contact Force-Guided Pulmonary Vein Isolation: Identifying the Weakest Link in the Ablation Chain.», *Circ Arrhythm Electrophysiol*, vol. 10, n.º 4, p. e004867, abr. 2017, doi: 10.1161/CIRCEP.116.004867.
- [6] P. Taghji *et al.*, «Evaluation of a Strategy Aiming to Enclose the Pulmonary Veins With Contiguous and Optimized Radiofrequency Lesions in Paroxysmal Atrial Fibrillation: A Pilot Study.», *JACC Clin Electrophysiol*, vol. 4, n.º 1, pp. 99-108, ene. 2018, doi: 10.1016/j.jacep.2017.06.023.
- [7] M. Duytschaever *et al.*, «Standardized pulmonary vein isolation workflow to enclose veins with contiguous lesions: the multicentre VISTAX trial.», *Europace*, vol. 22, n.º 11, pp. 1645-1652, nov. 2020, doi: 10.1093/europace/eaab157.
- [8] R. Bellman, «ON A ROUTING PROBLEM», *Quarterly of Applied Mathematics*, vol. 16, pp. 87-90, 1958.
- [9] E. W. Dijkstra, «A note on two problems in connexion with graphs», *Numerische Mathematik*, vol. 1, n.º 1, pp. 269-271, dic. 1959, doi: 10.1007/BF01386390.
- [10] M. J. Atallah, D. Z. Chen, y D. T. Lee, «An optimal algorithm for shortest paths on weighted interval and circular-arc graphs, with applications», en *Algorithms—ESA '93*, T. Lengauer, Ed., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1993, pp. 13-24.
- [11] «Herramientas para investigación con los datos del navegador Carto3». <https://github.com/nomine555/cartools>