

L'ELETTROCARDIOGRAMMA

CONDUZIONE DELL'IMPULSO

L'eccitamento del cuore ha origine nel nodo senoatriale (SA), dal quale la corrente si propaga alla muscolatura atriale, al nodo atrioventricolare (AV), al sistema di Purkinje, alla muscolatura ventricolare. Molte fibre del miocardio possiedono la capacità di autoeccitarsi. La porzione che è dotata al massimo di questa proprietà è il nodo senoatriale, il quale, quindi, controlla la frequenza delle pulsazioni cardiache. Lo stato di eccitamento si propaga quindi alle cellule atriali con una velocità di circa 1 m/s. I ventricoli sono completamente separati dagli atri da un anello fibroso che non conduce, ad eccezione che a livello del nodo atrioventricolare. All'interno di quest'ultimo la propagazione del potenziale d'azione continua ma ad una velocità molto ridotta (circa 0.05-0.1 m/s). Molto opportunamente il sistema di conduzione è organizzato in modo che l'impulso cardiaco non possa propagarsi troppo rapidamente dagli atri ai ventricoli. Gli atri hanno così il tempo di vuotare il loro contenuto nei ventricoli, prima che abbia inizio la contrazione ventricolare. A questo punto sono le fibre di Purkinje che conducono gli impulsi dal nodo AV fino ai ventricoli. Il sistema di Purkinje è fatto di cellule muscolari cardiache di grande diametro, le quali hanno un'elevata velocità di conduzione (fino a 2 m/s). Ciò consente una trasmissione quasi immediata dell'impulso cardiaco all'intero sistema ventricolare. Una volta che l'impulso cardiaco ha raggiunto le terminazioni delle fibre di Purkinje, esso si trasmette a tutta la massa ventricolare attraverso le stesse fibre miocardiche comuni con una velocità abbastanza lenta di circa 0.3 m/s.

PRINCIPI DELL'ELETTROCARDIOGRAFIA E RELAZIONE DELLE COMPONENTI DELL'ECG CON L'ATTIVITÀ ELETTRICA DEL CUORE.

Quando un'onda passa attraverso il miocardio, delle correnti elettriche diffondono nei tessuti circostanti ed in piccola parte pervengono fino alla superficie. Applicando degli elettrodi sulla superficie corporea, in punti corrispondenti a due opposti lati del cuore, è possibile registrare i potenziali elettrici da esso generati. Il tracciato ottenuto da tale registrazione è noto come elettrocardiogramma.

L'elettrocardiogramma (ECG) è quindi la registrazione continua di un'attività elettrica in relazione con quella cardiaca. Nelle derivazioni standard (bipolari) si registra la differenza di potenziale fra braccio destro e braccio sinistro (I derivazione), braccio destro e gamba sinistra (II derivazione) e braccio sinistro e gamba sinistra (III derivazione). Tutte le cellule miocardiche a riposo hanno una carica positiva all'esterno ed una positiva all'interno. Quando una cellula si depolarizza l'esterno della membrana diventa negativo mentre in tutte le altre cellule ancora a riposo rimane positivo. Quindi quando una parte del miocardio si depolarizza in maniera ordinata questa porzione diventa un dipolo.

Collegando un registratore elettrocardiografico ai punti RA e LA (I derivazione) e analizzando le variazioni di voltaggio otteniamo una proiezione dell'attività elettrica del cuore che da origine a delle curve caratteristiche. La deflessione del pennino verso l'alto quando il secondo punto della coppia diventa positivo (Figura 1).

L'onda P e l'attivazione atriale

L'eccitamento degli atri deriva da un'onda di depolarizzazione che ha origine nel nodo SA e si propaga nel miocardio atriale. Il dipolo generato da tale eccitamento ha un'ampiezza proporzionale alla massa di

muscolatura atriale interessata e direzione verso la parte positiva del dipolo (Figura 1-a). Quando l'intera muscolatura atriale si è depolarizzata, non c'è più differenza di voltaggio tra LA e RA e l'ECG ritorna a zero.

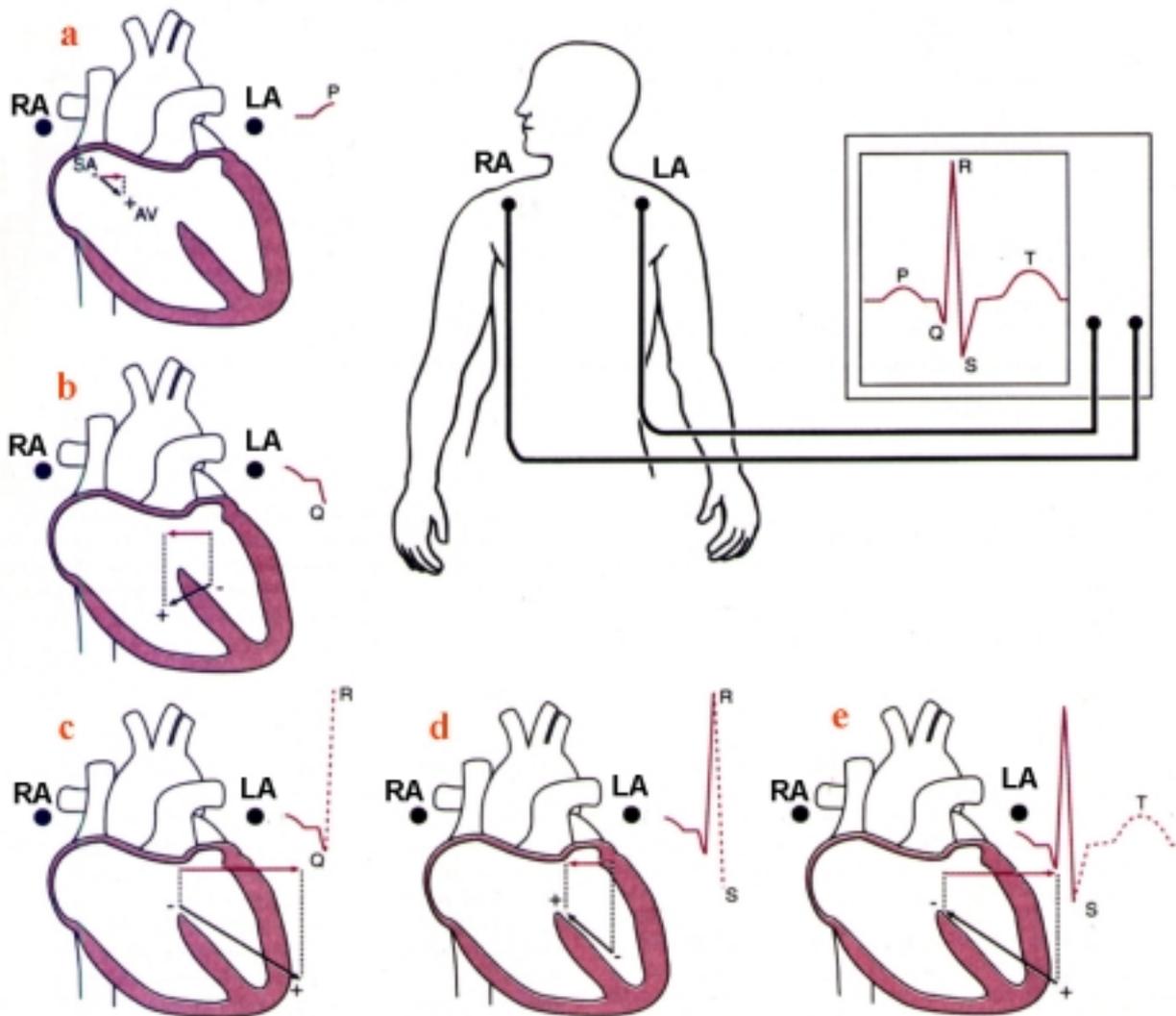


Figura 1. Sequenza dei dipoli principali che danno origine alle onde elettromagnetiche: le frecce nere sono i vettori che ne rappresentano l'ampiezza e la direzione. L'ampiezza è proporzionale alla massa del miocardio interessata; la direzione è determinata dall'orientamento delle regioni depolarizzate e di quelle polarizzate del miocardio. Le linee nere verticali a puntini rappresentano la proiezione di ogni vettore sulle coordinate RA-LA, determinando la componente verticale che è registrata dall'ECG (frecce rosse). Riquadro a: Attivazione atriale (onda P); Riquadri b, c, d: Depolarizzazione ventricolare (complesso QRS); Riquadro e: Ripolarizzazione ventricolare (onda T)

Il tratto PR e la conduzione atrioventricolare. Con il procedere lento dell'eccitamento attraverso il nodo AV, la massa di miocardio interessata è troppo piccola per generare un dipolo di ampiezza sufficiente a produrre una variazione di voltaggio rilevabile dall'ECG di superficie. La conduzione atrioventricolare avviene

nell'intervallo fra l'onda P e l'inizio della depolarizzazione ventricolare (tratto PR).

Il complesso QRS e la depolarizzazione atrioventricolare. L'onda di depolarizzazione emerge dal nodo AV e corre lungo il fascio di His, i suoi rami ed il sistema di Purkinje. Nella prima fase il punto RA è positivo rispetto al punto LA. Questa

deflessione in basso dell'ECG è chiamata onda Q (Figura 1-b), ma normalmente è così piccola da essere appena visibile. A questo punto l'onda di depolarizzazione si propaga a tutta la superficie interna dei ventricoli, procedendo poi dagli strati più interni (endocardio) a quelli più esterni (epicardio). Il dipolo prodotto è positivo rispetto al punto LA e la deflessione verso l'alto (onda R) è molto ampia, a causa della grossa massa di miocardio coinvolta (Figura 1-c). L'ultima parte dei ventricoli che si depolarizza è quella a contatto con gli atri. In questa fase il punto RA è positivo rispetto al punto LA e la deflessione è verso il basso (onda S) (Figura 1-d). Il voltaggio torna a zero quando tutta la massa ventricolare è depolarizzata. L'insieme delle onde Q, R e S è chiamato complesso QRS e riflette la progressione della depolarizza-

zione ventricolare.

L'onda T e la ripolarizzazione ventricolare. Anche la ripolarizzazione genera un dipolo. La ripolarizzazione ventricolare avviene ben dopo la fine della contrazione, producendo un dipolo con carica positiva rispetto ad A che sull'elettrocardiogramma è rappresentato dall'onda T (Figura 1-e). Il dipolo associato con la ripolarizzazione atriale è completamente mascherato dall'onda T.

IL TRIANGOLO DI EINTHOVEN E LE DERIVAZIONI BIPOLARI.

Il sistema originale di derivazione dell'ECG fu introdotto all'inizio del secolo dal fisiologo olandese Einthoven.

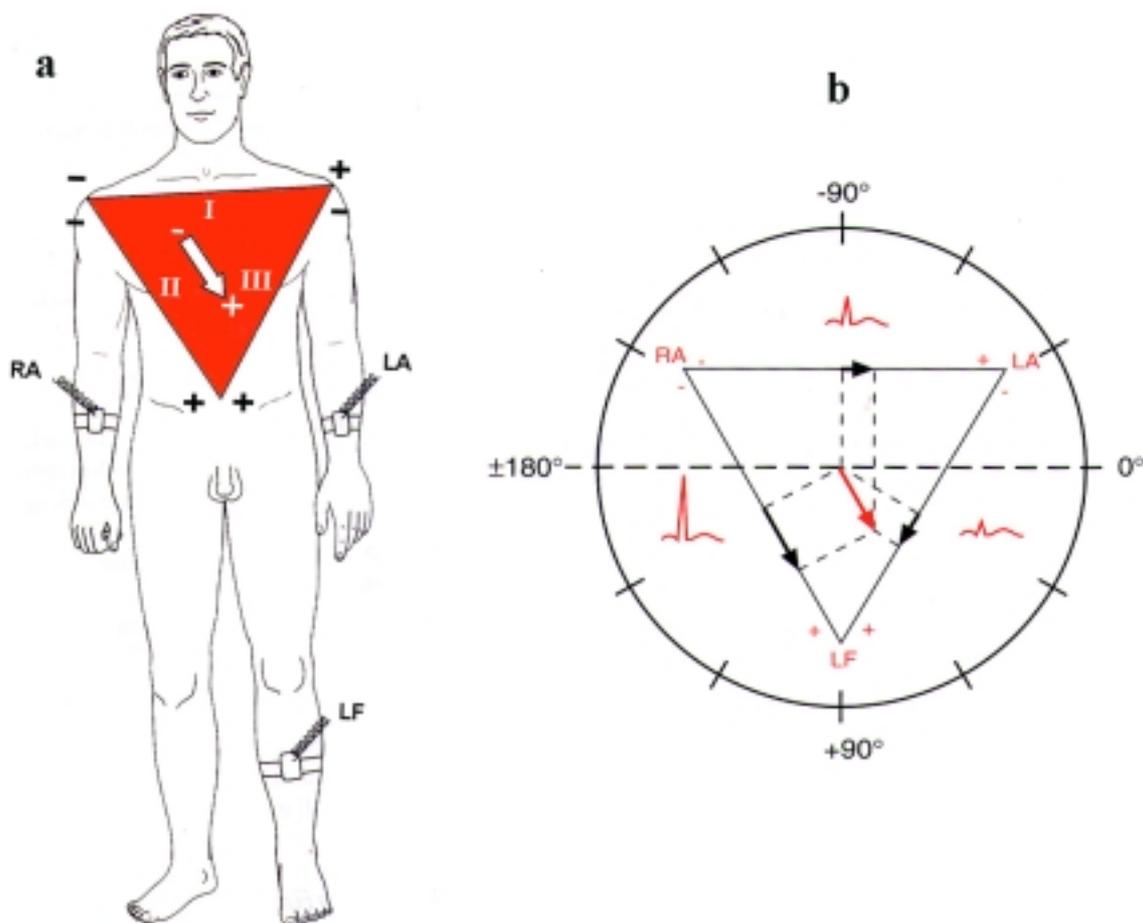


Figura 2: Triangolo di Einthoven con le connessioni per la I, II e III derivazione standard degli arti. Per convenzione, il braccio destro (RA) è sempre negativo; la gamba sinistra (LF) è sempre positiva; il braccio sinistro (LA) è: positivo in prima derivazione, negativo in terza derivazione. Con questa disposizione delle polarità il complesso QRS è positivo in tutte tre le derivazioni in quasi tutti i soggetti (Riquadro b).

In questo sistema di derivazione, la somma vettoriale di tutta l'attività elettrica presente nel cuore in ogni dato momento è chiamato *vettore cardiaco risultante*. Questa forza elettrica risultante è posta al centro di un triangolo (assunto equilatero) formato dalla spalla destra, dalla spalla sinistra e dalla regione pubica (Figura 2). Questo triangolo è orientato nel piano frontale del corpo, pertanto questo sistema di derivazione potrà rilevare solo la proiezione frontale del vettore cardiaco. Per opportunità gli elettrodi sono posti sul braccio destro e sinistro invece che sulle spalle corrispondenti, in quanto le braccia sono ritenute semplici estensioni delle derivazioni delle spalle. Allo stesso modo, la gamba (sinistra per convenzione) è presa come estensione del sistema di derivazione dal pube, e il terzo elettrodo è quindi posto sulla caviglia sinistra. Gli elettrodi sono collegati al galvanometro seguendo delle convenzioni standard.

La **I derivazione** registra la differenza di potenziale tra il braccio sinistro ed il braccio destro. Il polo positivo è collegato con il braccio sinistro e il polo negativo con il braccio destro. Quando la regione toracica connessa con il braccio destro diviene elettronegativa rispetto alla regione sinistra il galvanometro registra una deflessione positiva.

Nella **II derivazione** il polo positivo è collegato con la gamba sinistra, mentre il polo negativo con il braccio destro. L'elettrocardiografo registrerà un'onda positiva quando il braccio sinistro sarà negativo rispetto alla gamba sinistra.

In **III derivazione** si registra la differenza di potenziale tra braccio sinistro (negativo) e gamba sinistra (positiva). Quindi, quando il braccio sinistro sarà negativo rispetto alla gamba la deflessione dell'elettrocardiogramma sarà positiva.

La polarità delle derivazioni è stata scelta in maniera che nella maggioranza degli individui il complesso QRS sia diretto verso l'alto in tutte tre le derivazioni. Inoltre in ogni istante la somma dei potenziali rilevati in due qualsiasi delle tre derivazioni ri-

sulta uguale al potenziale rilevato nella rimanente derivazione (**Legge di Einthoven**)

ASSE ELETTRICO VENTRICOLARE

L'asse elettrico ventricolare è dedotto dal vettore QRS medio. Infatti, mentre il vettore istantaneo rappresenta le forze elettriche presenti a un dato istante nella massa cardiaca, il vettore medio rappresenta la risultante degli infiniti vettori istantanei che si hanno durante la fase considerata del ciclo (in questo caso durante l'attivazione ventricolare). L'orientamento dell'*asse elettrico del cuore* è definito dall'angolo formato dal vettore QRS medio con la linea orizzontale corrispondente alla I derivazione. Il procedimento che si utilizza per determinare il vettore QRS è opposto a quello utilizzato per ottenere ampiezza e verso delle deflessioni dei vari eventi elettrici. Riportando sui lati del triangolo (a parte dal loro punto medio e nel verso positivo della derivazione) l'ampiezza dell'onda R registrata in quella derivazione, e tracciando le perpendicolari verso il centro dagli estremi dei segmenti ottenuti, si determina il vettore cardiaco che ha generato tali proiezioni (Figura 2-b). Lo studio dell'asse elettrico permette di stabilire se vi è o no una rotazione del cuore nel piano frontale. Nell'adulto normale l'orientamento dell'asse elettrico è compreso tra -30° e $+90^\circ$ e si parla di *deviazione assiale destra* se l'inclinazione supera $+90^\circ$, di *deviazione assiale sinistra* quando l'inclinazione è minore di -30° . L'ampio campo di variazioni nell'orientamento dell'asse elettrico che si ha in condizioni fisiologiche dipende dalla costituzione del soggetto: in individui bassi e tarchiati il cuore assume una posizione più orizzontale (l'asse devia a sinistra), mentre in individui alti e magri il cuore ha una posizione più verticale (l'asse devia a destra).

LE DERIVAZIONI UNIPOLARI DEGLI ARTI

Un altro sistema di derivazione è rappresentato dalle “derivazioni unipolari degli arti a voltaggio aumentato” (o di Goldberger). Per questo tipo di registrazioni, due arti sono collegati al polo positivo dell'elettro-cardiografo, mentre il terzo arto

è collegato al polo negativo. Quando il polo positivo è connesso al braccio destro la derivazione è chiamata aV_R (R=right), se è connesso al braccio sinistro la derivazione è detta aV_L (L=left), mentre se è connesso con la gamba sinistra si ha aV_F (F=foot) (Figura 3-a).

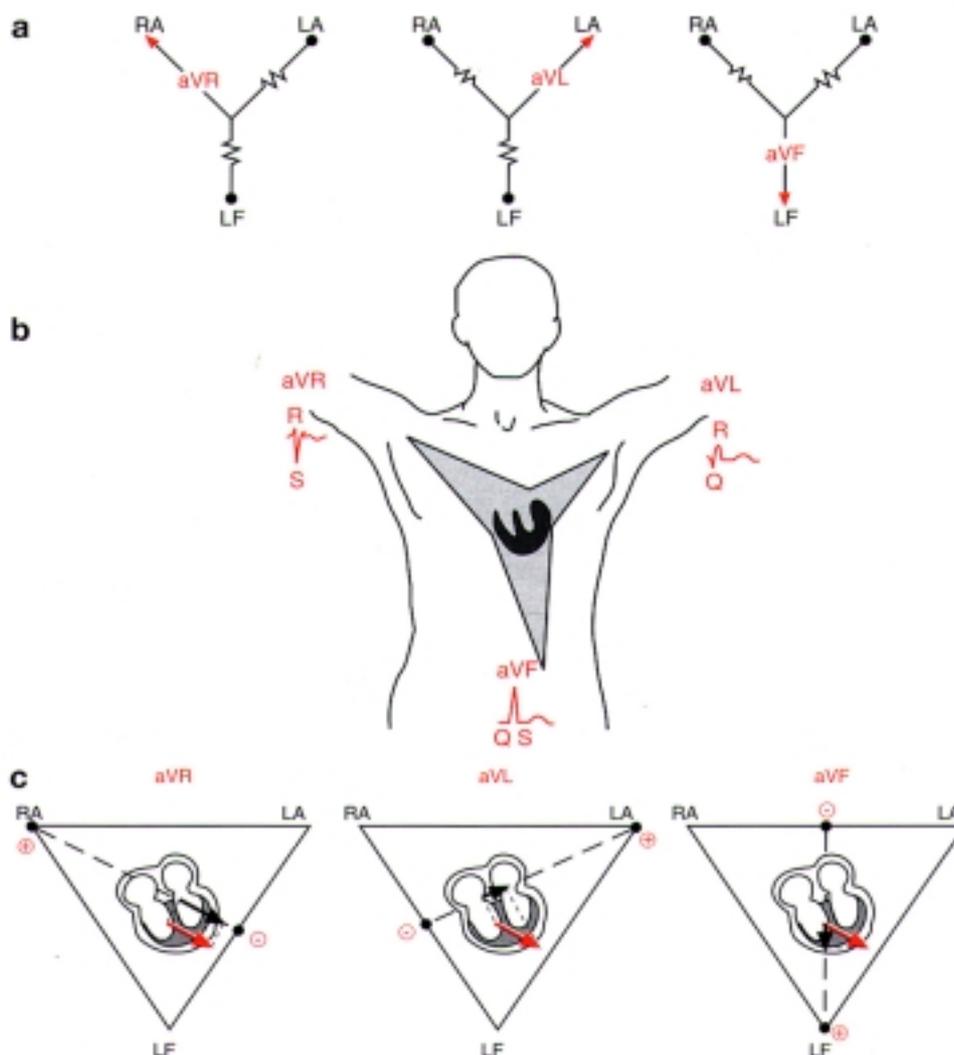


Figura 3: Riquadro a: Schema elettrico delle derivazioni unipolari degli arti aumentate secondo Goldberger. In ciascuna derivazione si ha un elettrodo critico (freccia rossa), mentre gli altri 2 elettrodi (indicati con un punto nero) sono connessi a formare l'elettrodo di riferimento. Riquadro b: Tracciati tipici che si registrano in aV_R , aV_L , e aV_F . Riquadro c: Rappresentazione dell'asse di derivazione (linea tratteggiata che marca la bisettrice) sul quale si proietta il vettore cardiaco. Il vettore rappresentato è quello dell'eccitazione ventricolare (freccia rossa), che risulta dare una proiezione (freccia nera) discorde rispetto all'asse di derivazione solo in aV_R . Quindi solo in tale derivazione si ha un deflessione negativa.

Questo sistema di derivazioni fa sì che il potenziale che si registra sia aumentato del 50% rispetto a quello che si osserva utilizzando le derivazioni bipolari di Einthoven. In soggetti normali il tracciato elettrocardio-

grafico è simile alle derivazioni standard in aV_F e aV_L , mentre risulta invertito in aV_R (Figura 3-b). Queste derivazioni sono disposte lungo le bisettrici del triangolo (Figura 3-c).

BIBLIOGRAFIA

- Rhoades R.A. and Tanner G.A *Fisiologia Medica* 1996 EdiSES
- Agnati L.F. *Fisiologia Cardiovascolare* 1996 Piccin
- Guyton C.A. *Trattato di Fisiologia Medica* 1995 Piccin
- Berne R.M and Levy M.N. *Fisiologia* 2000 Ambrosiana
- Morhman D.E and Heller L.J. 1992 *Fisiologia Cardiovascolare* McGraw-Hill