

VI-DEC (Vídeos Didácticos de Experimentos Científicos) Física

TRABAJO FIN DE GRADO (2014/2015)

Autora: Marta Pueyo Vicente

Tutora: Carmen Palacios Estremera

Departamento de Física y Matemática Aplicada, Facultad de Ciencias

ELECTRICIDAD Y ELECTROCARDIOGRAMA

0. INTRODUCCIÓN

Conceptos básicos de electricidad para entender las deflexiones del potencial que aparecen en un electrocardiograma.

Carga eléctrica. La carga eléctrica es una propiedad de la materia. Existen dos tipos de cargas, una se llama positiva, como la del protón, y otra negativa, como la del electrón.

La materia en su estado natural se encuentra en estado neutro, tiene tantos protones como electrones. Un cuerpo está cargado cuando tiene exceso o defecto de electrones, como sucede en los bornes de una pila.

Las cargas del mismo signo se repelen y las de signo contrario se atraen.



Dipolo. El dipolo está formado por dos cargas iguales de valor q , una positiva y otra negativa, separadas por una distancia l . Se representan por un vector que va de la carga negativa a la positiva con módulo: $q \cdot l$



Iones en una disolución. Son átomos o grupos de átomos que tienen una carga eléctrica, como el ion sodio Na^+ o el ion cloruro Cl^- , que se encuentran en el agua del grifo. Los iones no están fijos: se mueven en el agua, y no están atados a iones de carga opuesta.

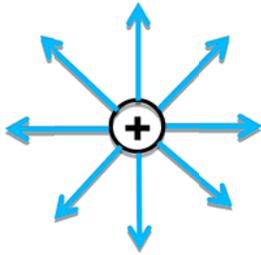
Materiales conductores. Son los materiales que tienen cargas libres, por lo que permiten el movimiento de las cargas, por ejemplo: los metales, o las soluciones iónicas como las que hay en el cuerpo humano.

Materiales aislantes. Son los materiales que no tienen cargas libres, por lo que no permiten el movimiento de las cargas, como el plástico.

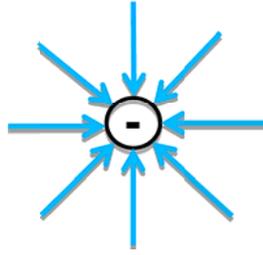
Campo eléctrico. El campo eléctrico es un modelo para representar las fuerzas eléctricas que actúan sobre las cargas en cada punto del espacio. Su intensidad E , en un punto A , es la fuerza por unidad de carga positiva colocada en ese punto A , $E = F/q_+$. Se puede representar de forma vectorial por medio de **líneas de fuerza**. Estas líneas tienen la propiedad de ser tangentes al vector E en cada punto del campo y van de las cargas positivas a las negativas.

En la figura siguiente se muestran las líneas de fuerza de:

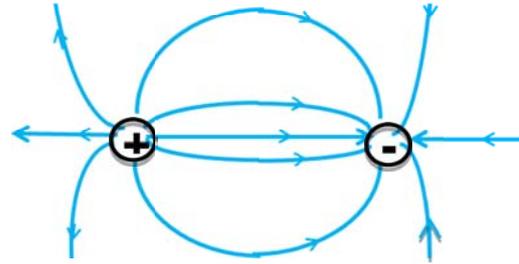
a) Una carga positiva



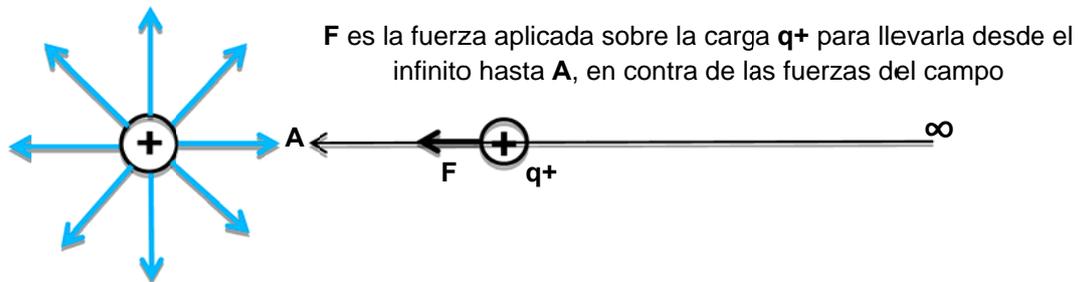
b) Una carga negativa



c) Un dipolo



Energía potencial eléctrica de una carga, $q+$, en un punto A del espacio es el trabajo, W_A , realizado por un agente para llevar esta $q+$ desde el infinito hasta ese punto A.



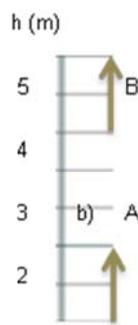
Potencial eléctrico V en un punto A, es la energía potencial eléctrica que tiene la unidad de carga positiva colocada en ese punto A, y se mide en voltios, $V_A=W_A/q+$.

Diferencia de potencial (ddp) entre dos puntos A y B del campo eléctrico, es el trabajo realizado para llevar la unidad de carga positiva desde A hasta B. Esta ddp es igual al potencial en B menos el potencial en A, V_B-V_A .

Una carga eléctrica libre positiva se desplazará naturalmente desde un punto de mayor a otro de menor potencial, por las líneas de fuerza, empujado por la fuerzas del campo.

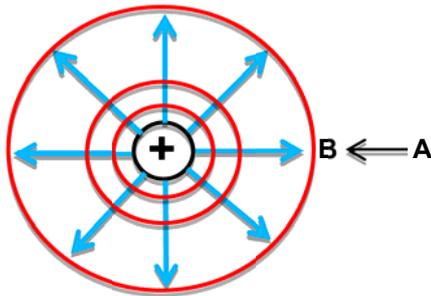
El potencial en A es el que se toma como referencia y puede tener cualquier valor. Por ejemplo: Cuando $V_B-V_A=2$ V, siempre se eleva el potencial 2 V yendo de A a B, a) si V_A es -2 V, V_B es 0 V, y b) si V_A es 3 V, V_B es 5 V. En definitiva, lo único importante es la ddp.

Se puede comparar el potencial eléctrico con el potencial gravitatorio. Cuando se sube por una escalera 2 m, yendo de A a B, siempre se eleva el potencial gravitatorio correspondiente a 2 m, por ejemplo: a) si A=-2 m, se llega a B=0 m, y b) si A=3 m, se llega a B=5 m.



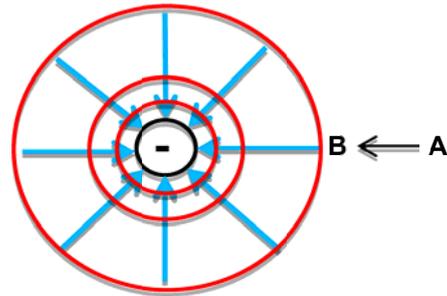
Líneas equipotenciales. Son las líneas que unen puntos con el mismo potencial. Como no se realiza trabajo al mover una carga por ella, son perpendiculares al campo eléctrico y por tanto a las líneas de fuerza. Se utilizan para representar la variación del potencial en el campo eléctrico.

En las figuras siguientes se muestran las líneas de fuerza en azul y las líneas equipotenciales en rojo de: a) una carga positiva, b) una carga negativa.



a) **Carga positiva.** Los potenciales crecen al acercarse a la carga, como de **A** a **B**.

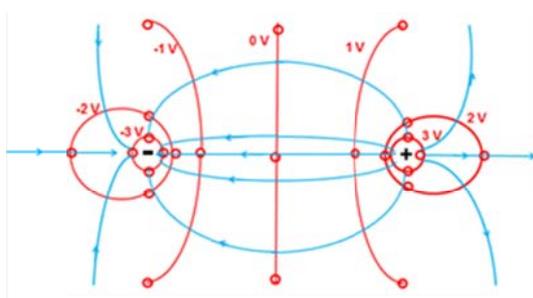
$$V_B > V_A \quad V_B - V_A > 0$$



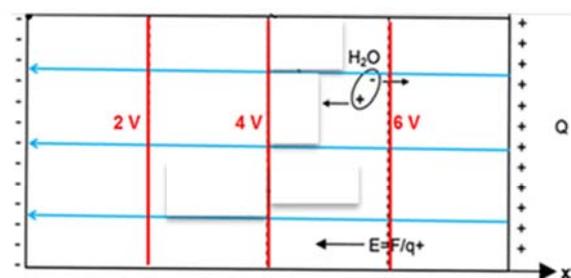
b) **Carga negativa.** Los potenciales decrecen al acercarse a la carga, como de **A** a **B**.

$$V_B < V_A \quad V_B - V_A < 0$$

Condensador eléctrico. Este condensador está formado por dos superficies conductoras capaces de almacenar energía sustentando un campo eléctrico. Las superficies conductoras, sometidas a una diferencia de potencial, adquieren cargas eléctricas, positiva en una de ellas y negativa en la otra. Estas superficies pueden tener distintas formas, por ejemplo, como las que se muestran en las figuras: a) puntuales, que dan lugar al campo de un dipolo, o b) laminares planas, que dan lugar a un campo eléctrico uniforme. Como en las figuras anteriores, se muestran las líneas de fuerza en azul y las líneas equipotenciales en rojo.



a) **Dipolo.**



b) **Campo uniforme.**

Los valores de los potenciales crecen al acercarse a la carga positiva, hay que hacer un trabajo positivo al ir en contra de las fuerzas del campo, y decrecen al acercarse a la carga negativa, el trabajo es negativo, lo realizan las fuerzas del campo.

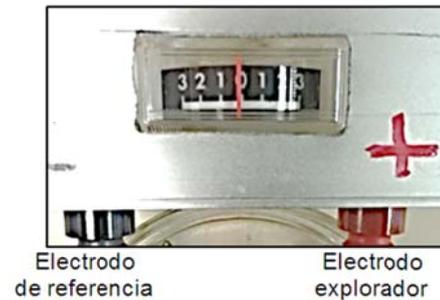
Estos potenciales se pueden medir con la ayuda de un voltímetro. Como éste necesita una pequeña corriente para funcionar, y se hace difícil medirla en el aire, basta con poner agua del grifo como medio conductor.

Voltímetro es el aparato que mide la diferencia entre el potencial del electrodo positivo o explorador V_B , respecto al potencial del electrodo negativo o de referencia V_A , o sea, mide la $ddp=V_B-V_A$.

Hay voltímetros como el de la figura a) que solo detectan potenciales positivos, y como el de la figura b) que detectan tanto potenciales positivos como negativos.



a) Voltímetro en la escala de 0 a 10 V



b) Voltímetro de 0 central

Se estudian tres casos:

- a) Siempre que el electrodo explorador detecte un potencial igual al del electrodo de referencia, el voltímetro da un valor nulo. Indicando que ambos puntos están en una línea equipotencial.

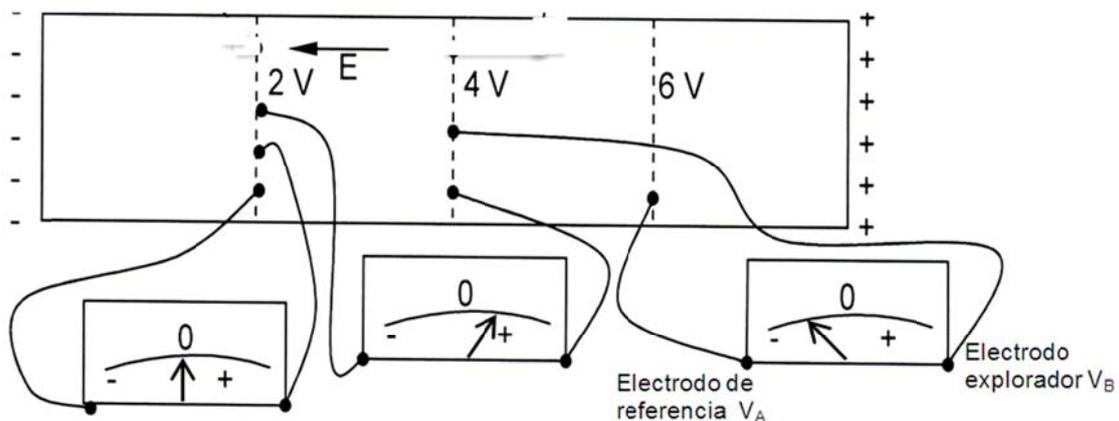
Por ej. $V_A=2\text{ V}$ y $V_B=2\text{ V}$ mide la $ddp=V_B-V_A=2-2=0\text{ V}$

- b) Siempre que el electrodo explorador detecte una diferencia de potencial superior a la del electrodo de referencia, el voltímetro da un valor positivo.

Por ej. $V_A=2\text{ V}$ y $V_B=4\text{ V}$ mide la $ddp=V_B-V_A=4-2=2\text{ V}$

- c) Siempre que el electrodo explorador detecte una diferencia de potencial inferior a la del electrodo de referencia, el voltímetro da un valor negativo.

Por ej. $V_A=6\text{ V}$ y $V_B=4\text{ V}$ mide la $ddp=V_B-V_A=4-6=-2\text{ V}$



a) $V_B-V_A=2-2=0\text{ V}$

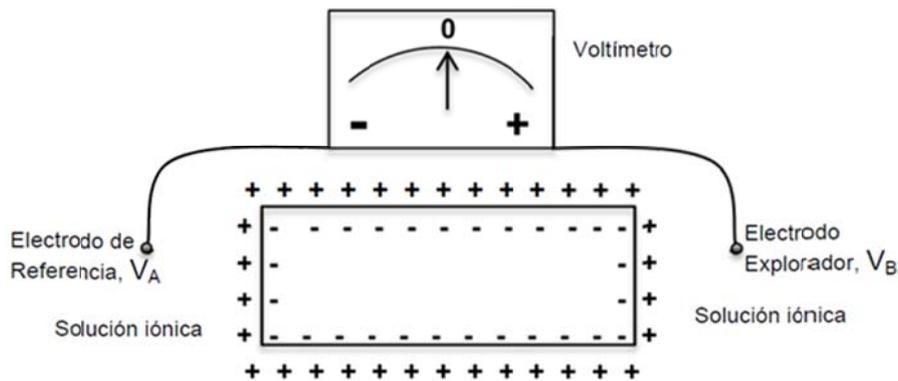
b) $V_B-V_A=4-2=2\text{ V}$

c) $V_B-V_A=4-6=-2\text{ V}$

Actividad eléctrica de las células del músculo cardiaco.

a) Célula en reposo.

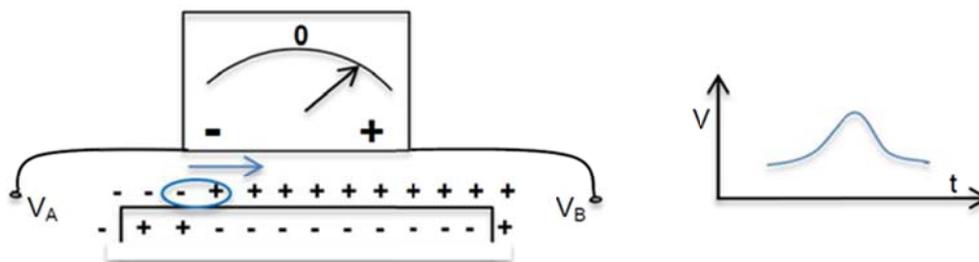
La membrana de esta célula tiene carga positiva en el exterior y negativa en el interior. Fuera de la célula hay una solución iónica que permite la transmisión eléctrica. Si se ponen los electrodos de un voltímetro fuera de la célula, el potencial del electrodo positivo o explorador, V_B , detecta un potencial positivo igual al del electrodo negativo o de referencia, V_A . El voltímetro marca una ddp= $V_B-V_A=0$ V.



a) Célula en reposo.

b) Despolarización de la célula.

Cuándo un estímulo eléctrico llega a la célula, ésta comienza a despolarizarse. Las cargas de la membrana se invierten, pasan las negativas al exterior y las positivas al interior. La excitación se propaga como un frente, con cargas positivas delante y negativas detrás. Este frente está formado por un conjunto de pequeños dipolos que dan lugar al dipolo equivalente de despolarización. En la figura siguiente, el estímulo eléctrico avanza hacia el electrodo positivo del voltímetro, así, éste detecta un potencial positivo durante la despolarización. La ddp= $V_B-V_A>0$ V. Si registramos la variación de potencial durante la despolarización completa se obtiene una deflexión positiva.

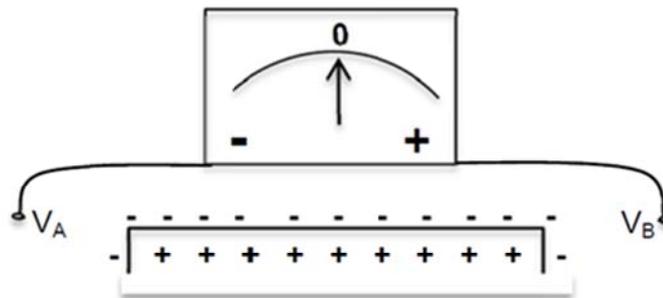


b) Despolarización de la célula.

Solo se representa la parte superior de la membrana

c) Célula despolarizada.

La membrana de esta célula tiene carga negativa en el exterior y positiva en el interior. El potencial del electrodo positivo o explorador, V_B , detecta un potencial negativo igual al del electrodo negativo o de referencia, V_A . El voltímetro marca una $ddp = V_B - V_A = 0$ V.



b) Célula despolarizada.

Solo se representa la parte superior de la membrana

ELECTRICIDAD Y ELECTROCARDIOGRAMA

1. CAMPO ELÉCTRICO UNIFORME

Objetivo:

Localizar las líneas equipotenciales de un campo eléctrico uniforme con un voltímetro y representarlas junto con las líneas de fuerza.

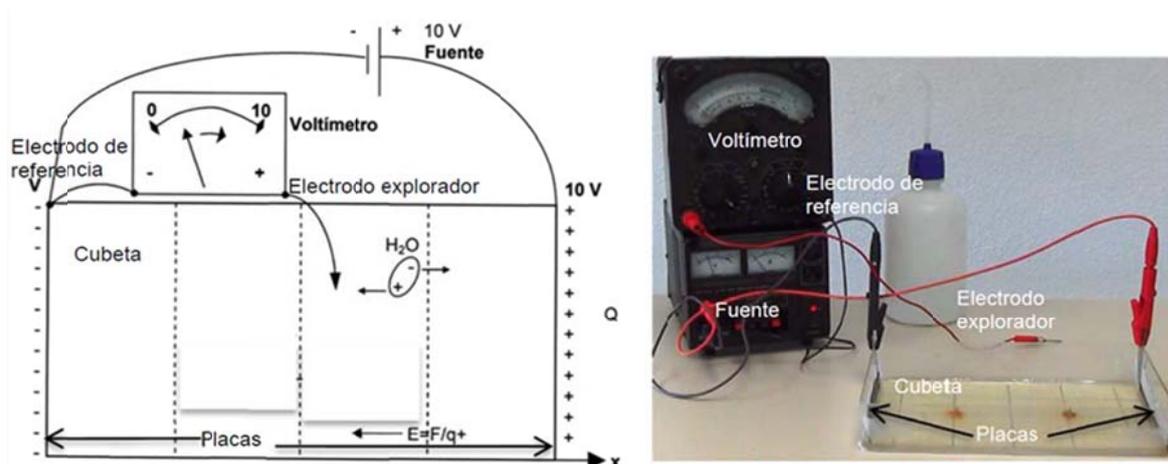
Representar gráficamente la variación del potencial a lo largo de este campo.

Material:

- Fuente de corriente eléctrica continua.
- Voltímetro y cables con pinzas cocodrilo.
- Cubeta con placas conductoras y agua del grifo.

Procedimiento:

1. Se ponen dos placas conductoras en una cubeta, como se muestra en las figuras, a la que agregamos agua del grifo hasta que cubra el fondo.
2. Estas placas se conectan a una fuente de corriente continua de 10 V mediante cables con pinzas cocodrilo. El cable unido al borne negativo se usa de color negro y el unido al positivo de color rojo.
3. El electrodo de referencia o negativo de un voltímetro, que se utiliza en la escala de 0 a 10 V, se conecta al borne negativo de la fuente con un cable negro. El electrodo explorador, conectado a su borne positivo con un cable rojo, se coloca en distintos puntos de la cubeta para averiguar cómo varía el potencial entre las placas.



Explicación:

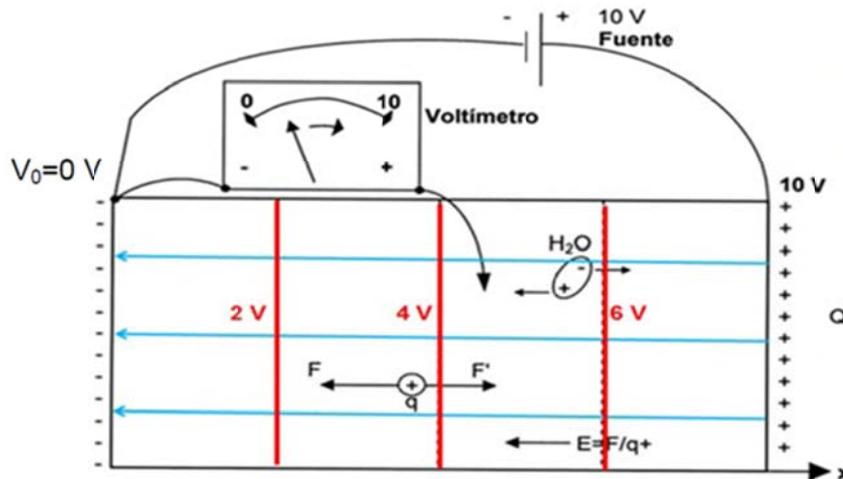
La placa conductora conectada al borne negativo de la fuente, queda cargada negativamente, de forma uniforme, a 0 V, y la conectada al borne positivo, queda cargada positivamente, de forma uniforme, a 10 V.

Los iones del agua del grifo permiten al voltímetro tener una pequeña corriente y medir los potenciales en los distintos puntos del campo eléctrico que se forma en la cubeta.

Al mover el electrodo explorador del voltímetro desde la placa negativa a la positiva se comprueba que el potencial crece uniformemente.

Moviendo este electrodo en líneas paralelas a las placas se pueden localizar las líneas equipotenciales de 2, 4, y 6 V y se representan en el dibujo en color rojo.

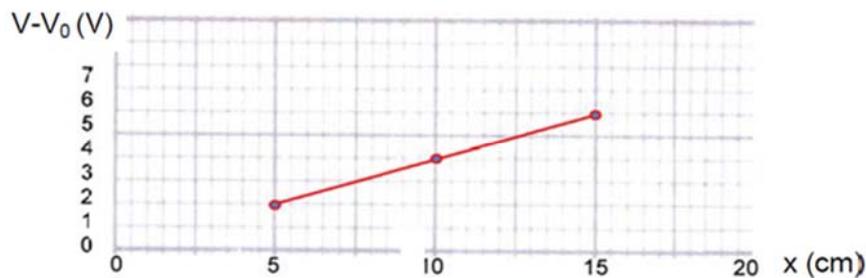
Trazando perpendiculares a las líneas equipotenciales se obtienen las líneas de fuerza y las dibujamos en azul. Estas líneas se dibujan equidistantes y paralelas, indicando que es un campo uniforme, y dirigidas de la placa positiva a la negativa.



Las líneas de fuerza representan las trayectorias que seguirían las cargas positivas colocadas en este campo, y por tanto, siempre se dirigen hacia potenciales decrecientes.

Los potenciales crecientes indican que hay que realizar un trabajo cada vez mayor para acercar una carga positiva $q+$ desde la placa negativa a la placa positiva.

A continuación se representa la variación del potencial a lo largo del eje x .



Con este experimento se comprueba que entre las placas se ha formado un campo uniforme. La intensidad de este campo, o fuerza sobre la unidad de carga positiva, $E=F/q+$, es constante en todos los puntos, y los potenciales crecen en sentido contrario al de las líneas de fuerza.

Reflexión:

- ¿Por qué se coloca agua en la cubeta?
- ¿Cómo varía el potencial al ir desde la placa negativa a la positiva?
- ¿Qué relación hay entre las líneas de fuerza y las equipotenciales?
- ¿Cómo funciona un voltímetro?
- ¿Cómo funciona una fuente eléctrica?

ELECTRICIDAD Y ELECTROCARDIOGRAMA

2. CAMPO ELÉCTRICO PRODUCIDO POR UN DIPOLO

Objetivo:

Localizar las líneas equipotenciales del campo eléctrico de un dipolo con un voltímetro y representarlas junto con las líneas de fuerza.

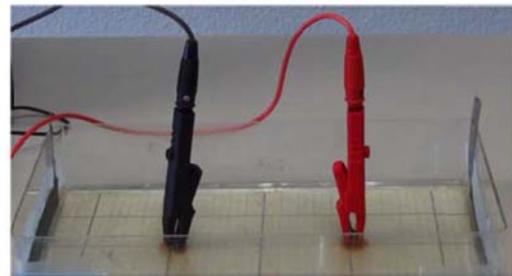
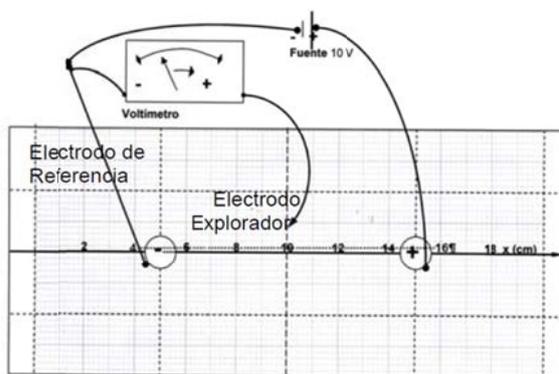
Representar gráficamente la variación del potencial a lo largo del eje del dipolo.

Material:

- Fuente de corriente eléctrica continua.
- Voltímetro y cables con pinzas cocodrilo.
- Cubeta con dos salientes y agua del grifo.

Procedimiento:

1. La fuente de 10 V se conecta a dos salientes, que se encuentran dentro de la cubeta con agua del grifo, mediante cables con pinzas cocodrilo. El cable unido al borne negativo se usa de color negro y el unido al borne positivo de color rojo.
2. El electrodo de referencia o negativo de un voltímetro, que se utiliza en la escala de 0 a 10 V, se conecta al borne negativo de la fuente con un cable negro. El electrodo explorador, conectado al borne positivo de la fuente con un cable rojo, se coloca en distintos puntos de la cubeta para averiguar cómo varía el potencial.



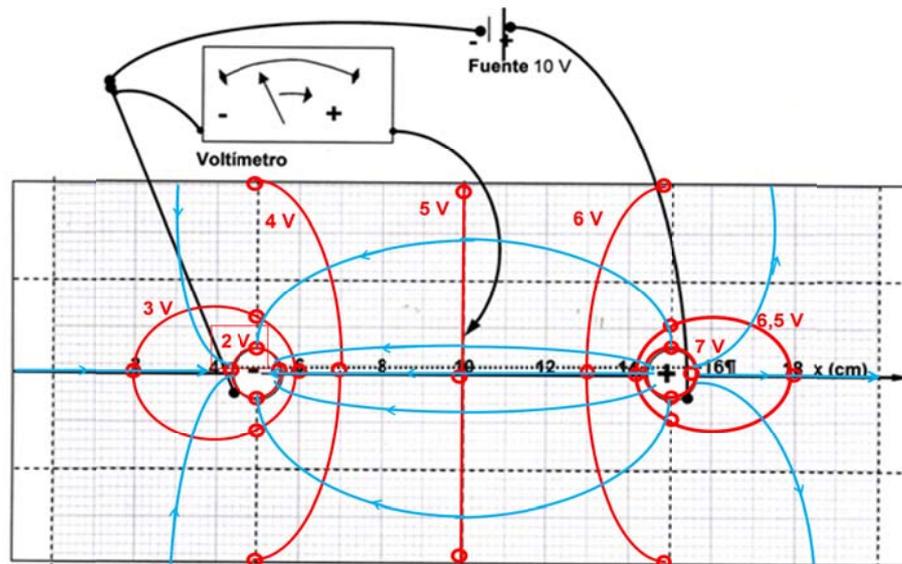
Explicación:

El saliente conectado con el borne negativo de la fuente queda cargado negativamente a 0 V (menor potencial) y el saliente conectado con el borne positivo queda cargado positivamente a 10 V (mayor potencial). De esta forma se tienen dentro de la cubeta dos cargas iguales, una negativa y otra positiva, formando un dipolo.

Al mover el electrodo explorador del voltímetro desde la carga negativa en distintas direcciones se puede ver cómo crece el potencial y que éste crece de forma rápida cuando va dirigido hacia la carga positiva.

Moviendo este electrodo en líneas con el mismo potencial se pueden localizar las líneas equipotenciales. Unas alrededor de la carga negativa, como las de 2 y 3 V, otras alrededor de la carga positiva, como las de 6,5 y 7 V, y otras que se encuentra entre ambas cargas, como las de 4, 5 y 6 V. Estas líneas se representan en el dibujo de color rojo.

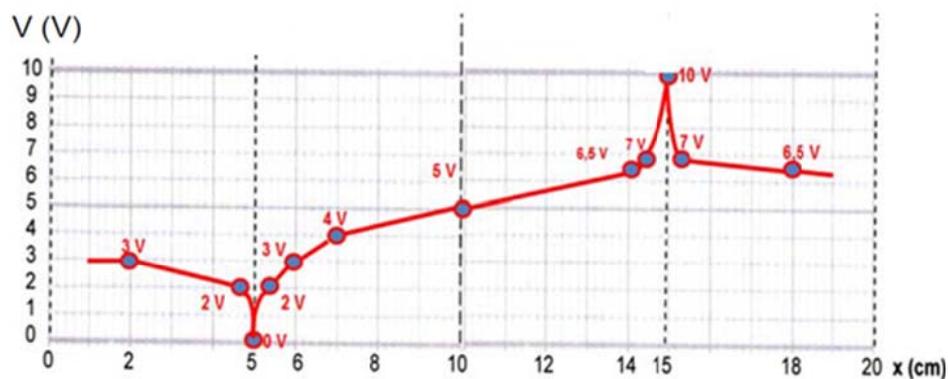
Al trazar perpendiculares a las líneas equipotenciales se obtienen las líneas de fuerza y se dibujan en azul.



Tanto las líneas equipotenciales como las de fuerza están concentradas cerca de las cargas y cerca de la recta que las une. Esto representa que el campo es más intenso en estos lugares. Las líneas de fuerza representan las trayectorias que seguirían las cargas positivas colocadas en este campo, y por tanto, siempre se dirigen hacia potenciales decrecientes.

Los potenciales crecientes indican que hay que realizar un trabajo cada vez mayor para mover una carga positiva $q+$ en esa dirección.

A continuación se representa la variación del potencial a lo largo del eje x del dipolo.



Con este experimento se comprueba como es el campo eléctrico de un dipolo. Las líneas equipotenciales son crecientes de la carga negativa a la positiva y se pueden obtener estas líneas cerradas cerca de las cargas. El campo eléctrico es más intenso cerca de las cargas y en la línea que las une.

Reflexión:

- ¿Cómo varía el potencial al alejarnos de la carga negativa?
- ¿Cómo varía el potencial al acercarnos a la carga positiva?
- ¿Cómo varía el potencial a lo largo del eje del dipolo?
- ¿A qué se llaman líneas de fuerza? ¿Qué indican?
- ¿A qué se llaman líneas equipotenciales? ¿Qué indican?

ELECTRICIDAD Y ELECTROCARDIOGRAMA

3. POTENCIALES OBTENIDOS AL GIRAR UN DIPOLO

Objetivo:

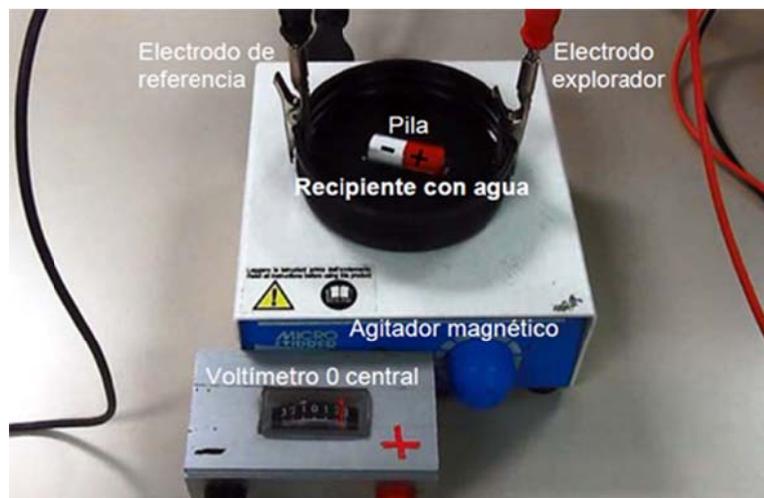
Comprobar cómo al girar un dipolo su campo eléctrico gira con él, arrastrando sus líneas de fuerza y equipotenciales. Para ello hay que observar, con un voltímetro de 0 central, cómo el potencial del electrodo explorador o positivo del voltímetro, sube al acercarse a la carga positiva y disminuye al acercarse a la carga negativa.

Material:

- Voltímetro de 0 central y cables con pinzas cocodrilo.
- Agitador magnético.
- Recipiente con agua del grifo y pila.

Procedimiento:

1. Se introducen los electrodos de un voltímetro de 0 central en un recipiente con agua. Se usa un cable negro para el electrodo negativo o de referencia del voltímetro y un cable rojo para el electrodo positivo o explorador.
2. El voltímetro detecta la actividad eléctrica en el agua midiendo la diferencia de potencial (ddp) entre el electrodo explorador y el de referencia.
3. Se observa el voltímetro al introducir una pila en el recipiente y al hacerla girar con un agitador magnético. La pila gira ya que además de ser un dipolo eléctrico es también un dipolo magnético.



Explicación:

1. El voltímetro marca **0 V** cuando los dos electrodos tienen el mismo potencial. Ejemplos:
 - a) Cuando solo hay agua, los dos electrodos detectan 0 V (ver Fig. a).
 - b) Siempre que los dos electrodos detecten el mismo potencial, como cuando los polos de las pila están equidistantes (ver Fig. b).

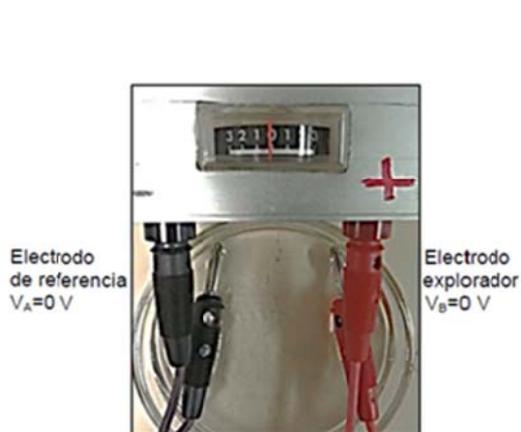


Fig. a) Solo hay agua, por lo que no se detecta actividad eléctrica y el voltímetro marca una $d\phi = V_B - V_A = 0$ V.

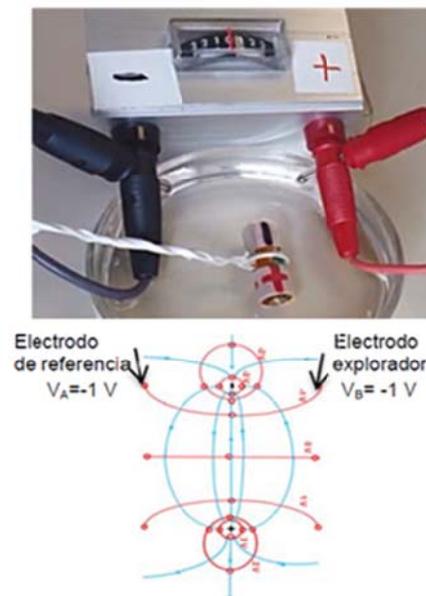
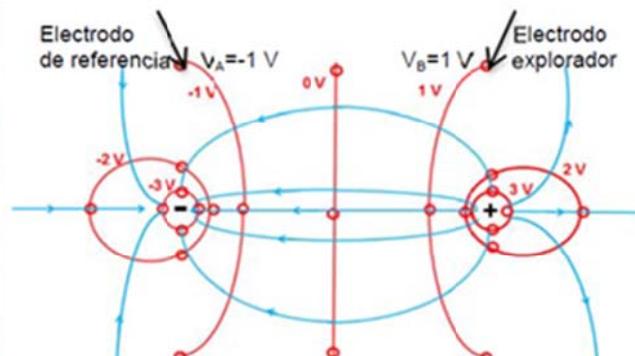


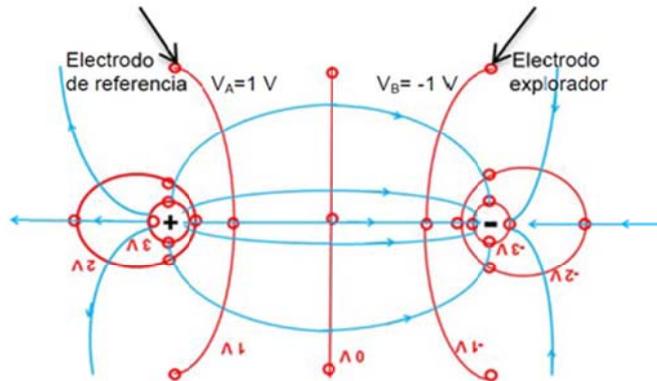
Fig. b) Los polos de las pilas están equidistantes de los electrodos, tocan la misma línea equipotencial de -1 V y el voltímetro marca una $d\phi = V_B - V_A = -1 - (-1) = 0$ V.

2. El voltímetro marca **potenciales positivos** cuando el electrodo explorador detecta un potencial superior al de referencia. La aguja se desvía a la derecha. Ejemplo: el polo positivo de la pila está cerca del electrodo explorador y el polo negativo está cerca del electrodo de referencia.



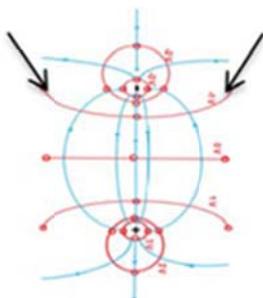
Cómo el electrodo explorador detecta 1 V y el de referencia -1 V el voltímetro marca una $d\phi = V_B - V_A = 1 - (-1) = 2$ V.

3. El voltímetro marca **potenciales negativos** cuando el electrodo explorador detecta un potencial inferior al de referencia. La aguja se desvía a la izquierda. Ejemplo: el polo negativo de la pila está cerca del electrodo explorador y el polo positivo está cerca del electrodo de referencia.

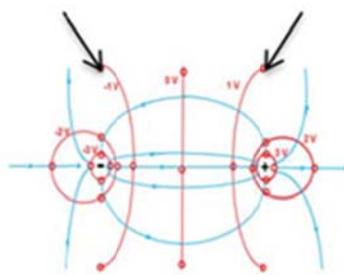


Cómo el electrodo explorador detecta -1 voltio y el de referencia 1 V el voltímetro marca una ddp= $V_B - V_A = -1 - (1) = -2$ V.

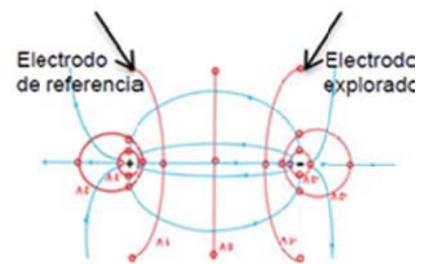
Al girar la pila (dipolo) lógicamente también gira su campo eléctrico arrastrando sus líneas equipotenciales, como se puede ver con el agitador magnético. Se muestran los tres casos anteriores, o sea, cuando el voltímetro marca: **1.** ddp=0 V, **2.** ddp>0 V **3.** ddp<0 V.



1. ddp=0 V.
El electrodo explorador detecta un potencial igual al de referencia.

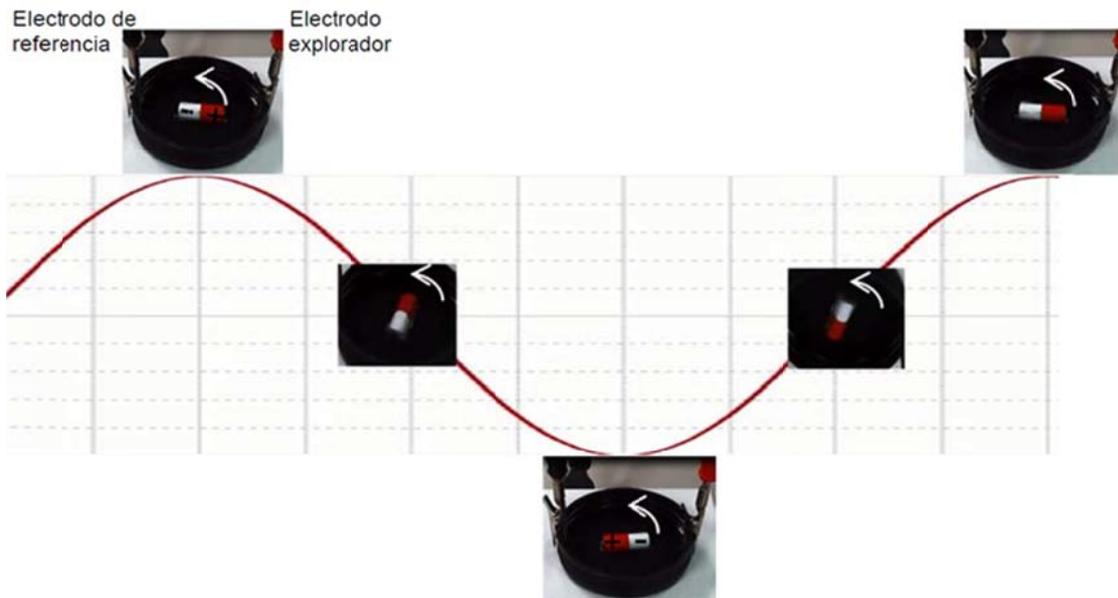


2. ddp>0 V.
El electrodo explorador detecta un potencial superior al de referencia.



3. ddp<0 V.
El electrodo explorador detecta un potencial inferior al de referencia.

El registro gráfico que se obtiene del potencial en función del tiempo es una onda periódica. El potencial sube gradualmente al acercarse el polo positivo de la pila al electrodo explorador del voltímetro, luego disminuye y se hace negativo cuando se acerca el polo negativo a este electrodo.



Con este experimento se comprueba como al girar el dipolo arrastra el campo eléctrico que genera, como se observa en el voltímetro de 0 central o en un registro de potencial en función del tiempo.

Reflexión:

- ¿Qué es un voltímetro de 0 central?
- ¿Cuándo un voltímetro marca 0 V?
- ¿Cuándo un voltímetro detecta potenciales positivos?
- ¿Cuándo un voltímetro detecta potenciales negativos?

ELECTRICIDAD Y ELECTROCARDIOGRAMA

4. COMPRENDER EL REGISTRO DE UN ELECTROCARDIOGRAMA

Cuando el impulso cardíaco recorre el corazón, los potenciales eléctricos se propagan por los tejidos adyacentes hasta la superficie del cuerpo. Si se colocan electrodos sobre la piel, se pueden medir potenciales eléctricos y obtener una gráfica, llamada electrocardiograma (ECG).

A estos pares de electrodos entre las extremidades como se muestra en la Fig. a) se les llaman Derivaciones. Cada Derivación detecta una diferencia de potencial, variable en el tiempo, entre el electrodo explorador o positivo, respecto al electrodo de referencia o negativo. De las tres Derivaciones I, II y III, resultan tres representaciones gráficas distintas (Fig. b), similares a tres fotografías de una persona tomadas desde arriba o desde los laterales.

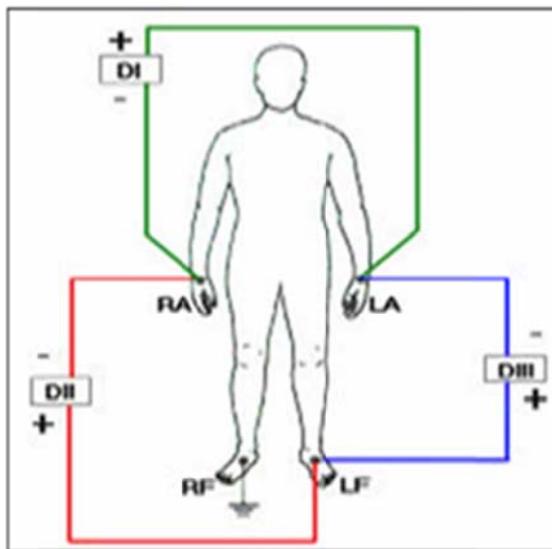


Fig. a)



Fig. b)

En un latido de cualquier ECG se puede ver que tiene partes horizontales que indican que no hay actividad eléctrica, y otras partes con potenciales por encima y por debajo de la horizontal.

Ante un ECG cualquiera se puede preguntar: ¿Cómo se genera la actividad eléctrica en el corazón? ¿Cómo se producen las deflexiones en el electrocardiograma? ¿Cómo se puede obtener la actividad eléctrica del corazón con unos electrodos colocados sobre la piel?

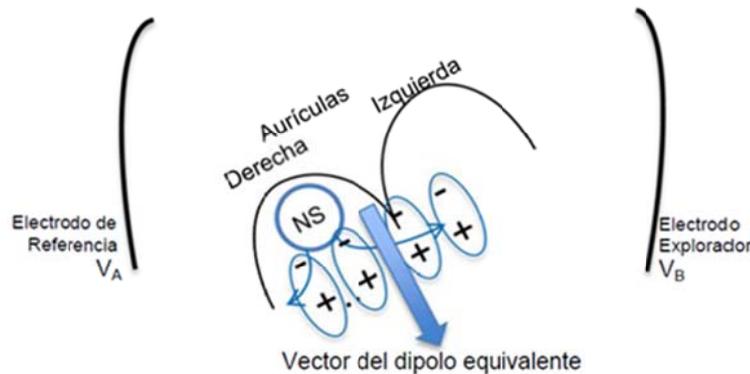
A continuación se trata de dar una explicación sencilla a estas preguntas, teniendo en cuenta lo visto en los apartados anteriores.

Actividad eléctrica del corazón

El corazón tiene dos partes diferenciadas, en la parte superior están las aurículas formando una unidad en su actividad eléctrica, como si fuese una célula, y en la parte inferior están los ventrículos formando otra unidad.

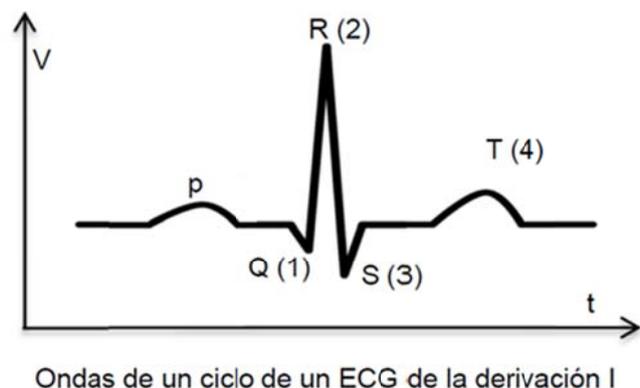
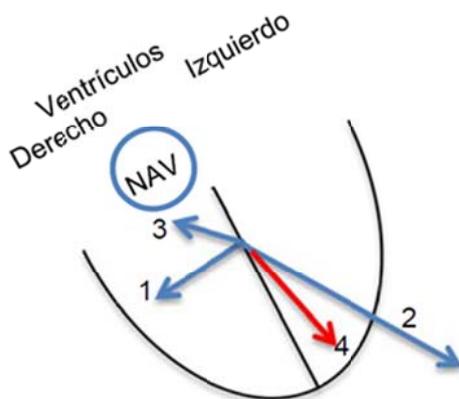
a) Despolarización de las aurículas

En la aurícula derecha hay unas células (NS), que se excitan automáticamente iniciando el ciclo cardiaco. Este estímulo se propaga en todas las direcciones, las dos aurículas se despolarizan y contraen. El frente de despolarización está formado por múltiples dipolos que forman, en cada instante, un vector del dipolo equivalente dirigido hacia abajo y a la derecha. El registro de los potenciales da lugar a la onda p en el ECG.



b) Despolarización y repolarización de los ventrículos

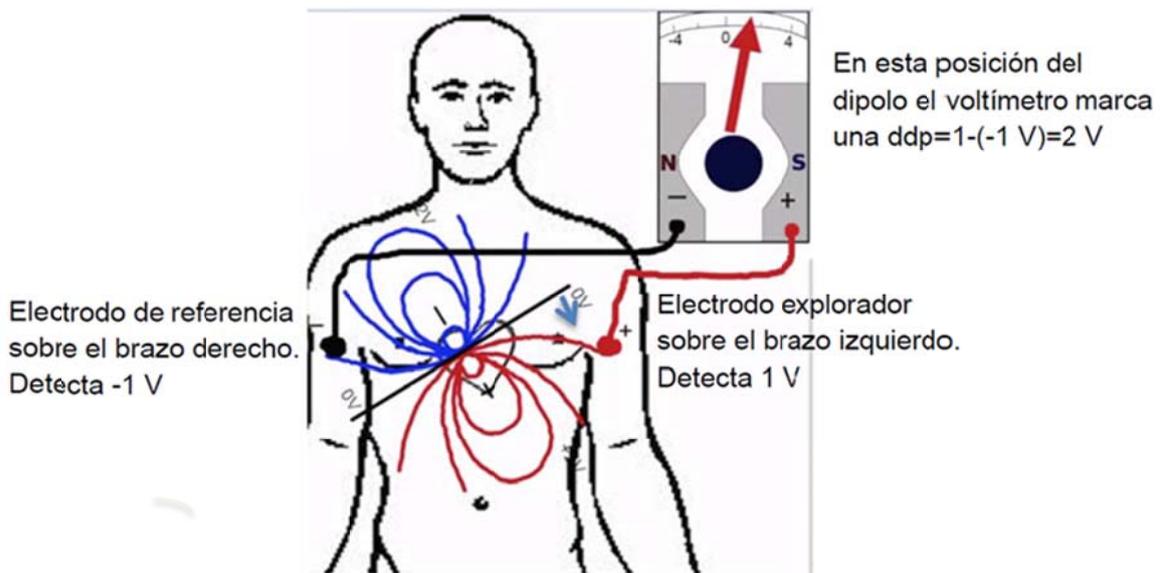
Pasado un pequeño tiempo después de despolarizadas las aurículas, cuando el estímulo llega a las células NAV, se despolarizan rápidamente los ventrículos. Se forman sucesivamente los vectores dipolares equivalentes 1, 2 y 3, correspondientes a las ondas del complejo QRS, y se contraen los ventrículos. Pasado un tiempo se repolarizan los ventrículos, se forma el vector dipolar equivalente 4, correspondiente a la onda T, y éstos se relajan. Los vectores 2 y 4 que apuntan hacia la derecha dan deflexiones positivas, y los vectores 1 y 3 que apuntan hacia la izquierda dan deflexiones negativas en un ECG de la Derivación I. A continuación se representan estos vectores y las ondas de un ciclo cardiaco.



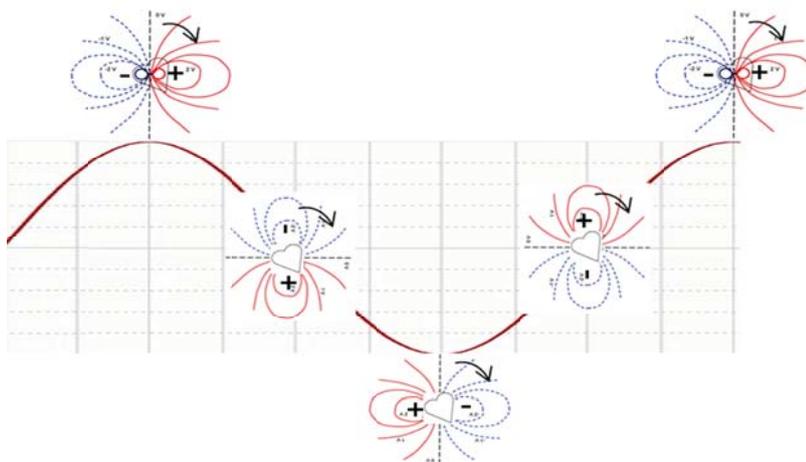
Los tejidos del cuerpo humano están formados por iones en disolución, como los iones sodio Na^+ , potasio K^+ y cloruro Cl^- . Gracias a dichos iones se puede medir la diferencia de potencial entre los electrodos, cuando éstos son colocados sobre la piel.

El impulso cardiaco avanza por el corazón según un modelo tridimensional muy complejo. Una forma sencilla de representarlo es suponer que la actividad eléctrica del corazón, vista a distancia, es análoga a la de un dipolo eléctrico variable a lo largo de un latido.

De una forma muy simplificada, simulamos la actividad eléctrica del corazón con un dipolo eléctrico giratorio. En la figura siguiente se representa el campo eléctrico del dipolo con líneas equipotenciales con los electrodos colocados según la Derivación I.



A lo largo de un giro los electrodos detectan potenciales que dibujan una curva periódica, con una deflexión positiva (o *negativa*) cuando la carga positiva (o *negativa*) del dipolo esté cerca del electrodo explorador.



Reflexión:

- ¿Cómo se genera la actividad eléctrica en el corazón?
- ¿Cómo se producen las deflexiones en este registro?
- ¿Cómo se puede obtener la actividad eléctrica del corazón con unos electrodos colocados sobre la piel?