



MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Fundamentos de Biofísica

Método FEM

En esta práctica se va a visualizar los resultados del problema directo de la electrofisiología cardíaca mediante una aproximación del modelo bidominio implantada con el método de los elementos finitos, siendo el objetivo principal ver cómo afecta tanto la misotropía del tejido cardíaco como la heterogeneidad del torso en los patrones de propagación y en el electrocardiograma con la ayuda del script de Matlab *menuBidominio.m*.

Enrique Almazán Sánchez and Víctor Miguel Álvarez Camarero

Contenido

Lab.a 2

Lab.b 7

Lab.c 10

Lab.d 12

Introducción

Antes de comenzar con la práctica, es importante destacar que el modelo del corazón utilizado está solo compuesto por las aurículas, es decir que no presenta ni ventrículos, ni demás componentes de un corazón real. Esto quiere decir que no se va a ver un ECG clínico completo o real, teniendo en las derivaciones estándar y precordiales información relacionada solamente con las aurículas (ondas P, sin la presencia del complejo QRS, onda T u onda U).

Además, se van a nombrar dos tipos de tejidos, anisótropo (considerado lo normal en una persona sin patologías) e isótropo. Como se puede ver en la *Ilustración 1*, las flechas que aparecen en cada una de las imágenes representan la dirección de propagación preferente del estímulo eléctrico.

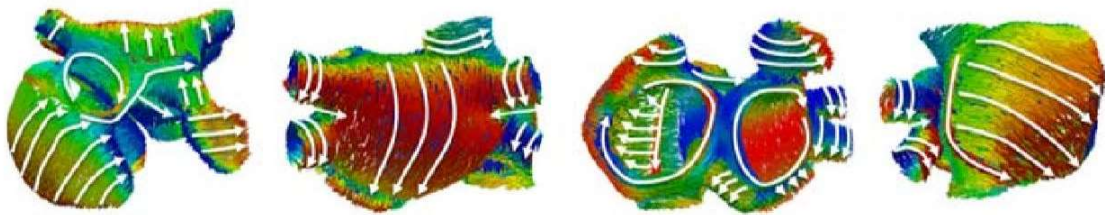


Ilustración 1: Dirección de propagación preferente del estímulo eléctrico.

En caso de estar en presencia de tejido anisótropo la dirección preferente es en el eje longitudinal de la fibra, es decir que es mucho más rápida la propagación a lo largo de la flecha que en dirección transversal a ella. Sin embargo, con tejido isótropo, esta preferencia se pierde, tendiendo el estímulo a propagarse igual en todas las direcciones de la fibra.

También se pueden presentar imágenes de las diferentes regiones de la aurícula:

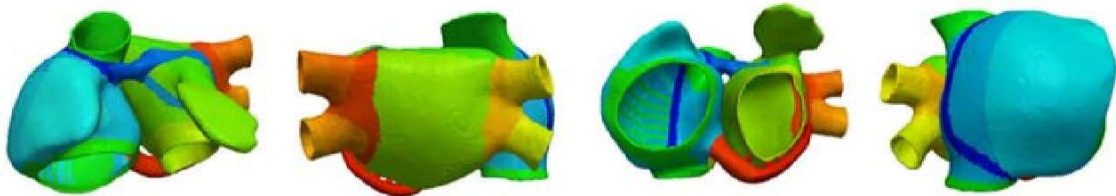


Ilustración 2: Regiones de la aurícula

y de los haces de conducción preferente (zonas por las que el estímulo se propaga con mayor velocidad que en el resto de las regiones, tanto en tejido anisótropo como isótropo):

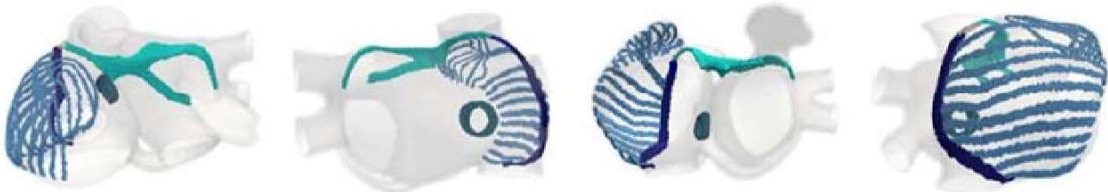


Ilustración 3: Haces de conducción preferente (músculos pectíneos, haz de Bachmann, y crestas terminales).

Lab.a

Visualización del ritmo sinusoidal. Ejecute *menuBidominio.m* y seleccione la opción *Sinus Rhythm: Atria*, correspondiente a una propagación normal en ritmo sinusal que comienza en el nodo sinoauricular, en la que se ha tenido en cuenta la anisotropía del tejido.

Antes de comenzar con este ejercicio hay que tener en cuenta que se supone que el tejido es anisótropo, explicado en la introducción.

También, para responder a los siguientes apartados, las siguientes imágenes, las cuales representan el proceso de despolarización auricular, son presentadas:

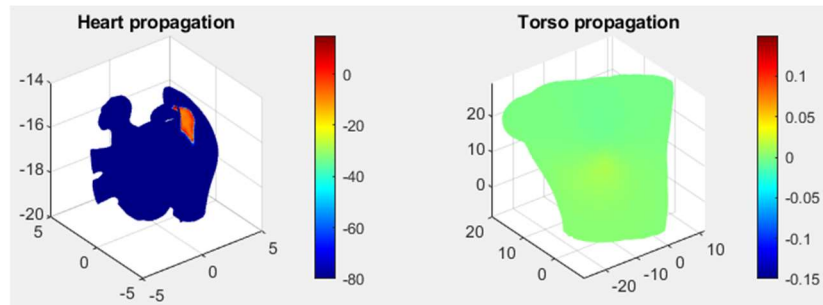


Ilustración 4: Gráfica 1: Primer punto de las aurículas en despolarizarse: nodo sinusal. Gráfica 2: Torso neutro.

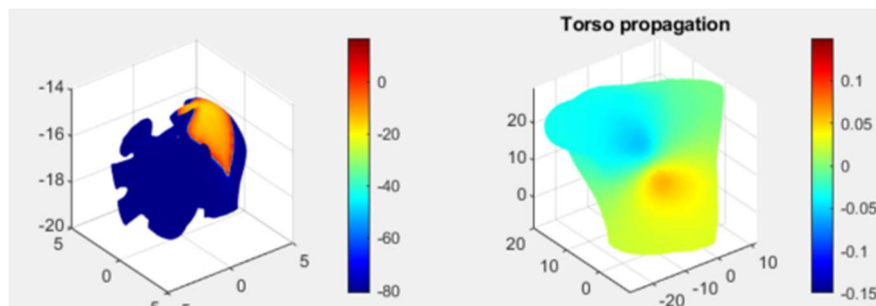


Ilustración 5: Gráfica 1: Propagación hacia la parte superior de la aurícula derecha. Gráfica 2: El torso con dos zonas

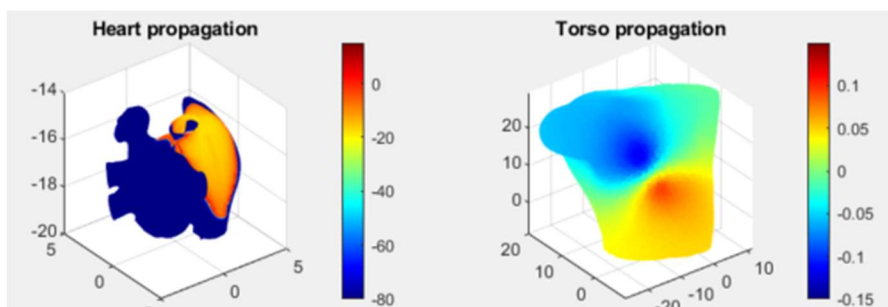


Ilustración 6: Gráfica 1: Propagación hacia la parte inferior de la aurícula derecha. Gráfica 2: El torso con dos zonas

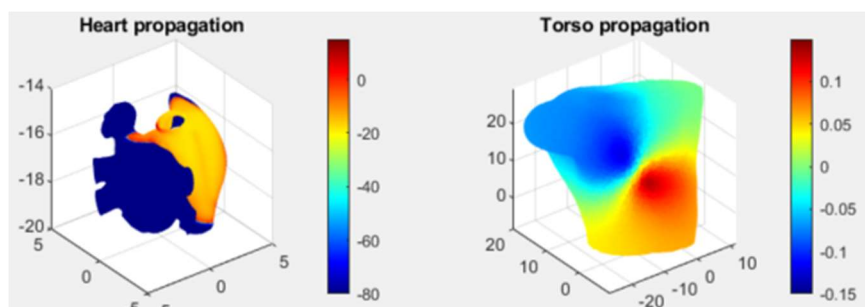


Ilustración 7: Gráfica 1: Propagación hacia la parte izquierda superior de las aurículas. Gráfica 2: torso con dos zonas

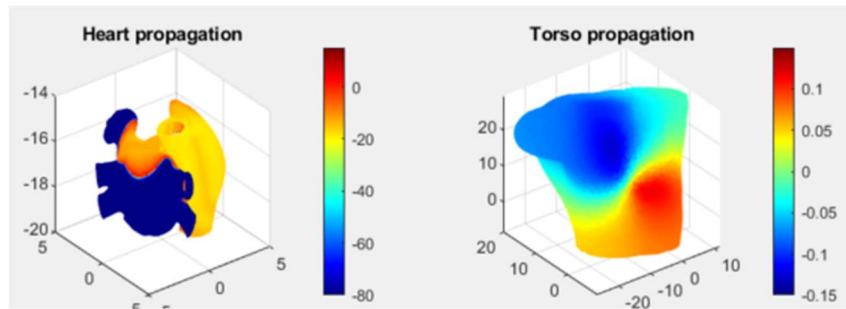


Ilustración 8: Gráfica 1: aurícula derecha totalmente despolarizada y comienzo en la izquierda. Gráfica 2: El torso con dos zonas

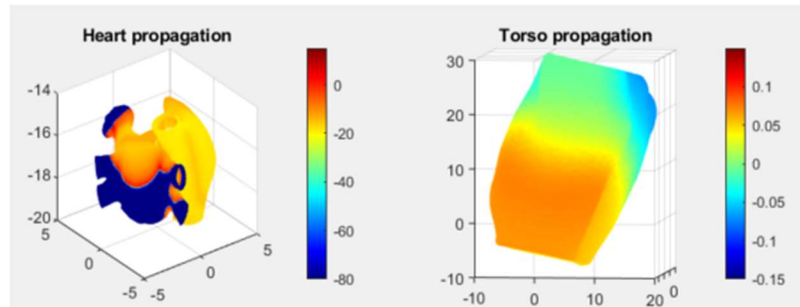


Ilustración 9: Gráfica 1: Propagación hacia las venas pulmonares de la aurícula izquierda. Gráfica 2: El torso visto desde la parte lateral izquierda.

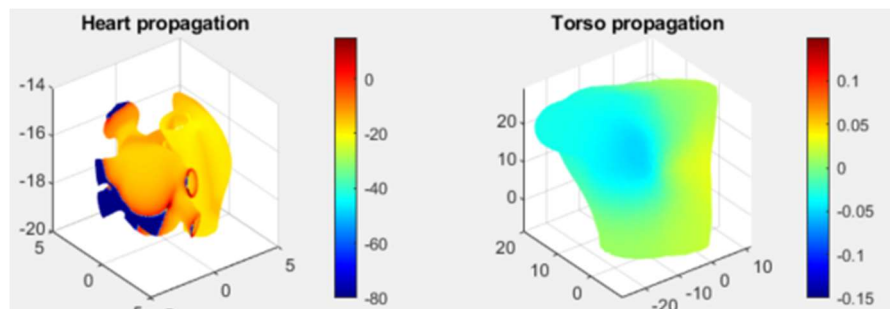


Ilustración 10: Gráfica 1: Propagación hacia las venas pulmonares de la aurícula izquierda. Gráfica 2: El torso en estado neutro.

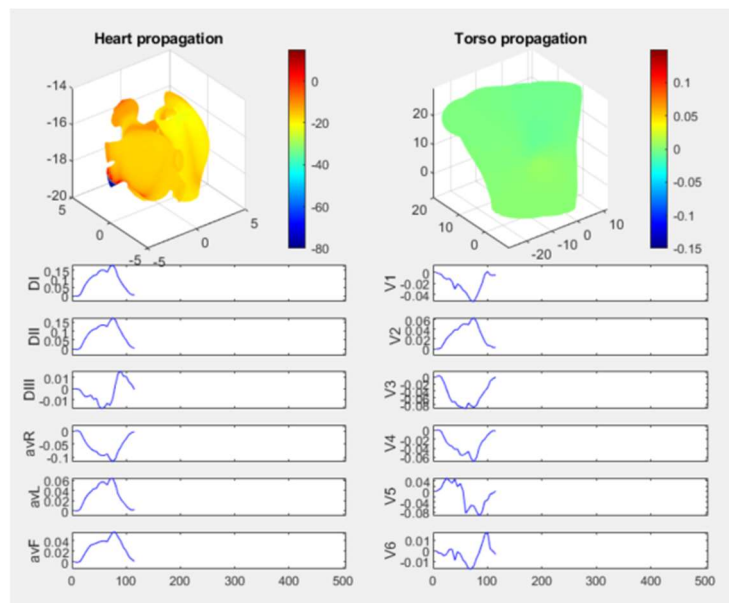


Ilustración 11: Gráfica 1: Último punto de las aurículas en despolarizarse: vena pulmonar inferior. Gráfica 2: El torso en estado neutro. Gráfica 3: ondas P producidas en cada una de las derivaciones estándar y precordiales.

- **Observe el frente de onda de despolarización de las aurículas, y describa la secuencia en la que va llegando a las diferentes partes anatómicas. ¿Dónde se encuentra el último punto de las aurículas en despolarizarse? ¿En qué instante se produce el último tiempo de activación?**

Gracias al script de Matlab (opción Sinus Rhythm: Atria), y atendiendo a las imágenes dadas previamente (en la parte donde se ve el modelo del corazón), se puede observar que la despolarización auricular avanza desde el nodo sinusal (punto donde comienza, *Ilustración 4*), ubicado en la región superior y posterior de la aurícula derecha. Después, al ser tejido anisotrópico (explicado previamente), se ve como se propaga primero (más rápido) hacia la porción tanto superior como inferior, (*Ilustraciones 5, 6 y 7*). Después se puede observar como se propaga lateralmente (*Ilustración 8*), para lograr así la despolarización completa de la aurícula derecha, además de llegar a la aurícula izquierda (*Ilustración 9 y 10*), alcanzando el nodo auriculoventricular, siendo la vena pulmonar izquierda el punto donde acaba (*Ilustración 11*). Esta explicación (a pesar de no haber podido obtener imágenes del script) tiene en cuenta los haces de conducción preferente explicados en la introducción.

Además, en la *Ilustración 11*, al presentar también las ondas P (explicadas en el tercer apartado) de cada una de las derivaciones (estándar a la derecha y precordiales a la izquierda), se puede concluir que el último tiempo de activación ronda los 0.12s, teniendo sentido, ya que, para una persona sin patologías, la despolarización de las aurículas suele tener esa duración.

- **Observe y describa los patrones de propagación sobre el torso, y cómo cambian a medida que avanza el frente de onda de las aurículas.**

Volviendo a centrarse en las imágenes previamente presentadas, siendo esta vez en las gráficas de la derecha, se ve como el torso, cuando empieza la despolarización de las aurículas (*Ilustración 4*), está en un estado neutro. Sin embargo, a medida que esta se propaga (*Ilustraciones 5, 6, 7, 8 y 9*), se va dividiendo en dos zonas, para terminar, volviendo a un estado neutro (*Ilustraciones 10 y 11*).

- La parte que va adquiriendo un tono azul cada vez más oscuro, es aquella de la que se aleja la propagación de la despolarización auricular. Como se puede observar, esta parte se identifica con la zona superior del torso, cercana al hombro.

- La parte que se va enrojeciendo (con toques amarillos), teniendo un tono más oscuro, es aquella a la que se acerca la propagación de la despolarización. Como se puede observar, esta parte corresponde a la zona donde se colocan las derivaciones precordiales, las cuales registran el potencial absoluto del punto donde está colocado el electrodo.

- *Ilustración 4:* Torso en estado neutro al iniciar la propagación de la despolarización auricular.
- *Ilustración 5:* El torso empieza a mostrar dos zonas diferenciadas (previamente explicadas) siendo en este caso la azul clara y amarilla.
- *Ilustración 6:* Ambas zonas se van oscureciendo, además de que la zona que antes era amarilla empieza a obtener un color rojo y más oscuro, lo que significa que la propagación se aleja o acerca a cada una de las respectivas zonas. La zona más roja se identifica con aquella donde se coloca la derivación precordial V1
- *Ilustración 7 y 8:* ambas zonas se van oscureciendo. La zona más roja se identifica con aquella donde se coloca la derivación precordial V2 (*Ilustración 7*), V3 y V4 (*Ilustración 8*).
- *Ilustración 9:* El torso se muestra desde la parte lateral izquierda, debido a que es la zona la cual se empieza a enrojecer, puesto que es la zona a la que se acerca la propagación, ya que es aquella donde se colocan las derivaciones V5 y V6.
- *Ilustración 10 y 11:* El torso vuelve a su estado neutro cuando la propagación de la despolarización de las aurículas llega a su fin.

- **Observe las derivaciones estándar, identifique las ondas P e indique el fin de las mismas. ¿Coincide con el final de la activación de las aurículas? Una vez finalizada la onda P, ¿aparece alguna otra onda en el ECG? En caso afirmativo, ¿a qué se debe? ¿Se observaría un ECG clínico?**

Sabiendo que la onda P en un electrocardiograma representa específicamente la despolarización auricular y con la siguiente imagen, el ejercicio se puede resolver.

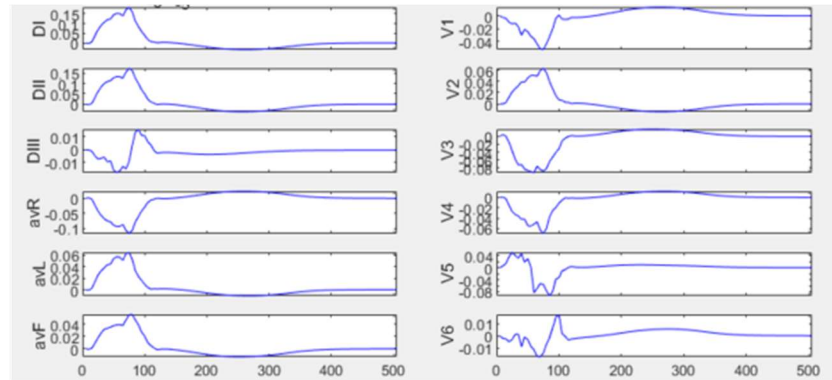


Ilustración 12: Derivaciones estándar (a la izquierda) y precordiales (a la derecha), obtenidos de la opción Sinus Rhythm: Atria.

Como se puede ver en la *Ilustración 9* (o también en la *Ilustración 8*, la cual solo presenta la onda P), presenta las derivaciones estándar (a la izquierda) y precordiales (a la derecha). Centrándonos en las derivaciones estándar, como dice el enunciado, podemos comprobar que las ondas P son aquellas que (en una persona sin patologías) empiezan en $t = 0$ s y acaban entorno a $t = 120$ ms, (es decir que tiene una duración de aproximadamente 0.12 segundos) como bien se puede ver en el script de Matlab.

Además, en el ECG que presenta la opción Sinus Rhythm: Atria, no se puede considerar como un ECG clínico, puesto que, como previamente se ha explicado, el modelo del corazón utilizado solo presenta las aurículas, no los ventrículos. Debido a esto, en la *Ilustración 9*, también se puede ver una onda que representa la repolarización de las aurículas, onda que en un ECG clínico queda oculta por la onda QRS (que representa la despolarización que precede a la contracción de los ventrículos o despolarización ventricular). Esto último se puede observar con mayor precisión en la siguiente imagen:

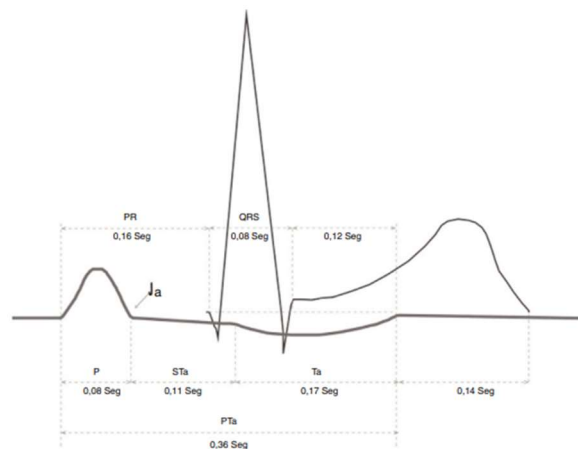


Ilustración 13: Potenciales de acción en el ECG. STa: segmento entre el final de la onda P hasta la onda de repolarización auricular. Ta: onda de repolarización auricular. PTa: sumatorio de STa y Ta. Modificado de Alderete, 1999.

Lab.b

Visualización del ritmo sinusal con tejido auricular isótropo. Seleccione la segunda opción del menú, Sinus Rhythm: Isotropic Atria, correspondiente a una propagación normal en ritmo sinusal que comienza en el nodo sinoauricular, pero en la que se ha considerado el tejido isótropo (no hay conducción preferente en la dirección longitudinal de las fibras musculares).

Antes de comenzar con este ejercicio hay que tener en cuenta que se supone que el tejido es isótropo, explicado en la introducción.

También, para responder a los siguientes apartados, las siguientes imágenes, las cuales representan el proceso de despolarización auricular, son presentadas:

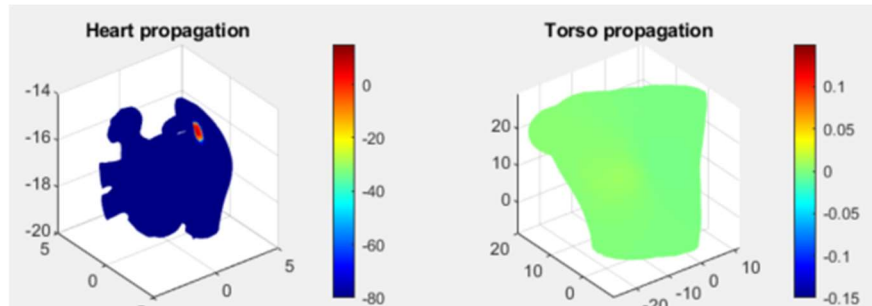


Ilustración 14: Gráfica 1: Primer punto de las aurículas en despolarizarse: nodo sinusal. Gráfica 2: Torso neutro.

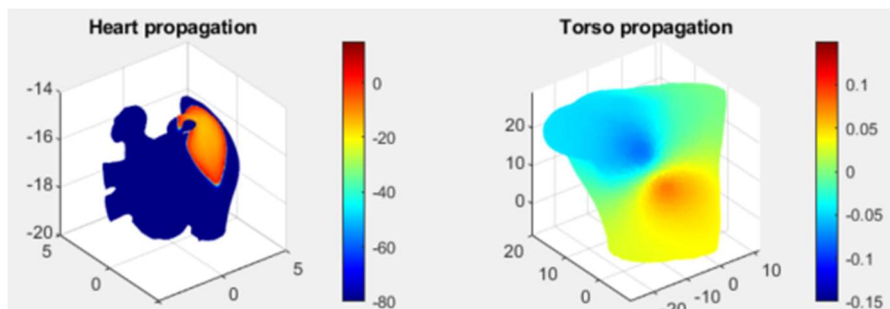


Ilustración 15: Gráfica 1: Propagación hacia la parte media de la aurícula derecha. Gráfica 2: El torso con dos zonas

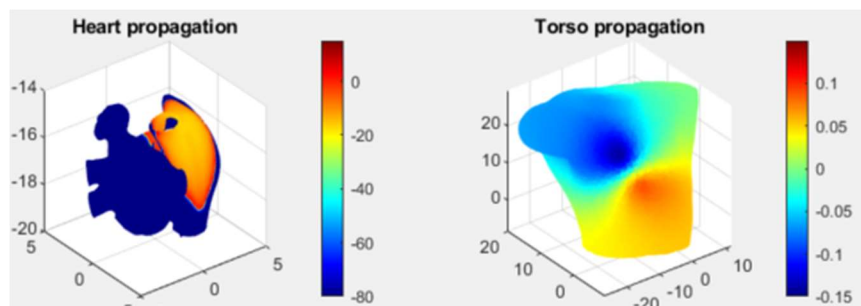


Ilustración 16: Gráfica 1: Propagación hacia la parte inferior de la aurícula derecha. Gráfica 2: El torso con dos zonas

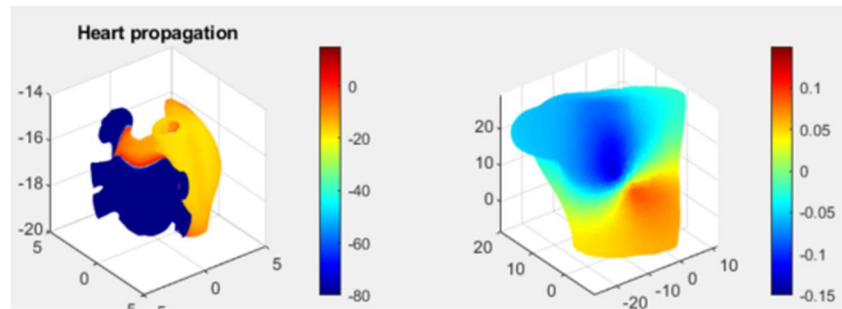


Ilustración 17: Gráfica 1: Propagación hacia la parte izquierda superior de las aurículas. Gráfica 2: torso con dos zonas

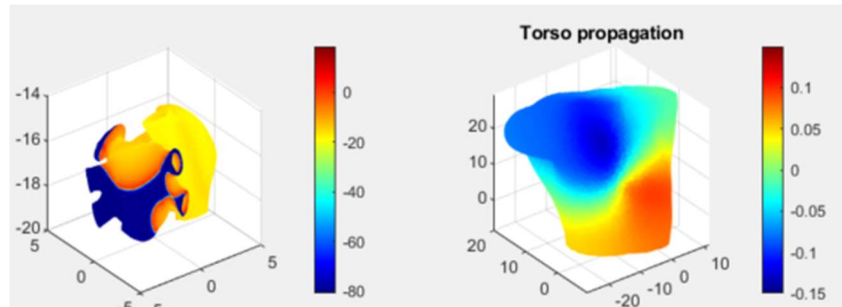


Ilustración 18: Gráfica 1: Propagación hacia las venas pulmonares de la aurícula izquierda. Gráfica 2: torso con dos zonas

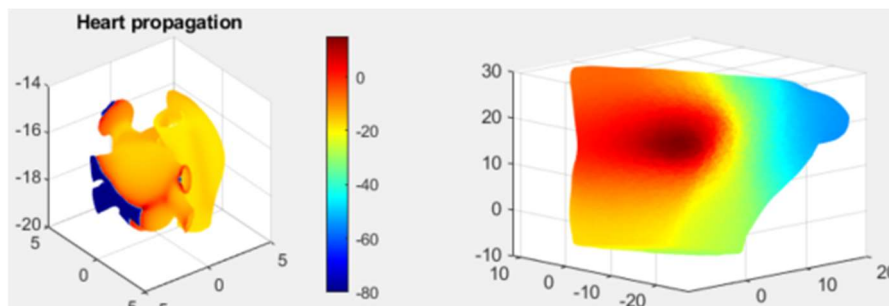


Ilustración 19: Gráfica 1: Propagación hacia las venas pulmonares de la aurícula izquierda. Gráfica 2: El torso visto desde la parte trasera.

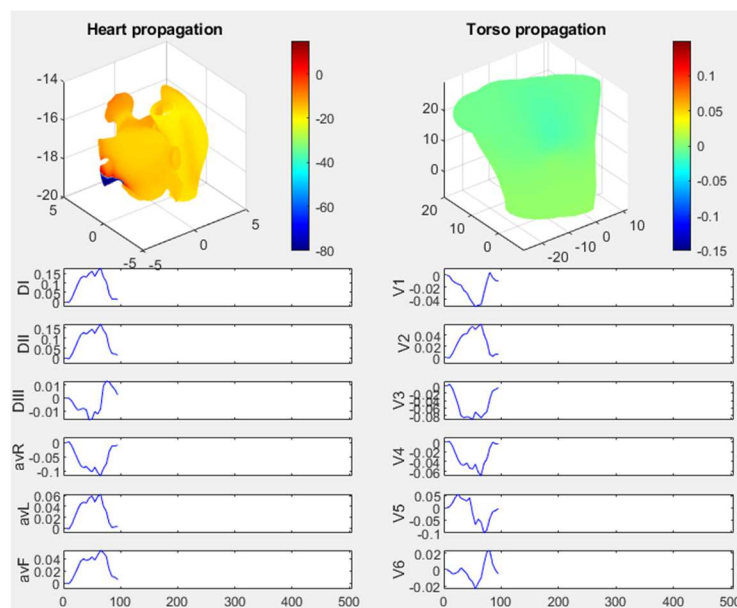


Ilustración 20: Gráfica 1: Último punto de las aurículas en despolarizarse: vena pulmonar inferior. Gráfica 2: El torso en estado neutro. Gráfica 3: ondas P producidas en cada una de las derivaciones estándar y precordiales.

- **Observe el frente de onda de despolarización de las aurículas. ¿Se observa alguna diferencia con respecto a la simulación anterior? ¿Dónde se encuentra el último punto de las aurículas en despolarizarse? ¿En qué instante se produce el último tiempo de activación?**

Observando las imágenes mostradas en este ejercicio y del ejercicio anterior, se puede concluir que, en cuanto a la propagación de la despolarización ventricular, hay algunas diferencias, siendo estas tan sutiles que no se pueden percibir con el ojo. Esto quiere decir, que se entiende que hay diferencias debido a los distintos tejidos en ambos modelos utilizados (anisótropo en el primero e isótropo en el segundo).

Por tanto, la única manera de explicar en que se diferencian ambos tejidos es desde un punto de vista teórico. El proceso de propagación en un tejido isótropo no posee una dirección de preferencia para la propagación, siendo igual de rápido tanto longitudinalmente como transversalmente a las flechas que aparecen en la *Ilustración 1*. Esto no sucede en el tejido anisótropo, ya que su propagación es más veloz en el sentido longitudinal. También cabe destacar, que, en los haces de dirección preferente, tanto en tejido anisótropo como en isótropo, a pesar de las direcciones, son las zonas por las que la propagación es más rápida.

- **¿Se observan cambios en los patrones de propagación sobre el torso?**

En cuanto a las diferencias en el torso, sucede lo mismo que en el apartado anterior. Comparando las imágenes obtenidas de ambos scripts, no se puede observar ninguna diferencia apreciable por el ojo, ya que el proceso que siguen es el mismo, siendo los patrones iguales.

No obstante, al ser dos tejidos con características diferentes, la propagación en el torso tendrá desigualdades, las cuales serán proporcionales a las de estos.

- **¿Se observan cambios en la morfología y/o duración de las ondas P? En caso afirmativo, ¿a qué se debe?**

Sin embargo, a pesar de que no haya diferencias apreciables (en los resultados dados por los scripts de Matlab) en cuanto a la propagación de la despolarización auricular y al torso, centrándose en las ondas P (*Ilustración 11* para el tejido anisótropo e *Ilustración 20* para el tejido isótropo), se puede destacar una diferencia. Las ondas P, referente a su morfología, son más “redondeadas” aquellas mostradas en este ejercicio, mientras que las ondas P del ejercicio previo son más “picudas”.

Además, en relación con su duración, se puede ver que las ondas P en tejido isótropo son más cortas (aproximadamente 0.1 s), que en tejido anisótropo (aproximadamente 0.12 s). La duración se puede ver en las *Ilustraciones 11 y 20*, siempre tomando una aproximación.

Lab.c

Visualización del ritmo sinusal con un torso homogéneo. Seleccione las opciones del menú *Sinus Rhythm: Atria (Homogeneous Torso 1/2/3)*, correspondientes a una propagación normal en ritmo sinusal que comienza en el nodo sinoauricular. En ellas, el tejido auricular conserva su anisotropía, pero a diferencia de los casos anteriores, se ha utilizado un torso homogéneo, es decir, se ha asignado el mismo valor de conductividad a todos los órganos y regiones del torso.

- ¿Se observan cambios en los patrones de propagación sobre el torso con respecto al primer caso visualizado?

Al poseer tejido anisótropo en ambos (como bien indica el enunciado), el patrón de propagación de la despolarización auricular será el mismo en ambos ejercicios.

- ¿Se observan cambios en las ondas P con respecto al primer caso visualizado?

Lo sucedido en la sección anterior vuelve a suceder con las ondas P, ya que al presentar un mismo tejido no habrá unas diferencias muy claras, a pesar de que en cada caso tengan una conductividad distinta para todo el torso.

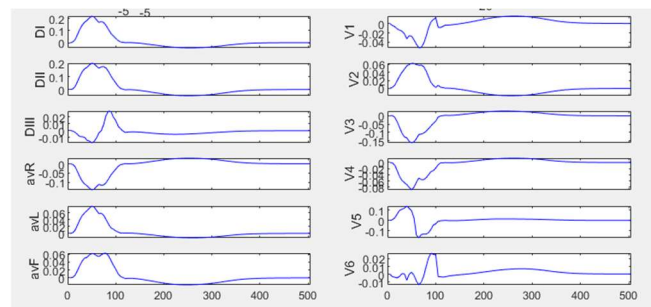


Ilustración 21: Ondas P de la Opción Sinus Rhythm: Atria (Homogeneous Torso 1).

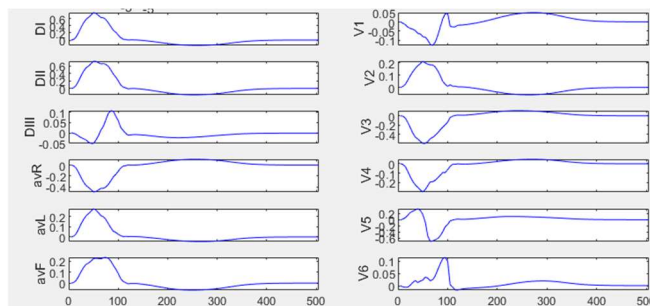


Ilustración 22: Ondas P de la Opción Sinus Rhythm: Atria (Homogeneous Torso 2).

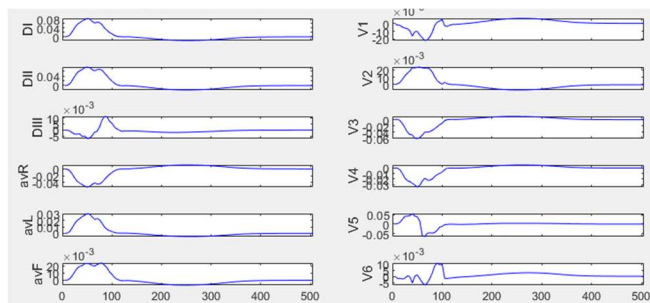


Ilustración 23: Ondas P de la Opción Sinus Rhythm: Atria (Homogeneous Torso 3)

Por tanto, gracias también a las ilustraciones, podemos concluir que, a pesar de tener un torso homogéneo, es decir, que todos sus componentes tengan las mismas conductividades (Lab.c), no se diferenciará mucho de los resultados cuando las conductividades son diferentes (Lab.a). Sin embargo, cabe resaltar que con conductividades muy dispares va a aparecer una onda distorsionada por ruido, mientras que cuando son similares se suaviza.

- ¿Se observan diferencias entre las 3 simulaciones correspondientes al torso homogéneo, las cuales tienen diferentes valores de conductividad entre sí?

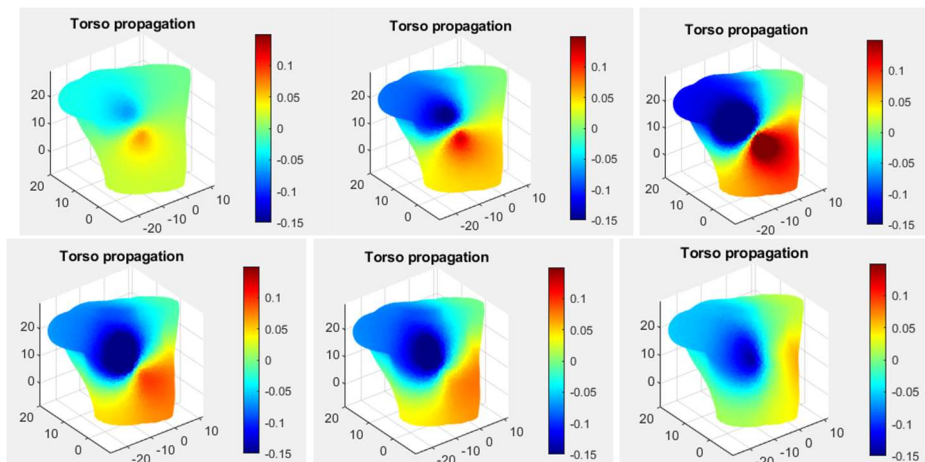


Ilustración 24: Patrón de propagación del torso de la Opción Sinus Rhythm: Atria (Homogeneous Torso 1).

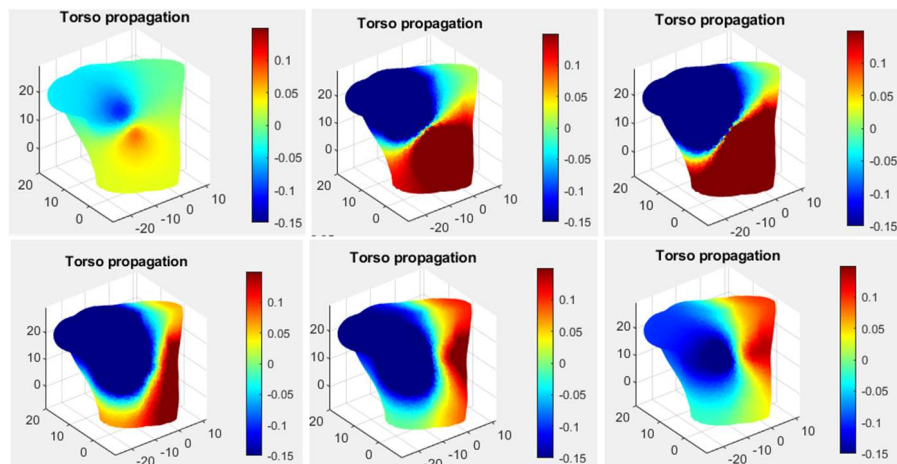


Ilustración 25: Patrón de propagación del torso de la Opción Sinus Rhythm: Atria (Homogeneous Torso 2).

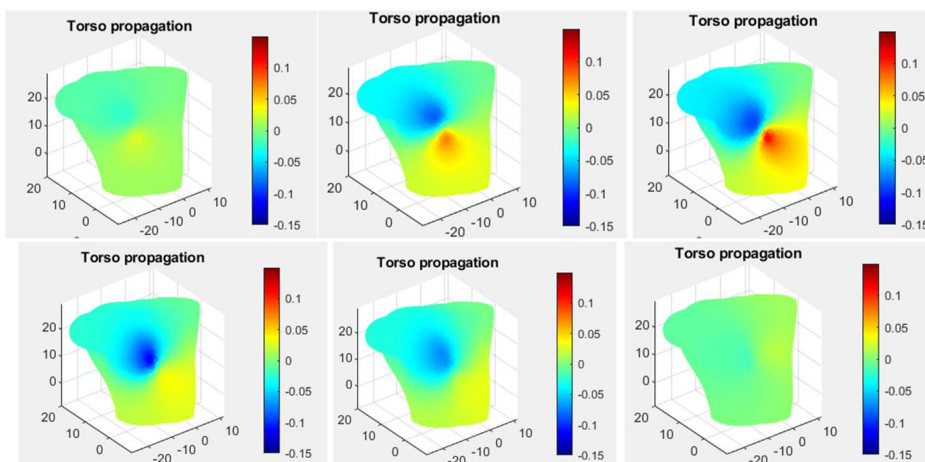


Ilustración 26: Patrón de propagación del torso de la Opción Sinus Rhythm: Atria (Homogeneous Torso 3).

Como se puede observar en las imágenes, las tres opciones presentan grandes diferencias con respecto a las zonas azules (de las que se aleja la propagación) y rojas-amarillas (a la que se acerca la propagación). Esto se debe a la conductividad elegida para cada una de ellas, siendo media la utilizada en la opción 1 (que corresponde a unos patrones de propagación normales (*Ilustración 24*), como aquellos vistos en el Lab.a), alta la utilizada en la opción 2 (que corresponde con patrones de propagación muy exagerados (*Ilustración 25*)) y baja la utilizada en la opción 3 (que corresponde con patrones de propagación muy suaves (*Ilustración 26*)).

Lab.d

Visualización de taquicardia supraventricular. Seleccione la opción del menú *Supraventricular tachycardia: Atria*, correspondiente a una propagación anormal debida a un foco ectópico.

Antes de comenzar con este ejercicio hay que tener en cuenta que la opción *Supraventricular tachycardia: Atria*, simula una taquicardia, por lo que el proceso, tanto en el modelo del corazón (solo con aurículas) como en el torso, se prevé que haya cambios con respecto a los patrones de propagación de la despolarización auricular.

También, para responder a los siguientes apartados, las siguientes imágenes, las cuales representan el proceso de despolarización auricular en presencia de un foco ectópico, son presentadas:

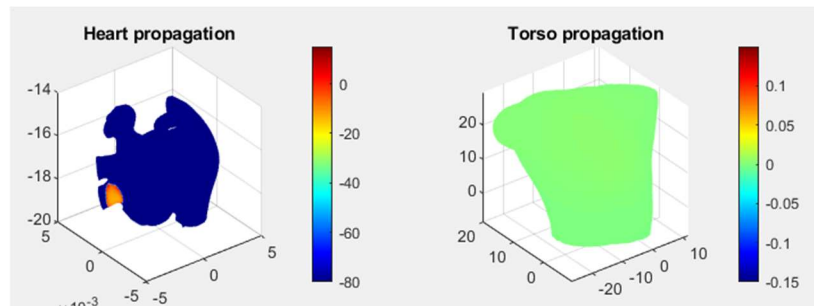


Ilustración 27: Gráfica 1: Primer punto de las aurículas en despolarizarse (con taquicardia): vena inferior pulmonar. Gráfica 2: Torso neutro.

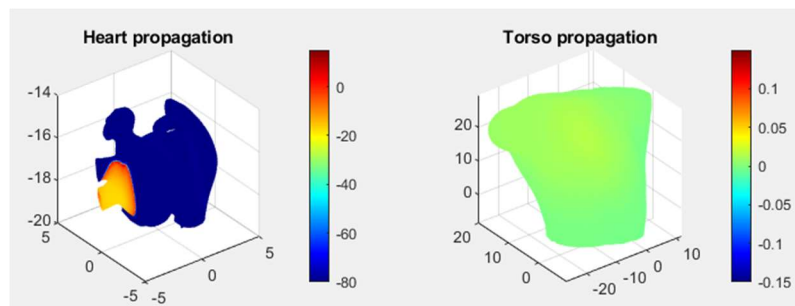


Ilustración 28: Gráfica 1: Propagación de la despolarización auricular con un foco ectópico. Gráfica 2: Torso neutro.

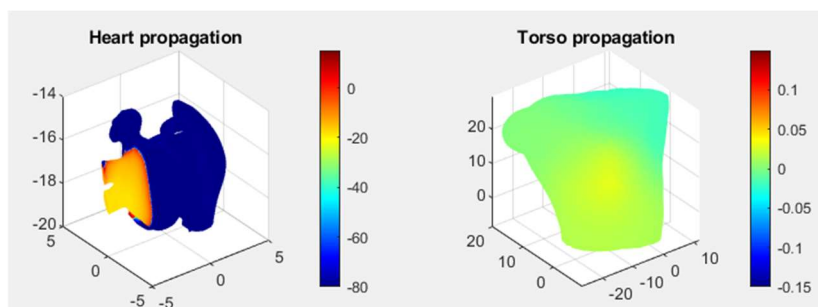


Ilustración 29: Gráfica 1: Propagación de la despolarización auricular con un foco ectópico. Gráfica 2: Torso neutro.

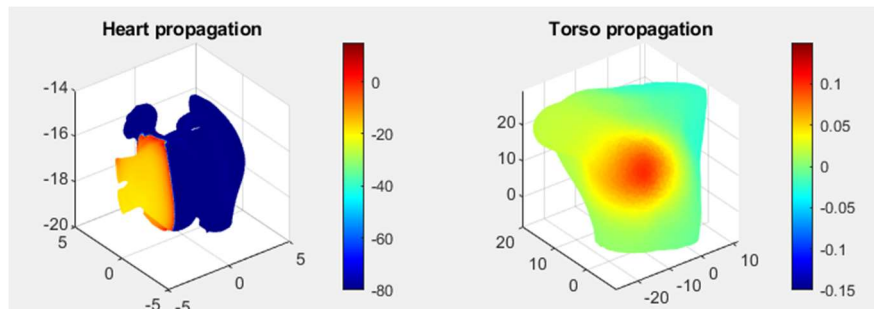


Ilustración 30: Gráfica 1: Propagación de la despolarización auricular con un foco ectópico. Gráfica 2: Torso diferenciado.

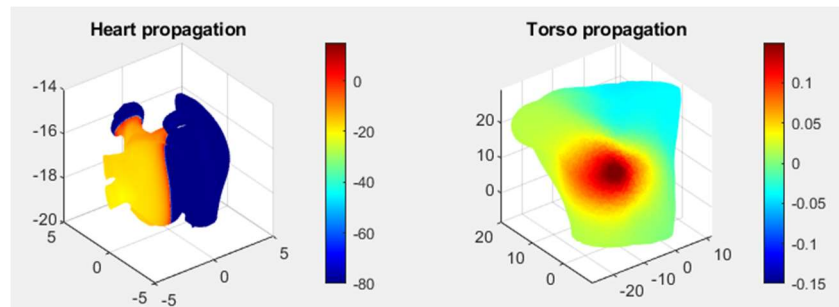


Ilustración 31: Gráfica 1: Propagación de la despolarización auricular con un foco ectópico. Gráfica 2: Torso diferenciado.

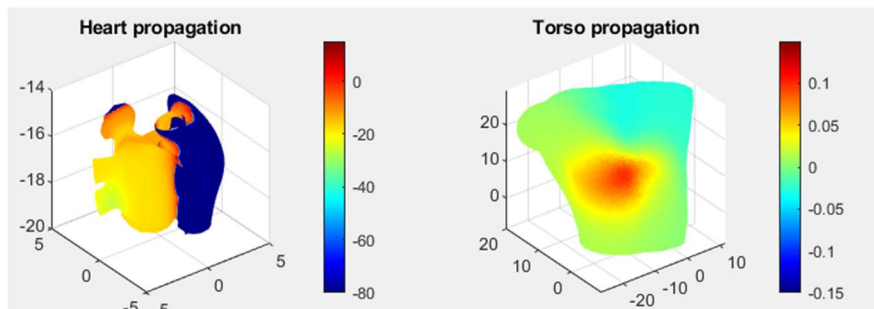


Ilustración 32: Gráfica 1: Propagación de la despolarización auricular con un foco ectópico. Gráfica 2: Torso diferenciado.

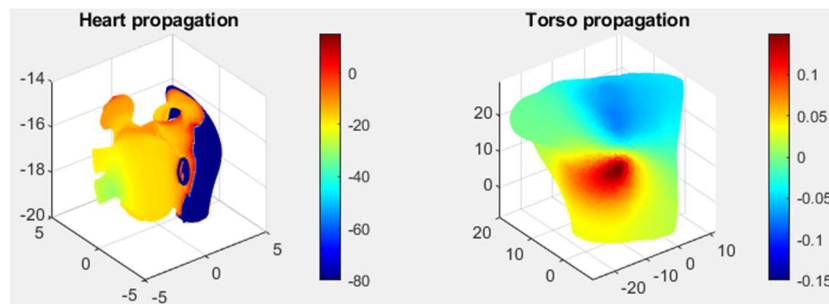


Ilustración 33: Gráfica 1: Propagación de la despolarización auricular con un foco ectópico. Gráfica 2: Torso diferenciado.

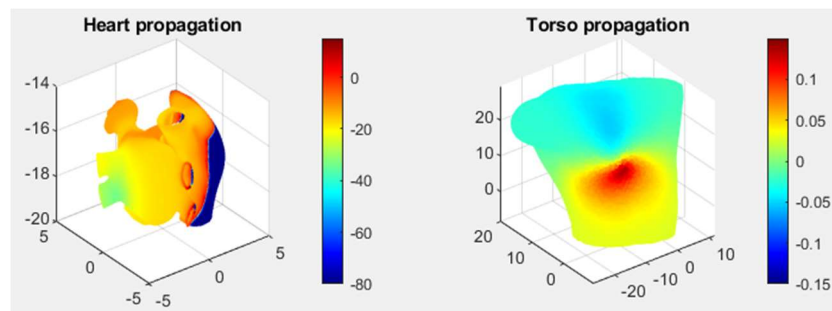


Ilustración 34: Gráfica 1: Propagación de la despolarización auricular con un foco ectópico. Gráfica 2: Torso diferenciado.

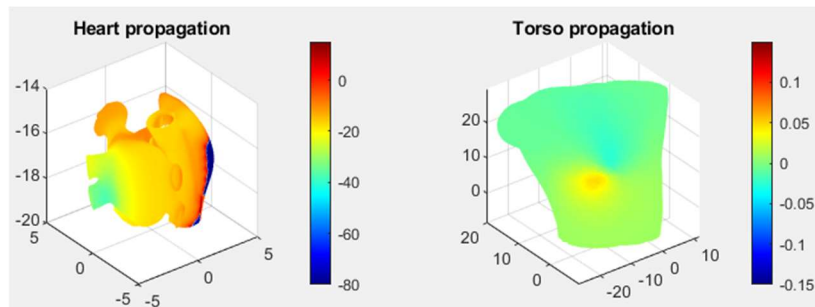


Ilustración 35: Gráfica 1: Propagación de la despolarización auricular con un foco ectópico. Gráfica 2: Torso diferenciado.

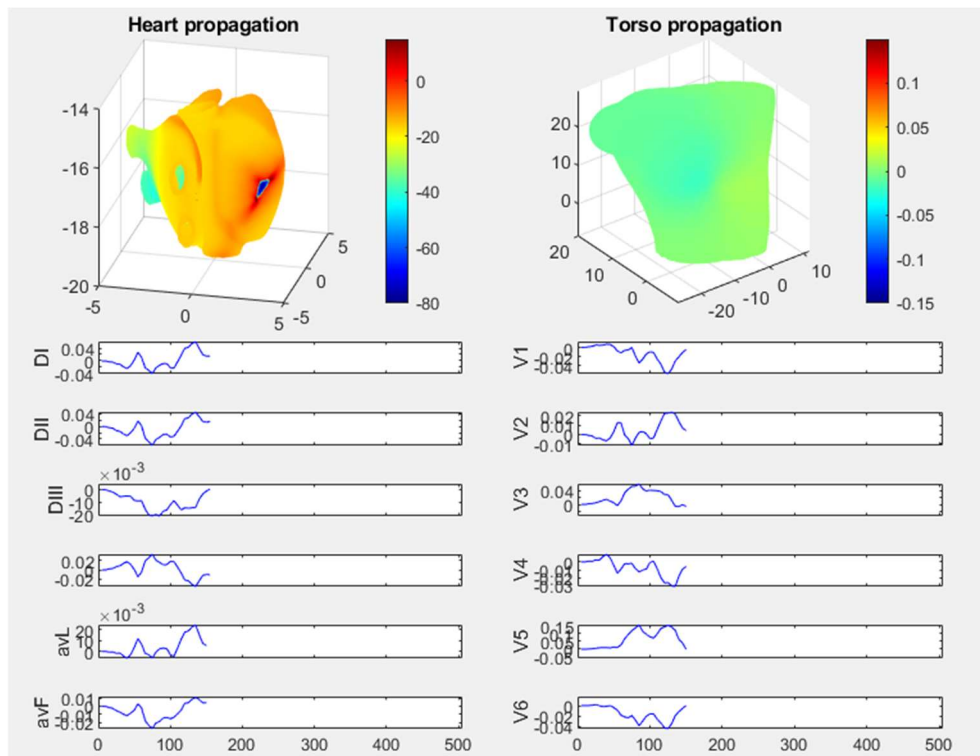


Ilustración 36: Gráfica 1: Último punto de las aurículas en despolarizarse (con taquicardia): nodo sinusal. Gráfica 2: El torso en estado neutro. Gráfica 3: ondas P producidas en cada una de las derivaciones estándar y precordiales (con taquicardia).

- **Observe el frente de onda de despolarización de las aurículas, y describa la secuencia en la que va llegando a las diferentes partes anatómicas. ¿Dónde se encuentra el último punto de las aurículas en despolarizarse? ¿En qué instante se produce el último tiempo de activación? ¿Hay diferencias con respecto a la primera simulación? ¿En qué región de las aurículas se encuentra el foco ectópico?**

Como bien nos indica el enunciado, gracias al script de Matlab (opción *Supraventricular tachycardia: Atria*), y atendiendo a las imágenes dadas previamente (en la parte donde se ve el modelo del corazón), se puede observar que el foco ectópico (contracciones prematuras), el cual se anticipa respecto al ritmo habitual, se encuentra en la vena pulmonar inferior (*Ilustración 27*). Si recordamos los ejercicios anteriores, esta zona era el último punto de las aurículas en despolarizarse, por lo que se supone que el proceso de despolarización en este ejercicio será al revés que el presente en la primera simulación.

Las ilustraciones ayudan a comprobar la suposición antes mencionada. Cuando un paciente presenta taquicardia con un foco ectópico en la vena inferior pulmonar, según este modelo, la despolarización auricular se desplazará hacia la zona superior en inferior (*Ilustraciones 28, 29, y 30*) para continuar lateralmente (*Ilustración 31*) logrando así la despolarización completa de la aurícula izquierda (*Ilustración 32*), además de llegar a la aurícula derecha (*Ilustración 33*). A medida que va avanzando (*Ilustraciones 34, y 35*), llega al último punto de despolarización, siendo este el nodo sinusal (*Ilustración 36*). Esta explicación (a pesar de no haber podido obtener imágenes del script) tiene en cuenta los haces de conducción preferente explicados en la introducción.

Además, en la *Ilustración 36*, al presentar también las ondas P de cada una de las derivaciones (estándar a la derecha y precordiales a la izquierda), se puede concluir que el último tiempo de activación ronda los 0.16 s, ya que se puede ver que esa es su duración aproximadamente.

- **Observe y describa los patrones de propagación sobre el torso. ¿Hay diferencias con respecto a una propagación normal en ritmo sinusal?**

Recordando la teoría, el ritmo sinusal es el ritmo habitual del corazón, naciendo el impulso cardíaco del nodo sinusal y transmitiéndose de forma organizada para que primero se contraigan las aurículas (produciendo las ondas P) para así llenar los ventrículos, y estos luego se contraigan de forma coordinada (produciendo el complejo QRS), para finalmente enviar un volumen de sangre a la circulación periférica. Esta descripción del ritmo sinusal, teniendo en cuenta la parte auricular, se puede observar en la primera simulación (Lab.a). Sin embargo, en esta simulación, donde hay una patología presente (taquicardia), presenta deferencias con respecto a la anterior, puesto que la despolarización de las aurículas, como bien se ha explicado en el apartado previo, es al revés que cuando el corazón tiene el ritmo sinusal, ya que el nodo sinusal es su último punto en despolarizar, no el primero.

Esto quiere decir que la propagación sobre el torso también será al revés que aquella observada en simulaciones anteriores. Volviendo a centrarse en las imágenes previamente presentadas, siendo esta vez en las gráficas de la derecha, se ve como el torso, cuando empieza la despolarización de las aurículas (*Ilustración 27*), está en un estado neutro. Sin embargo, a medida que esta se propaga (*Ilustraciones 28, 29, 30, 31, 32, 33 y 34*), se va dividiendo en dos zonas, para terminar, volviendo a un estado neutro (*Ilustraciones 35 y 36*).

- La parte que va adquiriendo un tono azul cada vez más oscuro (antes explicada), se identifica con la zona superior y superior izquierda, no como en el caso anterior donde se identificaba con la parte superior derecha cerca del hombro.
- La parte que se va enrojeciendo, con toques amarillos, teniendo un tono más oscuro (antes explicada), corresponde a la zona inferior derecha, no como en el caso anterior donde se identificaba con la zona donde se colocan las derivaciones precordiales.

• **¿Se observan cambios en la morfología y/o duración de las ondas P? En caso afirmativo, ¿a qué se deben?**

Como en el resto de los apartados, las ondas P presentaran tanto cambios morfológicos como en la duración debido a la taquicardia (con foco ectópico en la vena inferior pulmonar). Esto se puede apreciar en la siguiente imagen:

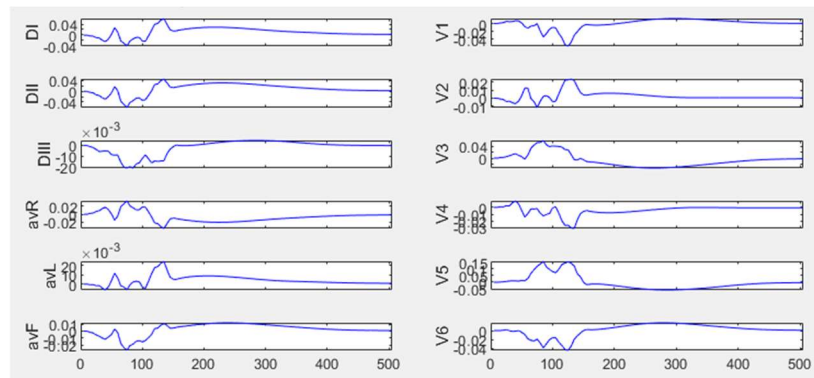


Ilustración 37: Derivaciones estándar (a la izquierda) y precordiales (a la derecha), obtenidos de la opción Supraventricular tachycardia: Atria.

