

Elettromiografia

Marcello Bracale

IL SEGNALE ELETTROMIOGRAFICO

In questo capitolo si descrive il muscolo nella sua interezza, i fenomeni elettrici che lo interessano ed il conseguente segnale elettromiografico superficiale prodotto, cercando di dare un quadro dettagliato di tutti gli altri argomenti ad essi inerenti .

1.1 ELETTROMIOGRAFIA: CENNI STORICI

Il segnale EMG è notevolmente complesso, in quanto dipende da proprietà anatomiche, fisiologiche dei muscoli e dallo stato del sistema nervoso periferico.

Per **elettromiografia** si intende la registrazione dell'attività elettrica del muscolo e, in generale, anche lo studio, condotto attraverso l'analisi del segnale elettromiografico prodotto durante la contrazione muscolare, della fisiopatologia muscolare.

I primissimi cenni all'esistenza di una relazione tra attività elettrica e contrazione muscolare si trovano nei lavori di F. Redi nel 1666, ma solo due secoli più tardi, nel 1844, C. Matteucci ne diede una spiegazione e una prova [1].

A cinque anni dopo, nel 1849, risale la prima registrazione di un segnale **elettromiografico** (EMG) realizzata dal francese D. Raymond, seguita da altre effettuate nel 1907 dal tedesco Piper. A Kasser ed Erianger, nel 1922, dobbiamo, mediante l'impiego di uno dei primi tubi a raggi catodici, la visualizzazione su uno schermo oscillografico del segnale EMG. A questi studiosi venne assegnato, nel 1944, il premio Nobel per le interpretazioni che essi diedero a tale attività elettrica.

A Buchthal e la sua scuola di Copenaghen dobbiamo lo studio sull'impiego effettivo del segnale EMG quale strumento di indagine sulle condizioni del sistema neuro muscolare.

Col passar degli anni, l'elettronica offrì strumenti sempre più affidabili, permettendo a neurologi, chinesiologi e ortopedici di fare un uso routinario dell'elettromiografia .

Con gli elettrodi ad ago e cutanei (di argento - cloruro di argento elettricamente stabili e poco rumorosi) si sviluppò, da un lato, lo studio sulla morfologia dei cosiddetti "*potenziali d'azione di unità notoria*" per una diagnosi di patologia neuro muscolare e, dall'altro, quello relativo al cammino e in generale all'attività globale del muscolo.

Negli ultimissimi anni le tecniche di prelievo, registrazione ed elaborazione del segnale EMG hanno avuto uno sviluppo notevole, per tutta una vasta gamma di applicazioni [2].

1.2 IL MUSCOLO

1.2.1 La funzione del muscolo

La funzione del muscolo è quella di creare una forza per stabilizzare o per muovere un'articolazione. La forza che il muscolo produce attraverso la contrazione dipende da diversi fattori, ma è comunque direttamente proporzionale alla sezione trasversa del muscolo stesso.

E' un'osservazione comune che l'allenamento di forza produce ipertrofia muscolare, mentre l'immobilizzazione in un apparecchio gessato, ad esempio, comporta una riduzione del volume muscolare, della forza, della capacità all'esercizio e della coordinazione neuro muscolare. E' evidente, quindi, come la macchina muscolare sia dotata di plasticità, sia in grado cioè di

modificare la propria struttura e, quindi, le prestazioni in rapporto alle variazioni delle richieste funzionali.

1.2.2 Struttura della fibra muscolare striata

Ciascun muscolo è formato da cellule cilindriche allungate, le *fibre muscolari serate*. Ogni fibra è circondata da un sottile strato di tessuto connettivo (l'endomisio) e le singole fibre sono poi riunite in fasci da uno strato più spesso, sempre di natura connettivale, il perimisio. L'intero muscolo è poi circondato dall'epimisio.

Il tessuto connettivo che circonda il muscolo, separa i fascicoli e avvolge ciascuna fibra muscolare, è molto più resistente allo stiramento di quanto non lo siano le fibre muscolari, per cui, il grado di allungamento del muscolo, è tanto più limitato, quanto più connettivo esso contiene. Il muscolo non ha una grande capacità di rigenerazione, per cui qualunque danno importante dà luogo a sostituzione delle fibre muscolari lese con tessuto connettivo e adiposo. Il diametro della fibra varia da 20 a circa 100 micron e la sua lunghezza da pochi millimetri fino a più di 10 cm. Essa è rivestita da una membrana, il sarcolemma, e al suo interno sono stipate migliaia di miofibrille, che decorrono parallele tra loro (fig. 1.2. 1).

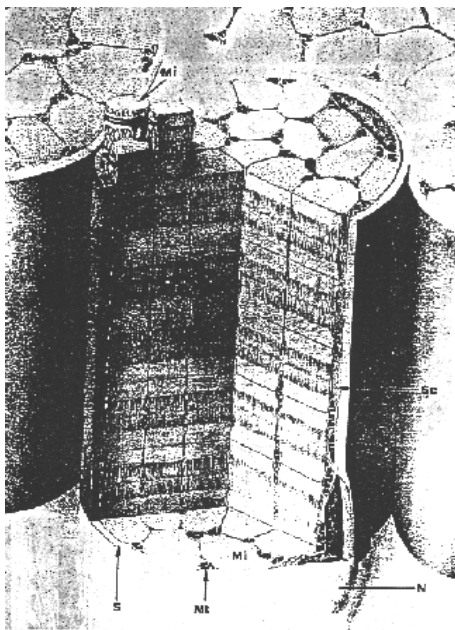


Fig. 1.2.1 - Rappresentazione schematica di una fibra muscolare in sezione assiale.

La miofibrilla è un sottilissimo cilindro del diametro di 1 - 3 micron. La striatura, caratteristica del muscolo (muscolo striato), è dovuta alla regolare alternanza nelle miofibrille, di dischi scuri anisotropi e di dischi chiari isotropi. Il segmento di miofibrilla, comprendente una banda scura e due mezze bande chiare, è detto sarcomero e rappresenta l'unità contrattile del muscolo scheletrico.

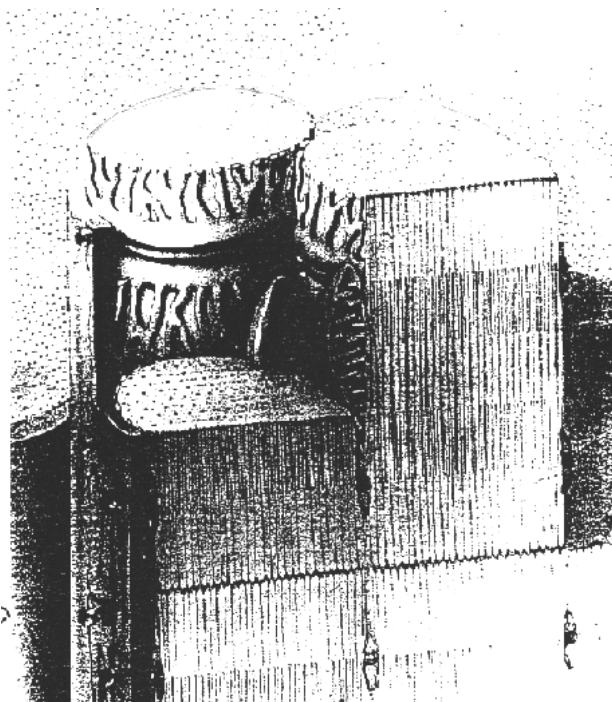


Fig. 1.2.2 - Ingrandimento del disegno precedente, mostra in dettaglio tre miofibrille.

Il sarcomero è costituito da fasci di filamenti, regolarmente intercalati tra loro, i miofilamenti. Essi si distinguono, in base al loro spessore, in filamenti spessi e sottili. I filamenti spessi (500 - 1000 per fibrilla) hanno una lunghezza di 1.5 - 2 micron e diametro di 160 Angstrom; sono formati ciascuno dall'intreccio di diverse centinaia di molecole di miosina avente una lunghezza di 1200 Angstrom.

I filamenti sottili, formati da actina ed altre molecole, hanno una lunghezza di 1 micron e diametro di 55 Angstrom.

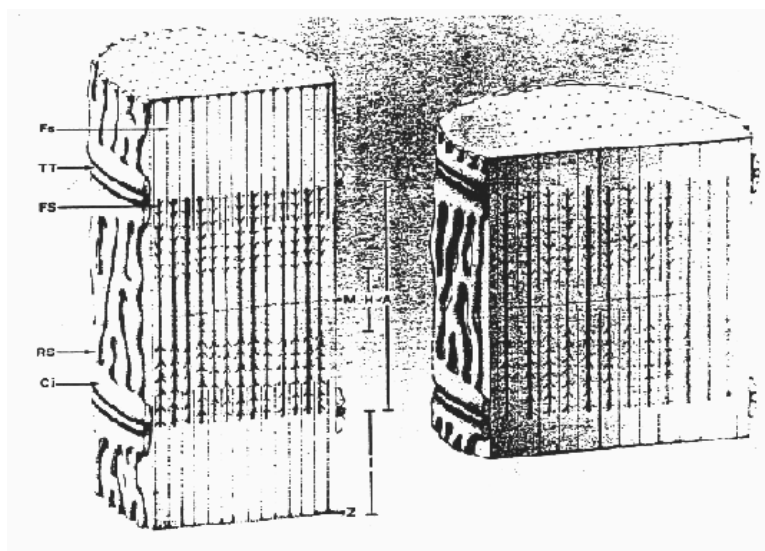


Fig. 1.2.3 - Rappresentazione di un sarcomero in fase di riposo a destra e di contrazione a sinistra

1.2.3 Modello meccanico del muscolo

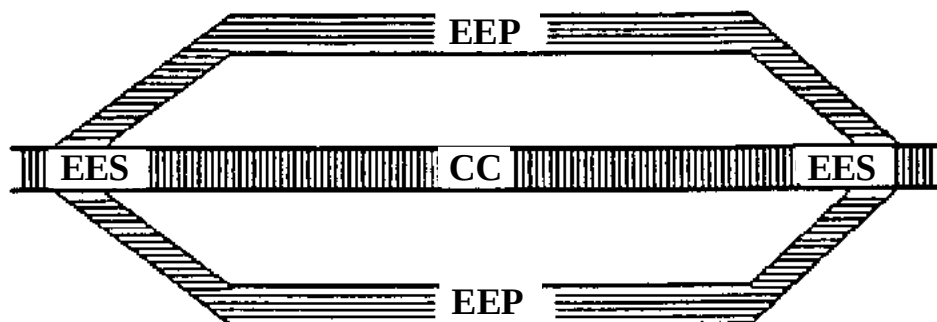


Fig. 1.2.4 - Modello meccanico del muscolo

Il modello meccanico del muscolo può essere così schematizzato :

- **CC** = componente contrattile, data dal sarcomero;
- **EEP** = elementi elastici posti attorno alla componente contrattile e quindi in parallelo costituiti dalle guaine fibrose dei fascicoli muscolari, dalle guaine delle fibre muscolari (sarcolemma) e dal connettivo tra le fibre (endomysio);
- **EES** = elementi elastici in serie, costituiti dai tendini, le linee zeta e i ponti di actomiosina.

Il muscolo rilassato, a riposo, è elastico: resiste, cioè, allo stiramento oltre la lunghezza di riposo.

L'elasticità del muscolo, che dà luogo alla resistenza allo stiramento, è data dal tessuto connettivo che avvolge la componente contrattile, che, quindi, è in parallelo con essa. Quando il muscolo si contrae, prima che la tensione si possa manifestare nei tendini (EES), deve comparire nel tessuto connettivo (EEP).

1.2.4 Proprietà meccaniche del muscolo

Un muscolo di una data lunghezza è formato da numerose fibre muscolari poste in parallelo, cioè una di fianco all'altra, e ciascuna fibra è composta da numerose miofibrille, poste in parallelo e di lunghezza uguale a quella del muscolo. Ciascuna miofibrilla è formata da un certo numero di sarcomeri, di lunghezza uguale tra loro e posti uno di seguito all'altro, cioè in serie.

Quando una singola miofibrilla si contrae sviluppa una tensione uguale a quella unitaria di un singolo sarcomero. Il muscolo, contraendosi in toto, produce una forza complessiva data dalla somma delle forze sviluppate da ogni singolo elemento posto in parallelo. In definitiva, la forza prodotta da un muscolo con la contrazione, è proporzionale al numero di miofibrille poste in parallelo, cioè alla sua sezione trasversa.

L'accorciamento totale è dato dalla somma degli accorciamenti dei singoli sarcomeri, pertanto è proporzionale al numero di sarcomeri posti in serie, cioè alla sua lunghezza. Poiché ciascun sarcomero, contraendosi, si accorcia di l nel tempo t , la velocità di accorciamento della miofibrilla, e quindi del muscolo, è uguale alla velocità di accorciamento di un sarcomero, l/t , moltiplicata per il numero di sarcomeri in serie: la velocità di accorciamento di un muscolo è proporzionale alla sua lunghezza.

1.2.5 Tipologia delle fibre muscolari

I muscoli, a seconda di come le fibre muscolari decorrono rispetto ai tendini, si distinguono in fusiformi e pennati. Inoltre essi si distinguono in volontari ed involontari. I muscoli striati sono muscoli volontari e ancorati, per lo più, su segmenti scheletrici, mentre quelli lisci, indipendenti dalla volontà, formano membrane continue intorno a vasi e visceri.

Le fibre muscolari si distinguono nelle seguenti categorie:

- **Tipo I** = fibre muscolari rosse a contrazione lenta e grande resistenza alla fatica; sono innervate da piccoli motoneuroni e possiedono una ricca vascolarizzazione capillare;
- **Tipo II B** = fibre muscolari bianche a contrazione rapida e poco resistenti alla fatica; sono innervate da grossi motoneuroni e caratterizzate da una attività intensa ma per un tempo breve;
- **Tipo II A** = fibre muscolari a contrazione rapida, dotate di una maggiore resistenza all'affaticamento rispetto a quelle di tipo II B [3].

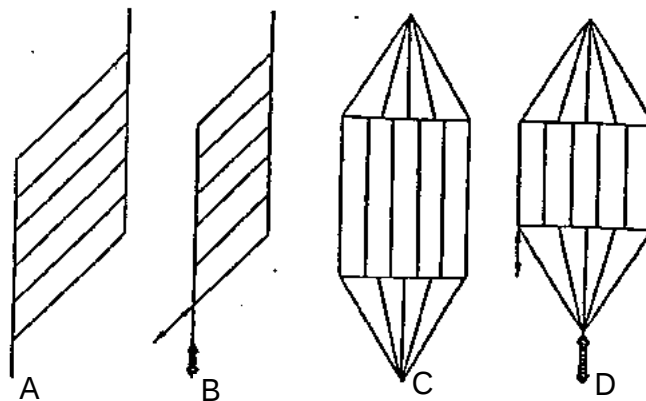


Fig. 1.2.5 Nello schema sono mostrati due tipi di disposizione delle fibre muscolari sia a riposo che in contrazione. (A) Disposizione delle fibre pennate a riposo. I tendini sono rappresentati dalle linee di prolungamento dei due lati del parallelogramma. (B) Lo stesso muscolo al massimo accorciamento. Le fibre muscolari si sono accorciate di un terzo della loro lunghezza di riposo lungo il loro asse come indicato dalla freccia sottile. Il muscolo in toto si accorcia meno (freccia spessa) di quanto si accorciano le singole fibre che lo compongono. tale differenza dipende dall'angolo tra le direzioni di accorciamento delle fibre e quella del muscolo. (C) Fibre di un muscolo fusiforme a riposo. Le linee che si irradiano dalla base del rettangolo e si portano ad un punto rappresentano i tendini. (D) Lo stesso muscolo al massimo accorciamento. Le fibre muscolari e il muscolo in toto si sono accorciati di un terzo in quanto direzione di trazione sui tendini e direzione di accorciamento delle fibre coincidono. Così benché le fibre in A e in C abbiano uguale lunghezza, l'accorciamento in B è minore di quello in D.

1.3 LA CONTRAZIONE MUSCOLARE

1.3.1 Il tessuto nervoso

I muscoli scheletrici sono innervati da grosse fibre nervose, le cui origini sono i motoneuroni alfa, situati nelle corna anteriori del midollo spinale. Tali nervi di moto si portano al muscolo tramite i loro prolungamenti assonali (fibra nervosa), le cui ramificazioni terminali prendono ciascuna contatto con una singola fibra muscolare.

Il **neurone**, cellula nervosa elementare, è formato da numerosi dendriti, dalle sinapsi (dendriti e sinapsi formano l'organo di entrata del neurone), da un nucleo, un corpo cellulare, detto soma, da cui prende origine l'assone che, con la sua arborescenza più o meno pronunciata, forma l'organo di uscita del neurone. L'assone può essere rivestito da una guaina, detta mielina, e lungo esso sono presenti i nodi di Ranvier, mentre tutta la cellula nervosa è rivestita da una membrana.

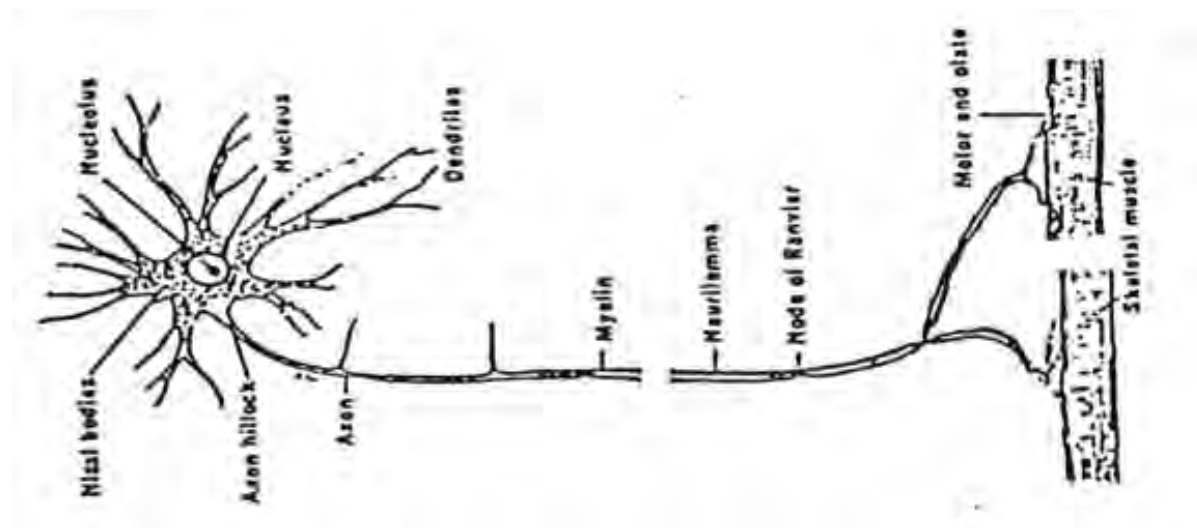


Fig 1.3.1 - Neurone

Due importanti caratteristiche fanno della cellula nervosa un punto importante nella trasmissione delle informazioni:

- l'*eccitabilità*, cioè la capacità di generare un potenziale d'azione qualora la si ecciti con uno stimolo di ampiezza e durata opportune;
- la *conduttività*, cioè la capacità di propagare tale potenziale per una distanza rilevante e ad una velocità praticamente costante [4],

Gli stimoli sono raccolti dal corpo cellulare e dai dendriti e trasmessi all'assone. I singoli neuroni sono funzionalmente connessi tra loro mediante particolari zone di contatto, dette **sinapsi**, preposte alla trasmissione dell'impulso nervoso. In ogni caso, la trasmissione dell'impulso nervoso avviene in una sola direzione, il che permette di distinguere, in una sinapsi, la componente pre e post-sinaptica. La componente pre-sinaptica si presenta espansa, costituendo il bulbo pre-sinaptico, caratterizzata dalla presenza di numerosi mitocondri e di vescicole, queste ultime contenenti il mediatore chimico, acetilcolina, responsabile della trasmissione dello stimolo [5].

1.3.2 L'unità motoria

L'unità funzionale del muscolo è l'unità motoria (UM): è l'insieme del motoneurone e delle fibre muscolari che esso innerva. Le fibre muscolari di una unità motoria hanno nel muscolo una disposizione casuale, non contigua, sono, cioè, frammiste a mosaico con fibre muscolari appartenenti ad altre unità motorie.

Le unità motorie variano molto per quanto riguarda il numero di fibre muscolari: vi sono UM con 10 - 20 fibre muscolari, altre con più di 2000 e ciò influenza la forza generata dall'attività motoria stessa. Generalmente i muscoli preposti al controllo dei movimenti più fini hanno un basso numero di fibre muscolari per unità motoria; invece, i muscoli preposti a movimenti più grossolani sono usualmente caratterizzati da un elevato numero di fibre muscolari per unità motoria.

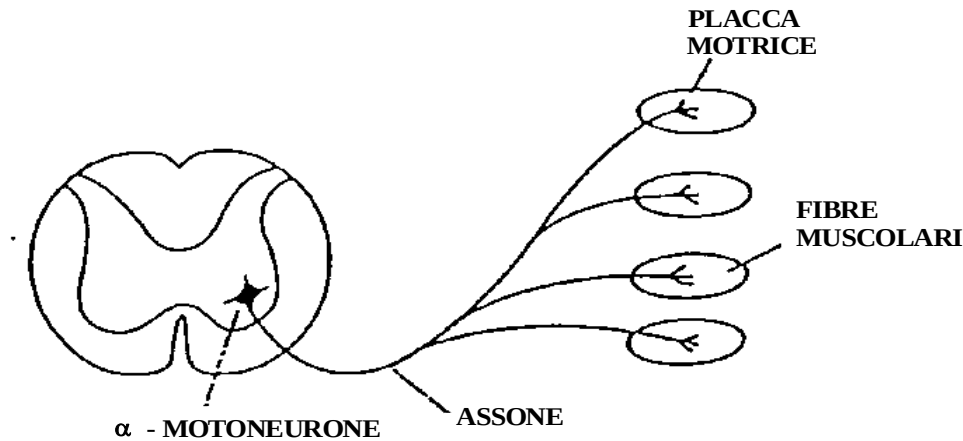


Fig. 1.3.2 - Singola unità motoria

I motoneuroni hanno dimensioni diverse: quelli che innervano le unità motorie composte da fibre muscolari a contrazione rapida sono più grandi di quelli delle unità motorie composte da fibre muscolari a contrazione lenta. Il potenziale post - sinaptico eccitatorio ha un'intensità inversamente proporzionale alla grandezza del soma del motoneurone.

I motoneuroni delle UM di tipo lento raggiungono prima la soglia di eccitabilità. Dato che la tensione sviluppata da ogni singola fibra muscolare è direttamente proporzionale all'area della sua sezione trasversa, la stimolazione di una unità motoria di tipo veloce, a parità di numero di fibre muscolari, comporta lo sviluppo di una forza maggiore di quella prodotta dalle UM di tipo lento [1] [3].

Il punto di innesto o terminazione della fibra nervosa motrice è detto **placca motrice** o **sinapsi neuromuscolare**.

La placca motrice è composta da due componenti: una pertinente alla cellula muscolare, l'altra alla fibra nervosa. La componente muscolare risulta di piccole invaginazioni del sarcolemma, dette fessure sinaptiche secondarie. La componente spettante alla fibra nervosa è costituita dalla porzione terminale dell'assone e ramificata nelle fessure sinaptiche primarie. La giunzione neuromuscolare ha dunque l'architettura generale di una comune sinapsi, con l'assolemma come membrana presinaptica, il sarcolemma come membrana postsinaptica e lo spazio intersinaptico contenente materiale glicoproteico. E' nell'assoplasma presinaptico che sono presenti le vescicole, contenenti nel caso specifico acetilcolina [5].

1.3.3 Il potenziale d'azione

La cellula e il suo ambiente sono assimilabili a due soluzioni ricchissime di ioni, separate da una membrana semipermeabile. Le dimensioni dei pori della membrana cellulare sono tali da lasciar passare liberamente gli ioni Cl^- , K^+ , ostacolare quelli Na^+ ed impedire il passaggio degli anioni organici A^- ; essa è, cioè, selettiva.

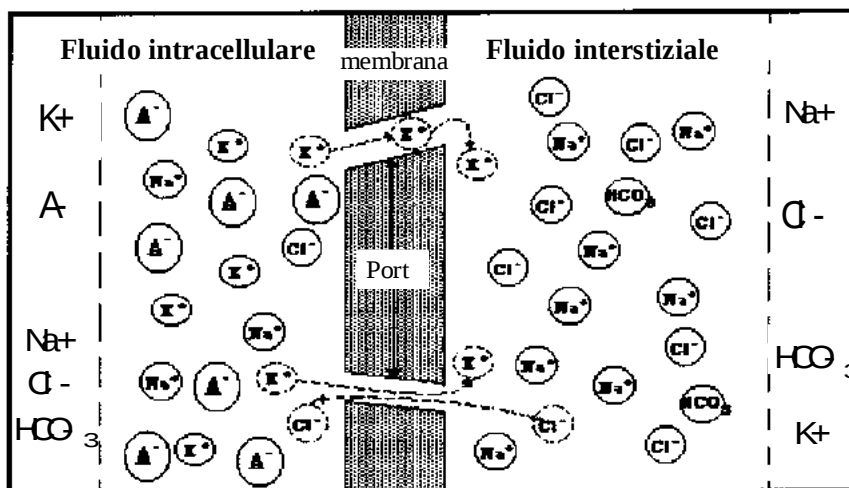


Fig. 1.3.3 - La cellula : interno – membrana - esterno.

La non omogenea distribuzione degli ioni determina una differenza di potenziale elettrico ai lati della membrana, con il lato interno negativo e quello esterno positivo. Tale differenza di potenziale è detta "**potenziale di membrana**" ed ha in tutte le cellule un valore costante,, compreso tra -70 e -90 mV. All'interno della cellula gli ioni più abbondanti sono quelli K^+ e gli anioni proteici, accompagnati da piccole quantità di ioni Na^+ e Cl^- . Nell'ambiente extracellulare vi è un'elevata quantità di Na^+ e Cl^- e piccole quantità di K^+ . Esistono due metodi fondamentali mediante i quali i potenziali di membrana prendono origine:

1. la "pompa sodio - potassio" ATP dipendente (meccanismo di trasporto attivo di ioni contro il gradiente elettrico e quello di concentrazione, sostenuta dall'acido adenosin- trifosfato o ATP), che provoca uno sbilanciamento tra cariche negative e positive presenti ai due lati della membrana: gli ioni sodio vengono portati dall'interno verso l'esterno e quelli potassio dall'esterno all'interno;
2. la diffusione di ioni attraverso la membrana, conseguente ad una differenza di concentrazione tra i due lati della membrana stessa.

Le variazioni del potenziale di membrana vengono chiamate "**potenziali d'azione**" [6].

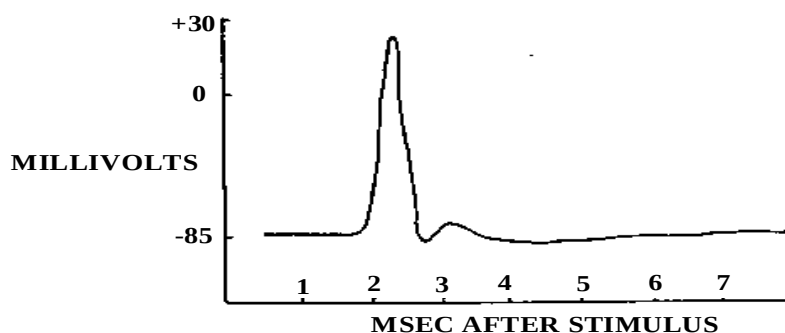


Fig. 1.3.4 - Potenziale di azione in una fibra nervosa nel punto di stimolazione

Quando varia la tensione al colle dell'assone per effetto delle sinapsi eccitatrici agenti sul neurone si ha una variazione della permeabilità della membrana al sodio e al potassio: un aumento della permeabilità allo ione sodio nello stato di eccitazione, una diminuzione di questa ed un aumento della permeabilità allo ione potassio nel ritorno allo stato di riposo [1], [4].

Il potenziale d'azione è alla base del fenomeno di eccitabilità delle cellule e in particolare di quelle nervose e muscolari, che ne fanno uso rispettivamente per trasmettere messaggi e per rispondere agli stessi. In definitiva, quando uno stimolo adeguato agisce su una cellula nervosa, in quel punto si ha un passaggio libero di ioni attraverso la membrana ed una conseguente brusca variazione del potenziale di membrana che, in un primo tempo si annulla, poi assume valori positivi ed infine ritorna al valore di riposo.

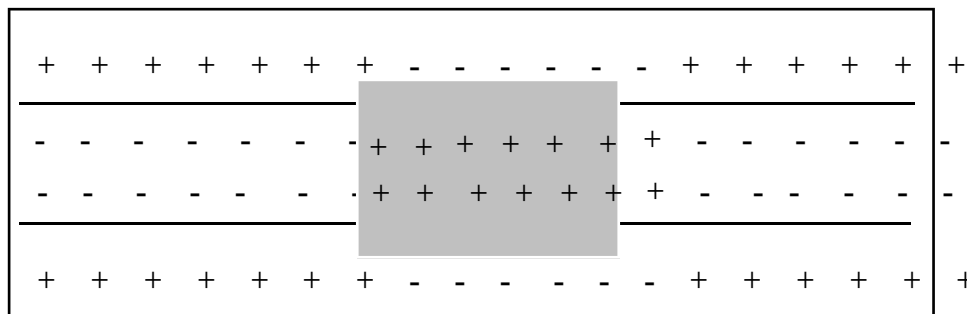


Fig. 1.3.5 - Fibra nervosa : sequenza di depolarizzazione - ripolarizzazione in movimento

Il fenomeno è detto “**depolarizzazione**” e si propaga lungo tutta la fibra nervosa, in quanto determina un movimento di ioni dalla regione contigua non stimolata verso quella stimolata, con depolarizzazione della regione non stimolata, che a sua volta stimola la regione adiacente e così via. Lo stimolo si propaga ad una eventuale cellula muscolare con la quale la fibra nervosa può essere in rapporto [7].

1.3.4 La curva intensità durata

L'eccitazione di una fibra nervosa o muscolare dipende sia dall'ampiezza che dalla durata dello stimolo.

L'attivazione è possibile con un impulso di durata ridotta solo se la sua ampiezza è aumentata e viceversa. Se la durata T dell'impulso permette di avere una differenza di potenziale E_d (differenza tra la soglia e il potenziale di riposo) allora si ha l'eccitazione.

Con il termine “*soglia*” (in genere dell'ordine di 30 mV, ma dipendente dal tipo di cellula e dalla sua storia passata) si indica la quantità di depolarizzazione, rispetto al potenziale di riposo, necessaria per iniziare un potenziale d'azione. Solo quegli stimoli uguali o superiori al valore di soglia provocheranno il trasferimento dell'informazione, la propagazione, cioè, del potenziale d'azione per una distanza rilevante lungo la fibra stessa, senza variazione della forma d'onda e ad una velocità praticamente costante (variabile tra 40 - 70 m/sec. per le fibre nervose, 1.3 - 4.7 m/sec. per le fibre muscolari).

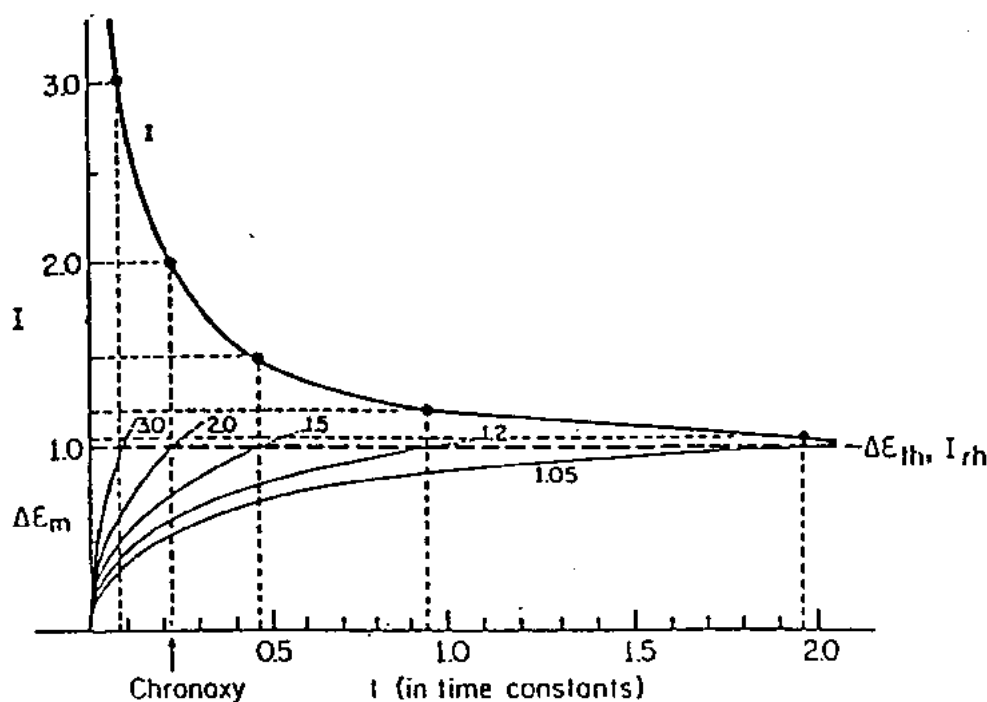


Fig. 1.3.6 Curva intensità - durata : in ordinata il valore di intensità corrente in unità di reobase, in ascissa il tempo in unità pari alla costante di tempo della membrana.

Inoltre due stimoli sublimali possono dar origine ad un potenziale d'azione se si susseguono a breve intervallo (sommazione temporale) o avvengono contemporaneamente, ma in due punti diversi del neurone (sommazione spaziale). La corrente di stimolazione minima, che rende possibile l'attivazione, si ha quando la durata T dello stimolo tende all'infinito (stimolazione a corrente continua): questo valore è individuato come "**corrente di reobase**". La durata di uno stimolo, la cui ampiezza sia doppia del valore di reobase, è detta "**cronassia**". Il tempo di cronassia è dato da:

$$T_c = 0.69 \cdot r_m \cdot C_m$$

[nel nervo $T_c = 0.2$ msec., nel muscolo $T_c = 2$ msec.]

dove il prodotto $r_m \cdot C_m$ rappresenta la costante di tempo della membrana, r_m la sua resistenza e C_m la sua capacità (resistività = $1000 \Omega/\text{cm}^2$, capacità specifica = $2 - 5 \mu\text{F} / \text{cm}^2$).

Durante il periodo in cui la membrana dà origine al potenziale d'azione in risposta ad uno stimolo sopraliminare, la capacità della membrana a rispondere ad un secondo stimolo di qualsiasi tipo è notevolmente modificata. Nella parte iniziale dell'impulso la membrana non può rispondere affatto, anche se lo stimolo è molto forte (*refrattarietà assoluta*); dopo tale intervallo temporale, con uno stimolo forte, prima cioè del riposo completo, si può ottenere un potenziale d'azione (*refrattarietà Relativa*) [4].

1.3.5 Lo scivolamento dei miofilamenti

La meccanica della contrazione muscolare diviene più chiara se si comprende bene la successione nel tempo delle varie fasi che la caratterizzano.

La stimolazione del nervo motorio, seguita da un periodo latente di circa 2 msec. prima che inizi la depolarizzazione del sarcolemma, viene trasmessa alla fibra muscolare a livello della placca motrice.

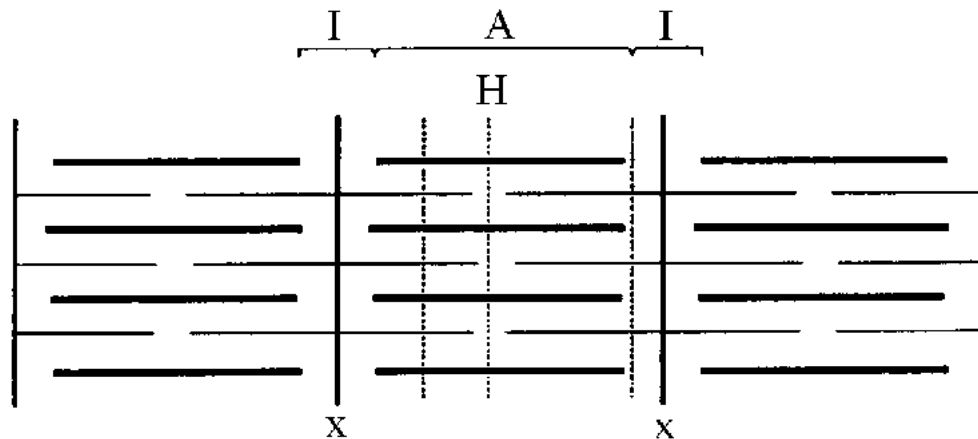


Fig. 1.3.7

Lo stimolo nervoso, arrivato alla parte terminale presinaptica del nervo, libera quanti di acetilcolina (ACH) che si diffondono attraverso lo spazio sinaptico. Questa fase "chimica" della trasmissione neuromuscolare dura 0.3 - 0.5 msec.; segue la depolarizzazione della zona postsinaptica motoria. Da qui la depolarizzazione si propaga lungo tutta la fibra muscolare e dà origine alla risposta contrattile. Dopo la depolarizzazione il sarcolemma si ripolarizza gradualmente tornando alla situazione di riposo in 5 - 10 msec., molto prima che sia raggiunto il picco di tensione della contrazione muscolare.

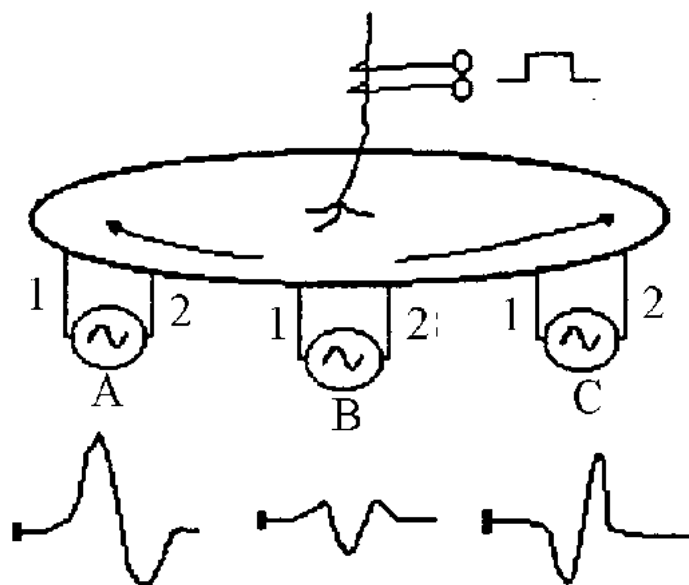


Fig. 1.3.8

Fibra di un muscolo scheletrico e sua innervazione: in alto gli elettrodi stimolanti e in basso quelli per la registrazione.

Nella figura 1.3.9 viene rappresentato il muscolo striato in sezioni successive, partendo, cioè, dall'intero muscolo e schematizzando con ingrandimenti gradualmente le varie componenti fino ai neurofilamenti di miosina (al centro) e actina (ai lati).

L'accorciamento della fibra muscolare con generazione di forza contrattile è il risultato di uno scivolamento tra loro dei due sets di filamenti di ciascuna metà del sarcomero. Lo scivolamento avviene per un processo ciclico. Durante la contrazione ciascun ponte trasversale di miosina si attacca alle molecole di actina del filamento sottile adiacente, esercita forza fino a quando si distacca, dopo aver tirato un po' il filamento sottile verso il centro del sarcomero; inizia quindi un nuovo ciclo, in cui esso si riattacca più oltre lungo il filamento sottile.

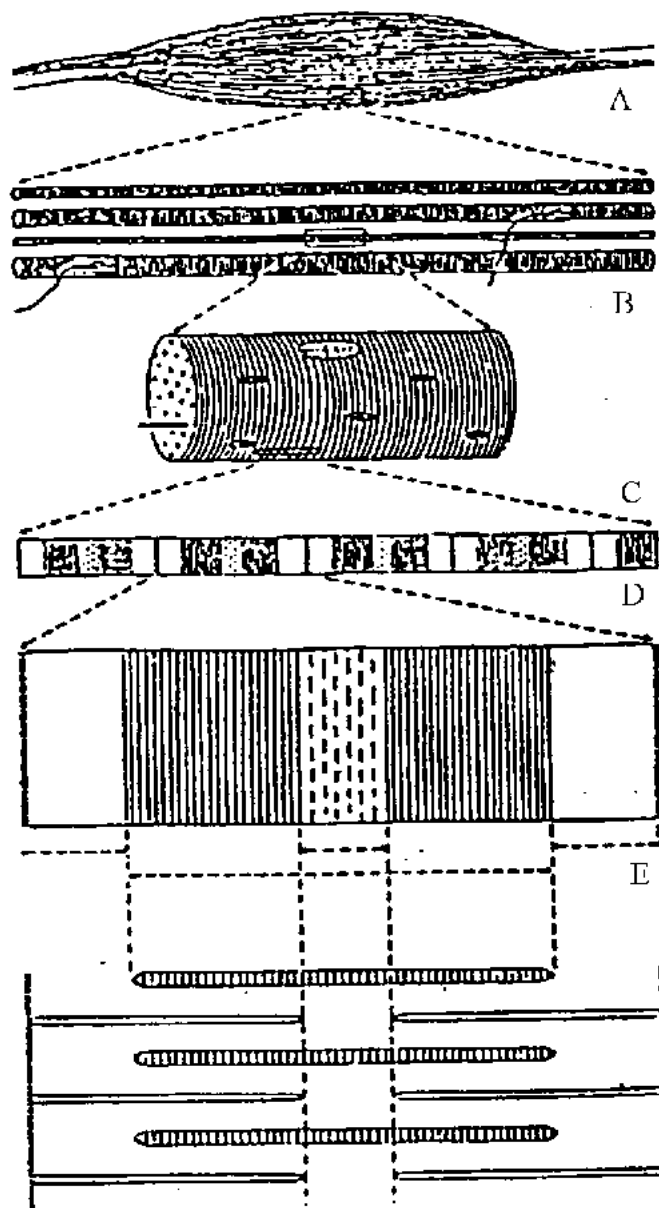


Fig. 1.3.9

L'effetto di questi scivolamenti ripetuti conseguenti al ciclico attaccarsi e distaccarsi dei ponti trasversali di actina e miosina è il completo accorciamento del sarcomero [fig.1.3.10].

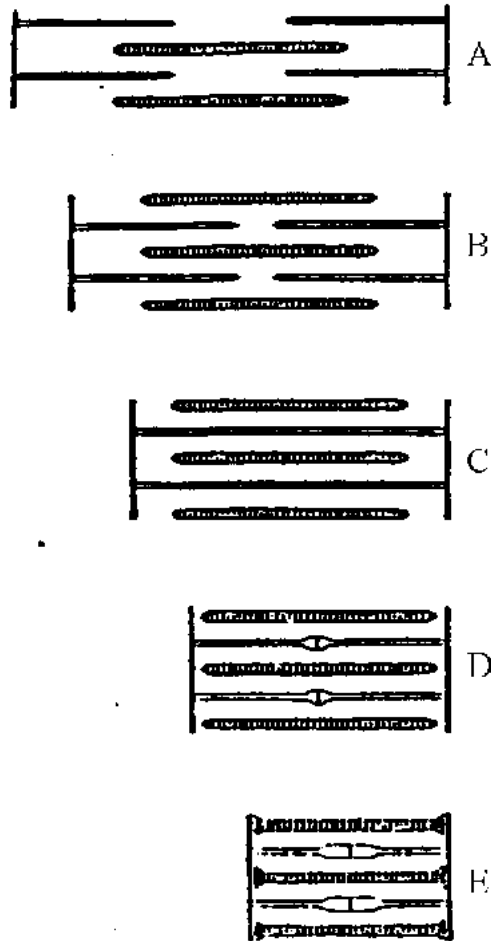


Fig. 1.3.10

1.3.6 Scarica e reclutamento dei motoneuroni

La graduazione della contrazione muscolare è ottenuta grazie a due diversi meccanismi:

1. reclutamento di nuove UM all'aumentare dello sforzo;
2. aumento della frequenza di scarica della singola UM.

La stimolazione della fibra muscolare, poco dopo che è stata evocata una precedente contrazione, dà luogo ad una seconda risposta contrattile che si somma alla precedente. Se, infatti, il secondo stimolo arriva alla fibra muscolare prima che la tensione del primo sia decaduta, la seconda contrazione si sommerà alla prima, dando luogo ad un significativo aumento del picco di tensione (per tempo di contrazione si intende l'intervallo di tempo che intercorre tra l'attivazione della fibra muscolare e il raggiungimento durante la contrazione del picco di tensione).

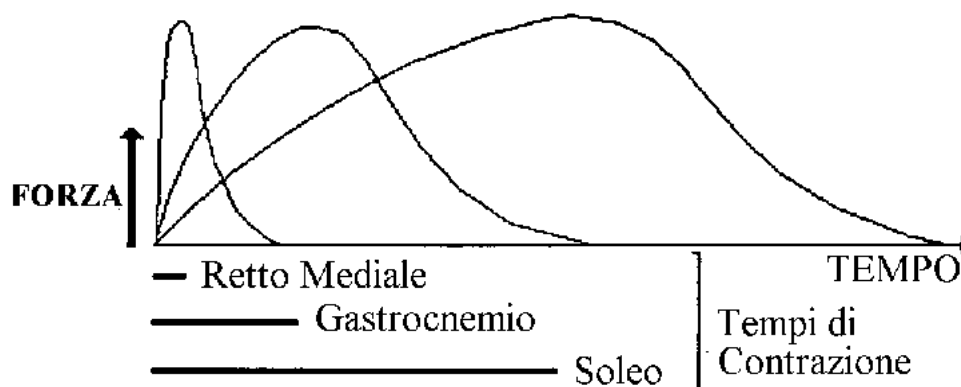


Fig. 1.3.11 Tempo di contrazione di 3 muscoli : il retto interno dell'occhio a contrazione rapida, il soleo a contrazione lenta e il gastrocnemio che ha un tempo di picco intermedio (le barre nere che precedono il nome del muscolo indicano la durata del tempo di picco).

Se una fibra muscolare viene stimolata ripetutamente a brevi intervalli di tempo ne risulterà una fusione delle singole scosse, fino a formare una contrazione continua detta "tetano muscolare", di gran lunga maggiore di quella della singola scossa. La tensione del tetano può essere mantenuta ad un livello costante fino a che continua la stimolazione o il muscolo non si affatica. Le fibre muscolari lente dei muscoli rossi richiedono 20 stimoli al secondo per formare il tetano, mentre quelle rapide dei muscoli bianchi da 60 a 100 stimoli al secondo.

Per comprendere l'adattabilità delle fibre muscolari nelle varie situazioni di esercizio occorre considerare il funzionamento del **motoneurone**.

Ci sono motoneuroni a bassa e ad alta frequenza di scarica. I primi controllano le LTM formate da fibre muscolari a contrazione lenta, i secondi quelle con fibre a contrazione rapida. La frequenza di scarica ottimale del motoneurone è quella minima utile perché le singole scosse muscolari si fondano a formare una contrazione tetanica. La frequenza tetanizzante è intorno ai 20 Hz per le UM di tipo lento e sopra i 50 Hz per quelle di tipo rapido. L'ordine di reclutamento dei motoneuroni risponde al principio della grandezza: minore è il loro diametro e più facile risulta la loro attivazione (più bassa soglia di attivazione).

Le fibre muscolari di tipo lento sono innervate da motoneuroni più piccoli e sono le prime ad essere attivate nel movimento volontario.

Durante le normali attività i motoneuroni più piccoli, a più bassa soglia, scaricano a bassa frequenza per lunghi periodi di tempo, mentre i motoneuroni a più alta soglia, innervanti le fibre di tipo veloce, vengono attivati solo occasionalmente in brevi scariche ad alta frequenza.

Nel caso di esercizi di lunga durata ad intensità massimale (allenamenti di resistenza) tutti i motoneuroni scaricano a frequenza moderata, ma appena l'impegno cessa di essere massimale, i motoneuroni a soglia più elevata smettono di scaricare. Al contrario, durante l'esercizio ad impegno massimo ma di breve durata (allenamenti di forza) tutti i motoneuroni scaricano per lunghe sequenze ad alta frequenza. La scarica sincrona di diverse UM produce tensione massimale, mentre quella asincrona è associata ad un prolungamento massimo della contrazione (resistenza) [1],[3].

1.4 IL SEGNALE EMG SUPERFICIALE

1.4.1 Genesi elettrica

In condizioni normali, un potenziale d'azione si propaga lungo il motoneurone e attiva tutti i suoi rami; questi, a loro volta, attivano tutte le fibre muscolari dell'unità motoria. Quando la membrana

post-sinaptica della fibra muscolare è depolarizzata, tale depolarizzazione si propaga in entrambe le direzioni. La membrana depolarizzata, che è accompagnata da un movimento di ioni, genera un campo magnetico nelle vicinanze delle fibre muscolari. Un elettrodo localizzato in tale campo rileverà il potenziale, la cui escursione temporale è nota come **potenziale d'azione**.

Nel tessuto muscolare umano, l'ampiezza del potenziale d'azione dipende dal diametro della fibra muscolare, dalla distanza tra la fibra muscolare e la posizione dell'elettrodo e dalle proprietà filtranti dello stesso.

L'ampiezza cresce come $V = (K \cdot a)^n$ ove $n = 1.7$, a è il raggio della fibra muscolare e K una costante (Rosenfalck, - 1969); in prima approssimazione il decremento dell'ampiezza è proporzionale alla distanza tra la singola fibra e l'elettrodo di rilevazione.

Le proprietà filtranti dell'elettrodo bipolare sono funzione del punto di rilevamento superficiale, della distanza tra gli elettrodi e delle proprietà chimiche dell'interfaccia metallo elettrolita.

L'istante iniziale di ogni potenziale d'azione è direttamente proporzionale alla lunghezza dei rami nervosi e alla distanza della placca motrice dall'area di prelievo dell'elettrodo; la sua durata è relazionata alla velocità di conduzione della fibra : $3 \div 6$ m/sec. La forma d'onda e lo spettro di frequenza dello spike sono funzione del tessuto interposto tra la fibra muscolare ed il punto di prelievo.

Il segnale risultante, presente nel punto di rilevazione, somma spazio temporale dei singoli potenziali d'azione prodotti dalle depolarizzazioni delle fibre muscolari di una unità motoria, è chiamato MUAP (motor unit action potential). La disparità nel tempo di attivazione per fibre appartenenti ad una stessa unità motoria ha essenzialmente due cause.

Innanzitutto c'è un ritardo variabile dipendente dalla lunghezza e dalla sezione dell'assone che innerva la singola fibra muscolare. Tale ritardo è, comunque, fissato per ciascuna fibra. C'è poi da tener conto del ritardo introdotto dalla scarica di acetilcolina nelle giunzioni neuro muscolari [8]. Infatti poiché tale processo di scarica è di tipo casuale, anche l'eccitazione di ciascuna fibra di un'unità motoria sarà una funzione random del tempo.

Il fenomeno di sfasamento temporale dei potenziali di azione di un'unità motoria, osservato per la prima volta da Ekstedt (1964), appare come un jitter quando si visualizza la scarica elettrica di ciascuna fibra.

In fig. 1.4.2 designato come $h(t)$, è mostrato un MUAP trifasico. Esso è il risultato di una rilevazione effettuata disponendo gli elettrodi superficiali parallelamente alle fibre muscolari, così che ciascun potenziale d'azione, si presenta bifasico. Il segno delle fasi dipende dallo stato della membrana, nella depolarizzazione, rispetto all'elettrodo.

Nella zona di rilevazione degli elettrodi, ci sono i contributi di altre unità motorie, quindi si rilevano una serie di MUAPs. Questi possono avere ampiezza e forma simile, se ogni fibra muscolare appartenente alla rispettiva unità motoria ha la stessa distanza dalla zona di rilevamento. A seconda dell'elettrodo usato, si riscontrano variazioni sulla forma, la fase e la durata dei MUAPs.

L'ampiezza e la forma di un MUAP osservato sono, pertanto, funzione della disposizione geometrica dell'UM, del tessuto muscolare e delle proprietà degli elettrodi utilizzati.

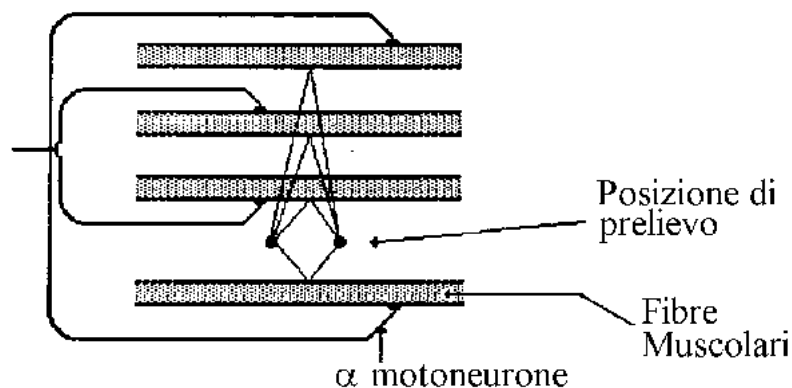


Fig. 1.4.1

In un muscolo normale, ad esempio, l'ampiezza picco-picco di un MUAP rilevato con elettrodo ad ago varia da 5 mV a 500 μ V. La sequenza risultante dei MUAPs è chiamata **MUAPT** (motor unit action potential train). La forma d'onda dei MUAPs entro un MUAPT, resterà costante se la disposizione geometrica tra l'elettrodo di registrazione e le fibre muscolari non cambiano se non ci sono alterazioni biochimiche del tessuto muscolare che potrebbero modificarne le proprietà filtranti e la velocità di conduzione.

Diversi studi sono stati condotti per dare una espressione matematica del MUAPT (Beruhtein, 1967, Libkln, 1968, De Luca, 1975). I MUAPT possono essere descritti completamente dai propri **I.P.I.s** (interpulse interval) e dalla forma d'onda dei MUAP.

Da un punto di vista matematico, conviene descrivere il MUAPT come un processo casuale nel quale i MUAPs, di cui si compone, si presentano ad intervalli di tempo casuali. Per tale approccio si richiede la descrizione matematica della forma d'onda e della frequenza dei MUAPs. Tale frequenza la si ritiene funzione del tempo e della forza F muscolare: $f(t, F)$.

1.4.2 Potenziale d'azione della singola fibra

Con la sigla MAP si indica la forma d'onda di depolarizzazione che si propaga in entrambe le direzioni, lungo ciascuna fibra muscolare, a partire dalla placca motrice. Se supponiamo di trovarci nella situazione ideale in cui la placca motrice sia situata al centro della fibra muscolare, l'onda di depolarizzazione, registrata con elettrodi bipolari, presenta una natura bifasica.

Al variare della posizione di tali elettrodi sulla superficie della fibra muscolare si noterà, ad un certo punto, la comparsa di una piccola e complessa forma d'onda: in corrispondenza del punto in cui si è manifestata l'onda complessa è localizzata la placca neuromuscolare.

Continuando a spostarsi lungo la fibra, successivamente comparirà l'onda bifasica con l'inversione di polarità.

Ekstedt (1964) ha registrato i potenziali delle singole fibre: si tratta di punte bifasiche, spesso seguite da fasi terminali di bassa ampiezza e lunga durata. Il loro valore medio si aggira intorno ai 5 - 6 mV (con un massimo di 25.2 mV) con una durata media di 470 μ sec [8],[9].

1.4.3 Potenziale d'azione delle unità motorie

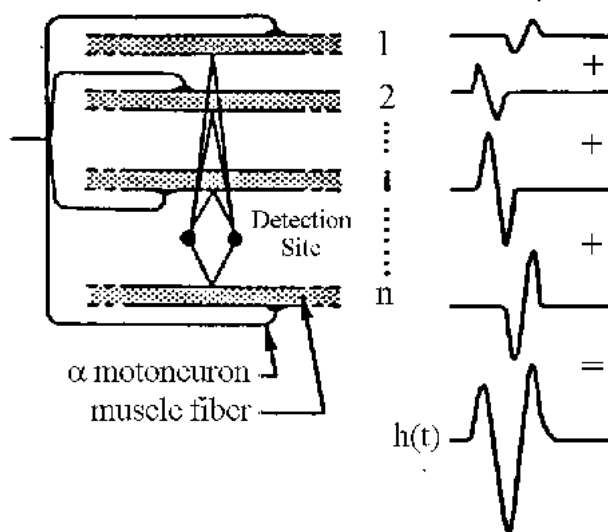


Fig. 1.4.2 - Rappresentazione schematica della generazione di un MUAP.

Il potenziale d'azione di unità motoria (MUAP) rappresenta la forma d'onda di tensione consistente nell'integrazione spazio - temporale dei Potenziali d'azione delle singole fibre che la costituiscono. Alla dispersione spaziale (contrazione di fibre muscolari appartenenti ad altre UM) si aggiunge quella temporale, poichè tutte le fibre muscolari dell'UM non si contraggono esattamente nello stesso istante.

Generalmente più ampio è il MUAP registrato, più grande è l'unità motoria da cui prende origine. Tuttavia, fattori quali la distanza degli elettrodi dall'unità motoria, il tipo di elettrodi, l'attrezzatura adoperata, influiscono sulla configurazione delle singole UM registrate. Anche nel medesimo muscolo i potenziali di LTM, registrati in distretti diversi, presentano significative differenze nella durata.

La forma del potenziale, la sua durata e le relative fasi rappresentano le informazioni utili per uno studio a livello fisiologico che porti validi termini di paragone in situazioni patologiche.

Ad esempio, una percentuale di forme polifasiche superiore al 12 % (indice di una perdita eccessiva di sincronizzazione nella contrazione delle fibre muscolari costituenti l'unità motoria) è da considerarsi patologica (Buchthal).

Per quanto riguarda i valori normali si riscontra, per il MUAP, una durata media di circa 10 msec. ed un'ampiezza media di circa 250 μ V; questi valori si riferiscono a registrazioni effettuate con elettrodi ad ago ed a bassi livelli di contrazione muscolare .

1.4.4 Treno di MUAP

I treni di potenziali d'azione di UM (MUAPT) consistono in una sequenza ripetitiva di MUAP appartenenti ad una specifica unità. L'intervallo tra due scariche consecutive della stessa UM (IPI) dipende dalla durata e dalla contrazione ed anche con uno sforzo costante si presenta irregolare. Tale IPI può essere considerata una variabile aleatoria gaussiana [8],[9].

1.4.5 Tracciati di interferenza

Quando un muscolo viene a trovarsi in tensione, si configura alla superficie cutanea un segnale elettrico (**EMG superficiale**), dato dalla sommazione di segnali, pochi o molto numerosi, provenienti dalla scarica irregolarmente distribuita delle UM .

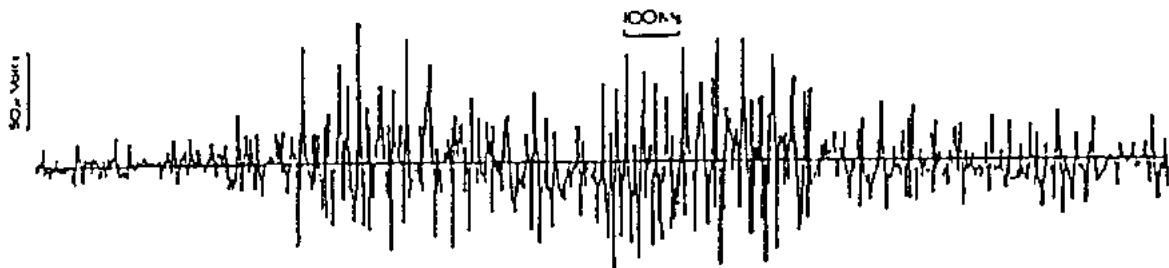


Fig. 1.4.3 - Tracciato di interferenza.

Una singola fibra è in grado di formare un impulso bifasico. Gli impulsi delle numerose fibre che compongono una UM possono, in qualche modo, realizzare una sovrapposizione in rapporto alle

differenti localizzazioni longitudinali delle placche motrici e ai differenti tempi di arrivo dello stimolo nervoso. Inoltre le UM più vicine agli elettrodi daranno un contributo più grande rispetto a quelle situate ad una distanza maggiore. Insomma, l'interazione (spazio - temporale) di tutti i MUAPT provenienti da tutte le UM attive, localizzate nell'area di prelievo degli elettrodi, dà origine al segnale elettromiografico superficiale, altrimenti detto “**tracciato di interferenza**” e tale effetto diviene ancora più visibile qualora, da una lieve contrazione, si passa ad uno sforzo muscolare elevato. Le registrazioni con elettrodi superficiali producono, quindi, dei tipici “**quadri di interferenza**”, abbastanza complessi, che questo lavoro cerca di analizzare, caratterizzare ed elaborare [8].

1.4.6 Natura statistica dell'EMG

I segnali di ingresso degli n sistemi lineari, tempo invarianti, caratterizzati dalle risposte impulsive $h_1(t), \dots, h_n(t)$ sono costituiti dai treni di impulsi nervosi. I blocchi $h_i(t)$ costituiscono i potenziali d'azione delle diverse unità motorie. I coefficienti di peso k_i , che schematizzano il fenomeno del reclutamento fra le UM, sono assunti random e dipendenti dalla collocazione degli elettrodi. Inoltre i treni MUAP si assumono incorrelati.

Il numero di UM attive $n(t)$, che contribuiscono alla formazione del segnale EMG indicato con $e(t)$, è una funzione del tempo e questo implica che il segnale d'uscita $e(t)$ è, in genere, un processo stocastico non stazionario. Inoltre $n(t)$ dipende dal livello di contrazione muscolare.

Prelevato con elettrodi cutanei, amplificato e visualizzato il segnale $e(t)$ ha la caratteristica di un rumore "random". Pertanto esso va inquadrato nell'ambito dei segnali aleatori e studiato con le tecniche relative.

Per analizzare un processo stocastico si utilizzano alcune funzioni fondamentali quali la media, la varianza, l'autocorrelazione, la densità spettrale di potenza ed inoltre si suppongono verificate alcune proprietà, in base a considerazioni fisico - intuitive o a calcoli matematici.

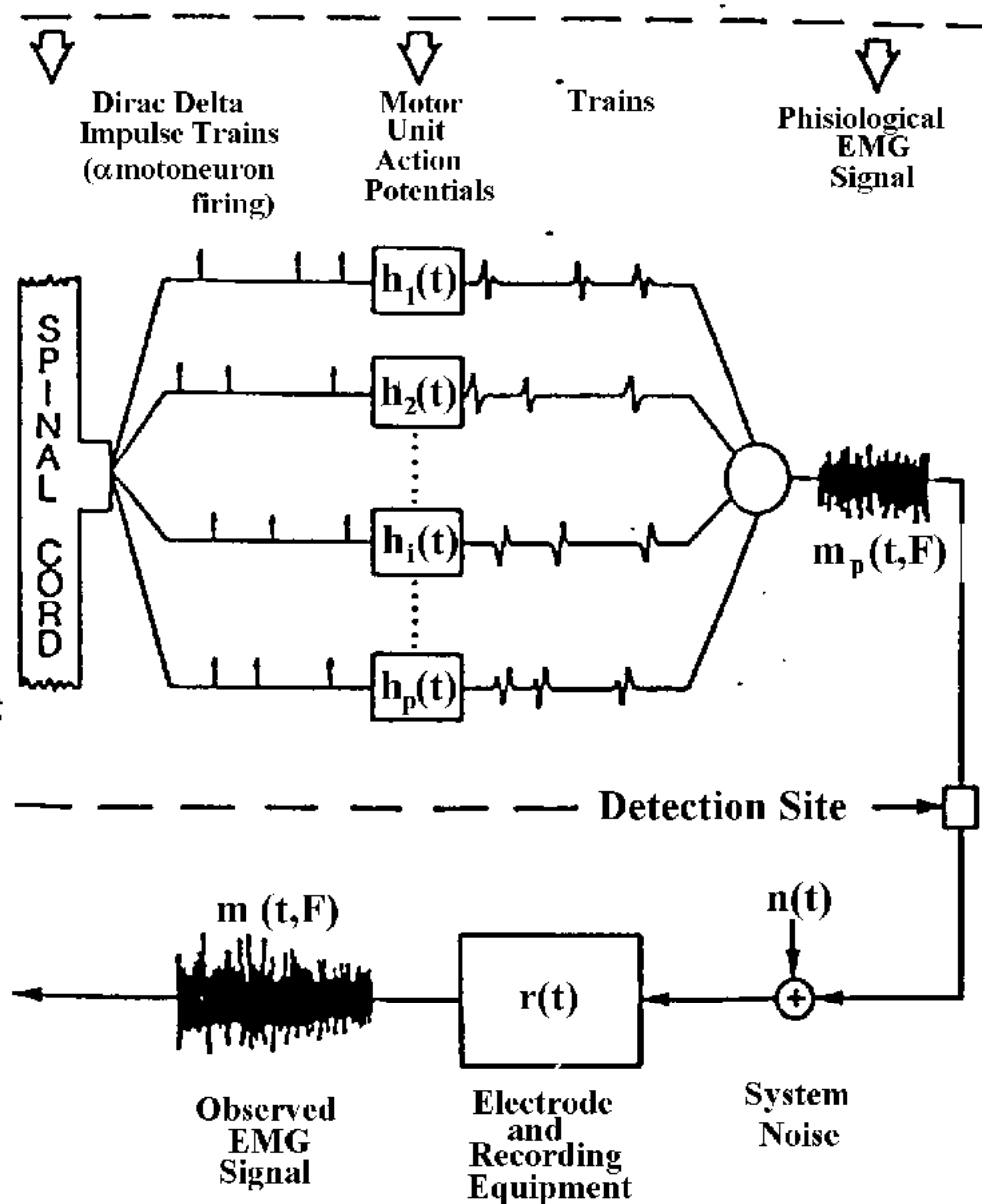


Fig. 1.4.4 - Il segnale EMG : schema a blocchi.

1.4.7 Lo spettro del segnale EMG

Lo spettro del segnale EMG è composto da due parti:

- Una dovuta alle frequenze di sparo delle unità motorie (UM) più grandi e reclutate per ultime; queste contribuiscono con picchi nello spettro, in bassa frequenza, attorno alla frequenza media di sparo delle UM, cioè sui 10-40 Hz.
- La seconda parte è dovuta alla forma dei MUAP, e va dai 50 fino a circa 100 Hz, in funzione di vari fattori, quali la forma e la disposizione degli elettrodi, la distanza delle fibre, la fatica muscolare etc.. -

1.4.7.1 Cambiamenti nello spettro EMG : Alcuni Parametri

Tra i principali parametri fisiologici che caratterizzano il contenuto in frequenza (spettro) del segnale EMG superficiale (MES) ci sono:

- 1) Livello di Tensione muscolare (fatica)
- 2) Lunghezza delle fibre muscolari
- 3) Velocità di propagazione lungo le fibre e durata del potenziale d'azione (AP).

Variazioni nello spettro EMG sono state rilevate con l'aumentare della fatica muscolare (v. fig. 1.4.5). In particolare si è notato uno spostamento verso le basse frequenze dello spettro col procedere dell'esercizio. In corrispondenza si nota un incremento dell'ampiezza.

Altro parametro fondamentale è la lunghezza delle fibre (Inbar et al. 1986): è stata individuata una corrispondenza inversa tra lunghezza delle fibre e frequenza media dello spettro $S(f)$, definita come:

$$f_m = \frac{\int S(f) f df}{\int S(f) df}$$

cioè ad un allungamento delle fibre corrisponde una diminuzione della f_m .

Tale fenomeno può essere spiegato in termini di altri due parametri: velocità e durata dei potenziali d'azione (AP).

Per quel che riguarda la velocità, essa non varia con l'allungamento, mentre, nell'ipotesi che gli elettrodi coprano tutta la lunghezza di una fibra, ad un allungamento corrisponde una durata maggiore del MUAP (infatti, è come se gli elettrodi, su una fibra più lunga, vedessero il MUAP per un tempo maggiore); ciò causa uno spostamento verso le basse frequenze.

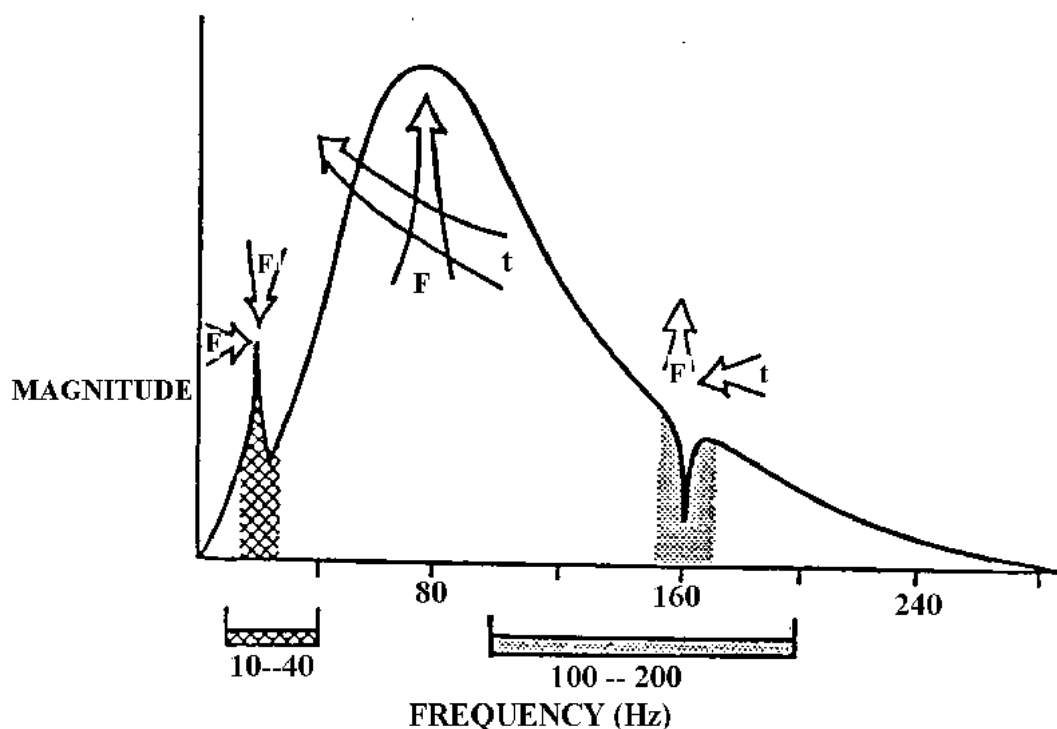


Fig. 1.4.5 - Evoluzione qualitativa dello spettro del segnale mioelettrico cutaneo in funzione della forza e della durata della contrazione. Le frecce indicano la direzione della modificazione di una zona dello spettro prodotta dal crescere della forza o del tempo.

