

ASPETTI CRITICI DELL'ELETTROSTIMOLAZIONE COME MEZZO DI ALLENAMENTO

H. BEULKE

Traduzione da: « *Leistungssport* » 3/78 di Renzo Pozzo

Introduzione

L'elettrostimolazione, come mezzo di allenamento, ha trovato in poco tempo molti sostenitori. E' infatti possibile ottenere un accrescimento rapido della massa muscolare, senza sottoporsi a gravosi allenamenti e questi sono senza dubbio due argomenti molto persuasivi per il suo impiego.

Purtroppo, nella letteratura sportiva dedicata agli allenatori mancano finora informazioni sufficientemente chiare sulla problematica estremamente complessa dell'elettrostimolazione, di cui non è possibile perciò valutare con sufficiente chiarezza gli effetti: negativi e positivi. L'elettrostimolazione infatti non è priva di effetti collaterali indesiderati, la cui importanza non è stata ancora ben chiarita: ci sembra questo un valido motivo perché l'« allenamento stimolatorio » sia trattato con critica attenzione.

Compito del presente articolo è: sia di rendere chiara, in una forma quanto più comprensibile, la problematica dell'elettrostimolazione; sia di mettere in discussione la sua applicazione come mezzo di allenamento nello sport; contribuendo così all'appianamento di un preoccupante squilibrio di informazioni nel settore degli allenatori.

Se partiamo dal principio che l'organismo umano è un sistema adattabile autoregolantesi e autocontrollantesi, l'effetto della stimolazione elettrica nel funzionamento dei suoi sistemi di circuiti di controllo motori non può essere valutato solamente sotto aspetti unilateralmente orientati. Il principio di unità e di interezza categoricamente rispettato nella moderna teoria dell'allenamento — dalla interezza del sistema biomeccanico fino all'unità delle capacità condizionali e coordinative ecc. —, deve logicamente essere considerato valido anche nell'applicazione degli elettrostimoli. Si deve, perciò, considerare la totalità degli effetti dell'elettrostimolazione; non si può valutare la sua utilità, sottolineando unicamente quegli aspetti più facilmente individuali.

A - Principi cibernetici del controllo motorio

Per una migliore comprensione dei capitoli successivi, esponiamo brevemente i principi e le forme organizzative del controllo del movimento; considerando principalmente quegli aspetti che sono importanti nel contesto dell'elettrostimolazione.

L'organismo umano rappresenta, anche in riferimento al suo controllo motorio, un sistema adattabile e autoorganizzantesi.

Ciò viene caratterizzato da una organizzazione gerarchica dei suoi centri di controllo motorio (Fig. 1). In questo, i centri superiori, hanno, per principio, funzioni più importanti di quelli inferiori. Dal molteplice e fitto intreccio anatomico e funzionale dei diversi circuiti regolativi e del reciproco influenzarsi dei vari sistemi di controllo consegue, però, che non solo i centri superiori influiscano sui centri inferiori, ma che avvenga anche l'opposto.

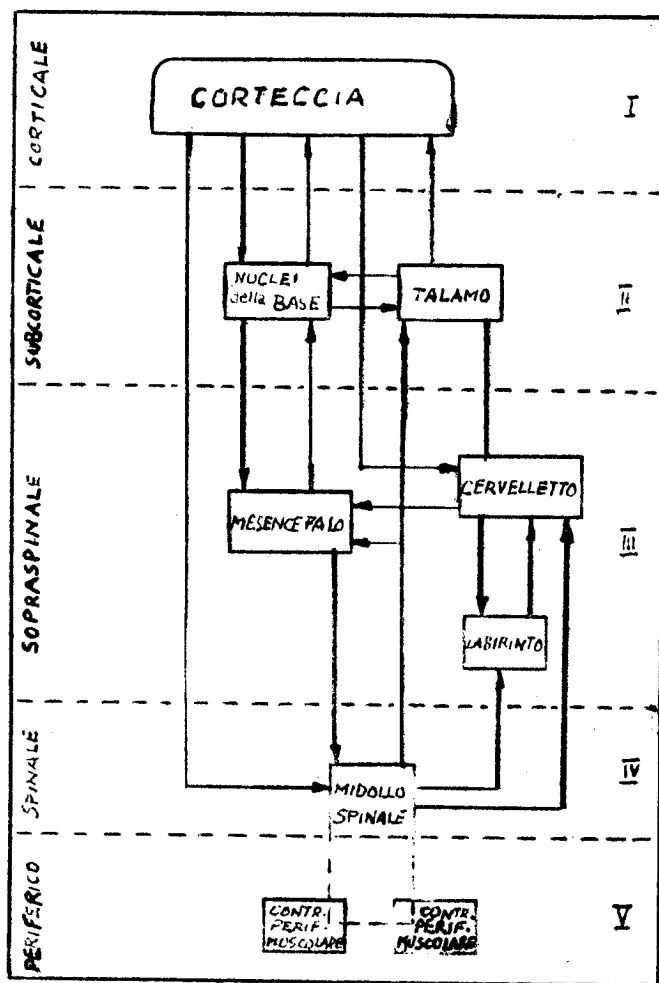


Fig. 1 - Schema semplificato dell'organizzazione dei centri di controllo motorio (secondo Gawronski).

I segnali afferenti dei sensori cinestetici (proprio — e esterorecettori), che nell'esecuzione del movimento sono inviati anche ai centri superiori « informandoli » sul relativo stato momentaneo dei muscoli, tendini e articolazioni hanno un importante ruolo nella formazione e realizzazione dei processi motori. Anche la formazione di programmi motori fissi (stereotipi) tramite l'apprendimento motorio, un processo che è di primaria importanza nell'allenamento delle tecniche sportive, non è possibile senza l'immagazzinamento (memorizzazione) di questi segnali « refferenti » nel programma di regolazione e controllo dei relativi processi motori ampiamente automatizzati. Senza questo processo di memorizzazione l'esecuzione motoria diventerebbe un problema quasi irrisolvibile. La Fig. 2 mostra schematicamente questo principio di re-

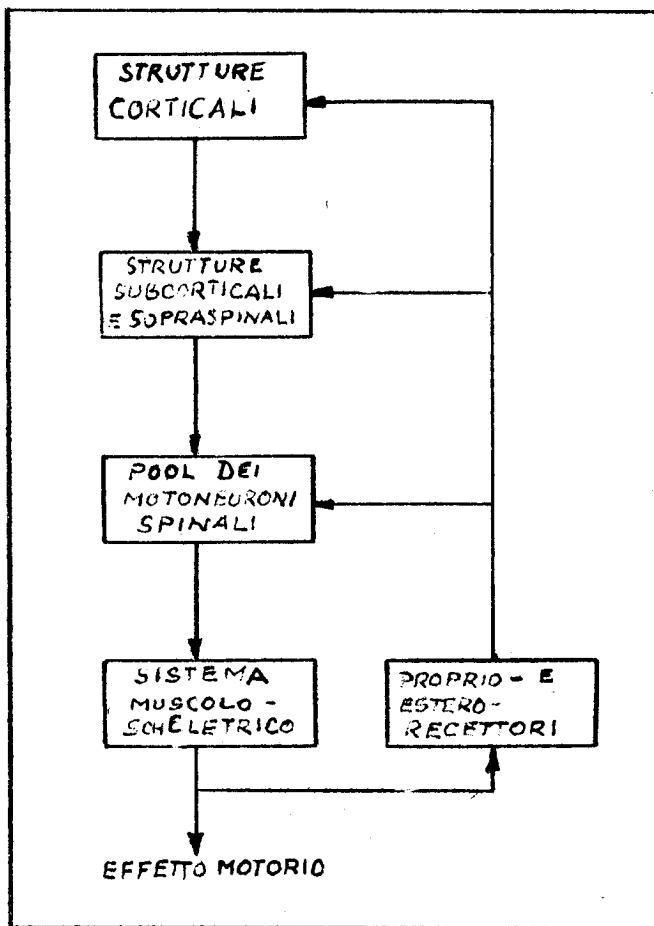


Fig. 2 - Il principio della retroazione (Feedback) del segnale proprio e esterorecettivo nel controllo del movimento.

troazione dei segnali cinestetici che equivale, dal punto di vista cibernetico al feedback dei circuiti di controllo.

La trasmissione dei segnali lungo le fibre nervose è caratterizzata dalla modulazione di frequenza dei « potenziali di azione nervosi ». Ciò vale tanto per i segnali efferenti quanto per quelli afferenti e reafferenti. I segnali (potenziali di azione nervosi) hanno un'altezza e una forma di impulso quasi invariabili e l'informazione viene codificata, variando la loro frequenza (numero di impulsi per secondo).

Una elevata variazione della frequenza di impulsi corrisponde ad una elevata intensità dell'informazione.

La trasmissione dei potenziali di azione nervosi nelle linee nervose (assoni) non si può, senz'altro, considerare un fenomeno di trasmissione di un segnale elettrico passivo lungo un conduttore elettrico. Essa avviene in modo caratteristico, che qui non sarà spiegato dettagliatamente e con velocità che, secondo il tipo di assone (diametro etc.) può raggiungere valori assai elevati (fino a quasi i 100 m/s).

Ogni motoneurone del pool dei segmenti del midollo spinale, è collegato tramite propri assoni con un numero più o meno elevato di fibre muscolari a formare la cosiddetta unità motoria (U.M.).

Le U.M. si differenziano, in base a diverse caratteristiche, in unità lente (toniche) e unità veloci (fasiche) (1). La forza sviluppata dalla contrazione di un muscolo risulta dalla somma delle singole forze delle U.M. attive.

Per la contrazione di un muscolo i motoneuroni del pool e le fibre muscolari da essi innervati vengono reclutati in successione ben ordinata (2): i motoneuroni a seconda della loro soglia di eccitazione, i corrispondenti gruppi di fibre muscolari a seconda della forza e in ordine inverso rispetto al loro affaticamento. I motoneuroni con la più bassa soglia eccitatoria controllano perciò i gruppi di fibre più deboli ma meno affaticabili. Questo reciproco adattamento funzionale tra cellule nervose e fibre muscolari è dovuto al fatto che le fibre nervose influenzano il metabolismo delle fibre muscolari (3) così da permettere, che il « regolatore » e « l'elemento controllato » — centri di controllo motori e muscoli — siano adattati ottimalmente. Alcuni esperimenti hanno indicato che, scambiando fra loro i nervi delle unità motorie lente e veloci vengono modificate, mediante meccanismi di natura nervosa, il tipo di fibre muscolari ripristinando con ciò l'adattamento funzionale alterato dall'esperimento.

La capacità di adattamento del sistema di controllo dell'attività motoria alle condizioni esterne, fa parte di un programma di sopravvivenza con il quale la natura assicura in molteplici modi l'esistenza della specie. Adattamento del sistema di controllo motorio a modificare condizioni di funzionamento significa cambiamento dei relativi parametri dinamici (4).

Considerando il circuito di controllo periferico per l'attività motoria, ci troviamo all'incirca nel contesto della fig. 3.

La rappresentazione semplificata della regolazione e del controllo di unità motoria singola vale qui per tutte le unità motorie di un muscolo.

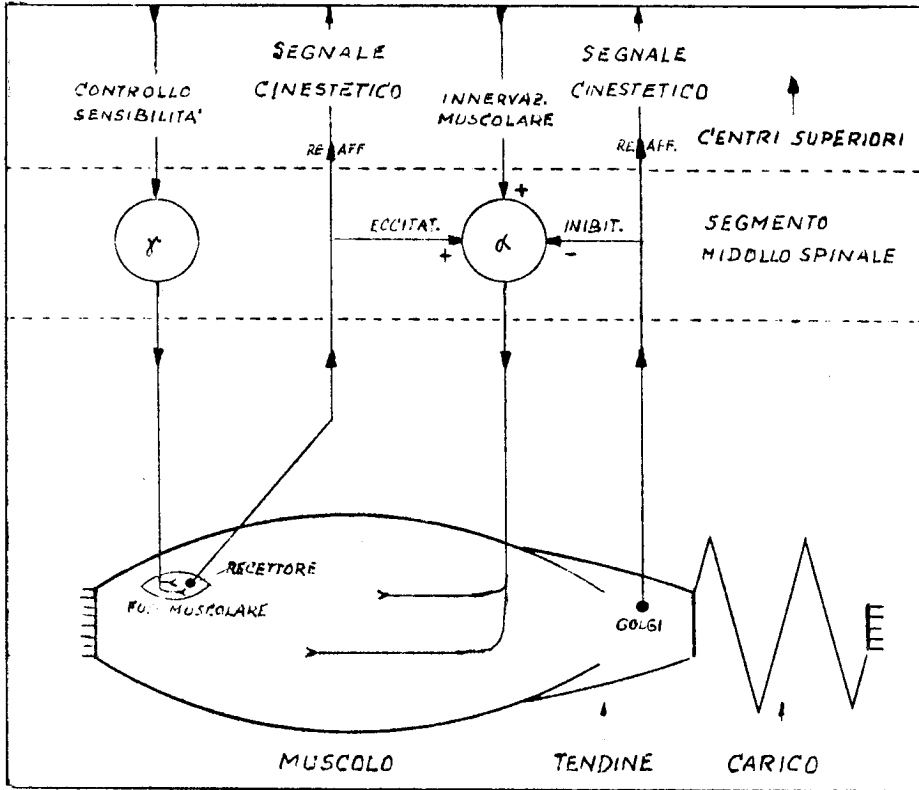


Fig. 3 - Rappresentazione semplificata del sistema di controllo periferico.

Il controllo dell'eccitazione delle fibre muscolari di una unità motoria avviene attraverso un motoneurone alfa (α). Il motoneurone gamma (γ) innerva tramite un proprio assone le fibre muscolari del fuso muscolare (fibre intrafusali). Queste fibre, che non partecipano al processo della contrazione del muscolo, servono alla regolazione della sensibilità del recettore (5). Il recettore rileva la lunghezza del muscolo, la quale deriva a sua volta dallo stato contrattile del muscolo stesso. La sensibilità del recettore dipende poi dallo stato contrattile delle fibre muscolari intrafusali. Tale sistema di controllo serve a mantenere costante mediante un collegamento retroattivo (feedback) su di un'entrata eccitatoria del motoneurone alfa la lunghezza del muscolo (tono contrattile). Un allungamento del muscolo attiva i fusi neuromuscolari che eccitando i motoneuroni, provocano una contrazione del muscolo (n.d.) (6). La forza sviluppata dal muscolo contratto è anche rilevata dagli organi tendinei (Golgi) e rimandata, sotto forma di corrispondenti segnali retroattivi (feedback negativo) su una entrata inibitoria al motoneurone alfa. Anche ciò corrisponde senza dubbio, ad una funzione biologica protettiva: la limitazione dello sviluppo di tensione del muscolo. I segnali dei recettori fusali e del Golgi vengono

contemporaneamente retroinviati, come informazione cinestetica sullo stato muscolotendineo, nei centri superiori.

La forza di contrazione del muscolo dipende dal numero delle U.M. eccitate e dalla frequenza con cui le fibre muscolari delle singole U.M. si contraggono.

Considerando una singola fibra muscolare, stimolandola ad una frequenza di circa 50 Imp/sec., viene raggiunto il tetano completo. Un ulteriore aumento della frequenza porta solamente ad un esiguo aumento della tensione muscolare, il cui massimo valore è raggiunto fra gli 80-100 Imp/sec. circa.

Un'efficace contrazione di un muscolo e un adeguato sviluppo di forza non sono però il risultato della semplice addizione delle singole forze delle unità motorie attive bensì anche del loro concorrere, temporalmente e spazialmente, ben organizzato.

A tal scopo, tutti i neuroni di un pool di motoneuroni sono collegati tra di loro in un reticolo di neuroni commutatori (cellule di Renshaw), in adeguate combinazioni di entrate eccitatorie ed inibitorie.

Le unità motorie interessate non vengono, evidentemente, innervate con precisa sincronia, ma con controllato asincronismo tramite diverse durate di propagazione dei segnali e diverse soglie eccitatorie nel reticolo dei neuroni commutatori. Da ciò risulta, ad esempio, che nel caso di tetano incompleto non registriamo alcuna successione di singoli spasmi bensì uno stato di più o meno intensa ma continua, tensione del muscolo.

Ogni azione motoria risulta dal concorrere sincronizzato di muscoli agonisti ed antagonisti. A tale riguardo dobbiamo tener presente che non solo la contrazione del muscolo agonista ma anche il contemporaneo rilassamento del suo antagonista sono il risultato di un *attivo processo di controllo* nervoso. In ciò, il reticolo di neuroni commutatori gioca un ruolo decisivo (7). L'eccitazione di un muscolo porta attraverso il reticolo di neuroni commutatori, alla inibizione del suo antagonista e viceversa. Questo tipo di organizzazione funzionale viene spesso sfruttato nella terapia riabilitatoria stimolando in modo appropriato, le entrate inibitorie e non quelle eccitatorie (8).

Informazioni più dettagliate sulla cibernetica dei circuiti di controllo tecnici ed organici sono accessibili dai relativi articoli di H. Beulke (« Atletica leggera », n. 210, 1977) e H.F. Rittel (Leistungssport 6/76).

B - L'elettrostimolazione nello sport.

Sebbene già Volta e Galvani nel 1800 avessero dimostrato sperimentalmente la stimolabilità dei muscoli, il suo razionale utilizzo ha raggiunto una notevole importanza solo con il rapido sviluppo che si è avuto, negli ultimi decenni dei moderni metodi di riabilitazione. In tale campo, infatti, ha un ruolo importante nella terapia riabilitativa in soggetti affetti da deficit motori di varia origine.

Oggi hanno raggiunto un elevato grado di sviluppo le tecniche di stimolazione cardiaca (Pacemaker), il controllo delle protesi tramite segnali mioelettrici la rigenerazione o la sostituzione del controllo di

funzioni muscolari tramite la « stimolazione elettrica funzionale (FES) degli segmenti monconi, l'elettrostimolazione per fronteggiare l'ipocinesi dovuta a postumi traumatici, a lunghe convalescenze, negli astronauti ecc. Come mezzo di allenamento l'elettrostimolazione è un prodotto collaterale di tali tecniche terapeutiche.

Nel 1971 Adrianowa, Koc, Martjanow e Chvilon pubblicarono, a Mosca, un articolo, che anche oggi in molti casi è utilizzato come base per l'applicazione degli elettrostimoli nell'allenamento sportivo (10). I metodi ivi presentati offrono l'indubbio vantaggio, di provocare in un tempo molto breve un notevole accrescimento della massa muscolare e, di conseguenza, della forza dei muscoli sollecitati (Fig. 4).

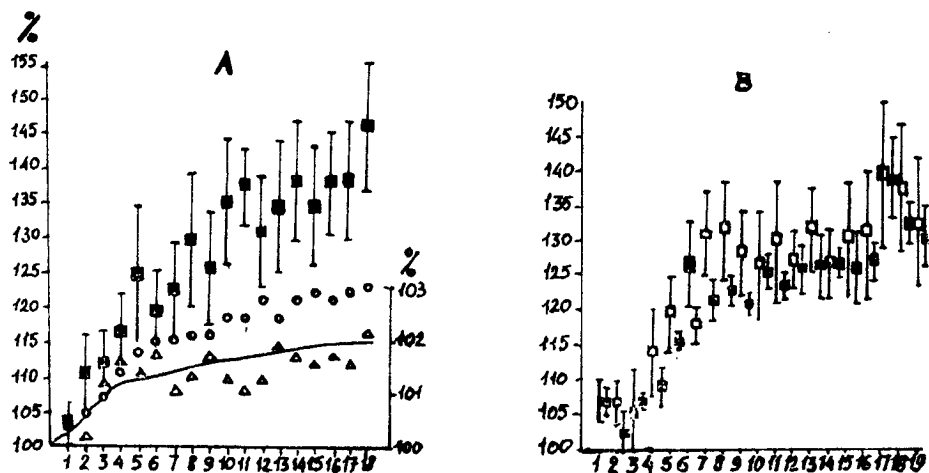


Fig. 4 - Dinamica degli effetti della stimolazione elettrica dei muscoli estensori (a) e lessori (b) del piede (i quadrati neri rappresentano la crescita degli indici della forza spontanea massima, nell'eccitazione diretta dei muscoli; quelli chiari, nell'eccitazione indiretta; i cerchi, la crescita del perimetro della gamba all'altezza dei muscoli sollecitati; i triangolini, la crescita degli indici della capacità di salto). (Secondo Adrianowa, Koc, Mart' Janov, Chvilon).

Per la stimolazione viene adoperato un segnale (impulsi elettrici con una frequenza fra i 1000 e 5000 Hertz) modulato ad una frequenza di 50 Hertz, (Fig. 5), che è prodotto da un appropriato generatore di stimoli con un'uscita variabile in frequenza e ampiezza.

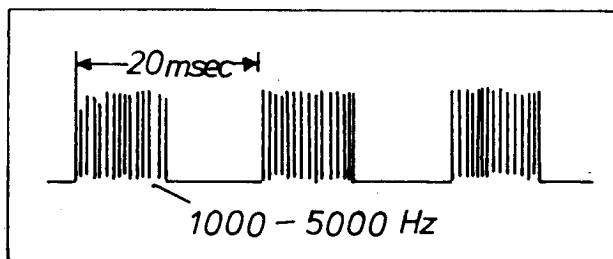


Fig. 5 - Impulsi di stimolazione.

Lo stimolo viene applicato mediante elettrodi — placche metalliche di alcuni cmq. —, sulla superficie cutanea, sopra il muscolo da stimolare (metodo diretto). Le superfici degli elettrodi, a tal fine, sono ricoperte con una pasta conduttrice appropriata per ottenere un migliore contatto elettrico. Nella stimolazione indiretta l'elettrodo viene posto sulla cute al di sopra del nervo motore (v. Fig. 7).

L'intensità dello stimolo è stabilita, di volta in volta, in base al limite di sopportabilità individuale dell'atleta. Una frequenza di impulsi di 50 Hertz porta, come del resto anche nel controllo nervoso volontario, al tetano completo del muscolo. L'aumento dell'ampiezza degli impulsi ha, come conseguenza, una più profonda penetrazione del flusso di corrente, ma contemporaneamente un aumento della corrente elettrica negli strati superiori dei tessuti epidermici e muscolari che dà luogo a sensazioni dolorifiche sempre maggiori, in parte dovute alla contrazione del muscolo.

Nell'elettrostimolazione, soprattutto secondo il cosiddetto « metodo diretto », sono stimulate, essenzialmente, le fibre esterne mentre per gran parte delle fibre interne, non viene raggiunta la soglia di stimolazione: queste non partecipano perciò alla contrazione del muscolo. Gli autori hanno rilevato, infatti, uno sviluppo medio di forza dei muscoli stimolati pari al 50% della forza sviluppata dai muscoli contratti volontariamente. Per contro c'è però, una rigidità muscolare che è del 10% circa più elevata rispetto a quella rilevabile nel caso di una contrazione volontaria massimale. E' evidente che le fibre muscolari esterne, nella elettrostimolazione, raggiungono valori di contrazione che stanno al di là dei limiti normalmente determinati dai meccanismi di protezione organici.

C - Aspetti problematici dell'« allenamento stimolatorio ».

L'elettrostimolazione, come mezzo di allenamento, non è affatto priva di problemi, ma manca purtroppo, nella letteratura specifica, una corretta considerazione dei problemi connessi con la sua utilizzazione. Una eccezione viene fatta nell'articolo di Commandre in « *Mèdecine du Sport* » dello scorso anno (24). Ivi sono trattati, essenzialmente dal

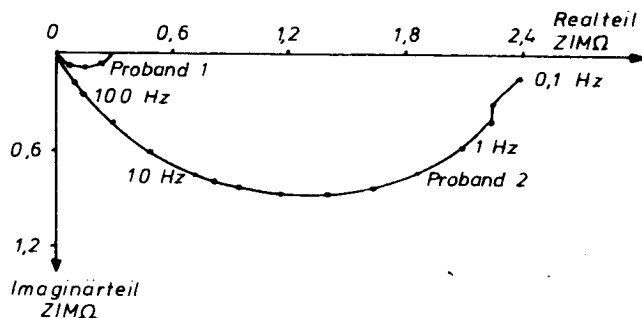


Fig. 6 - Impedenza cutanea nella parte dorsale dell'avambraccio in due diversi soggetti (secondo Silny, Rau).

punto di vista medico-fisiologico, oltre ad alcuni interessanti aspetti relativi all'abilità ed alle modalità applicative dell'elettrostimolazione anche i suoi potenziali pericoli.

Il presente articolo ha principalmente l'intento di valutare gli effetti dell'elettrostimolazione ed i problemi ad essi connessi dal punto di vista cibernetico.

Esso si basa prevalentemente su pubblicazioni, atti congressuali, rapporti di ricerche e discussioni nell'ambito della tecnica biomedica della riabilitazione e della biocibernetica. Da questi settori scientifici possiamo attenderci senz'altro le più competenti indicazioni sull'utilità dell'elettrostimolazione.

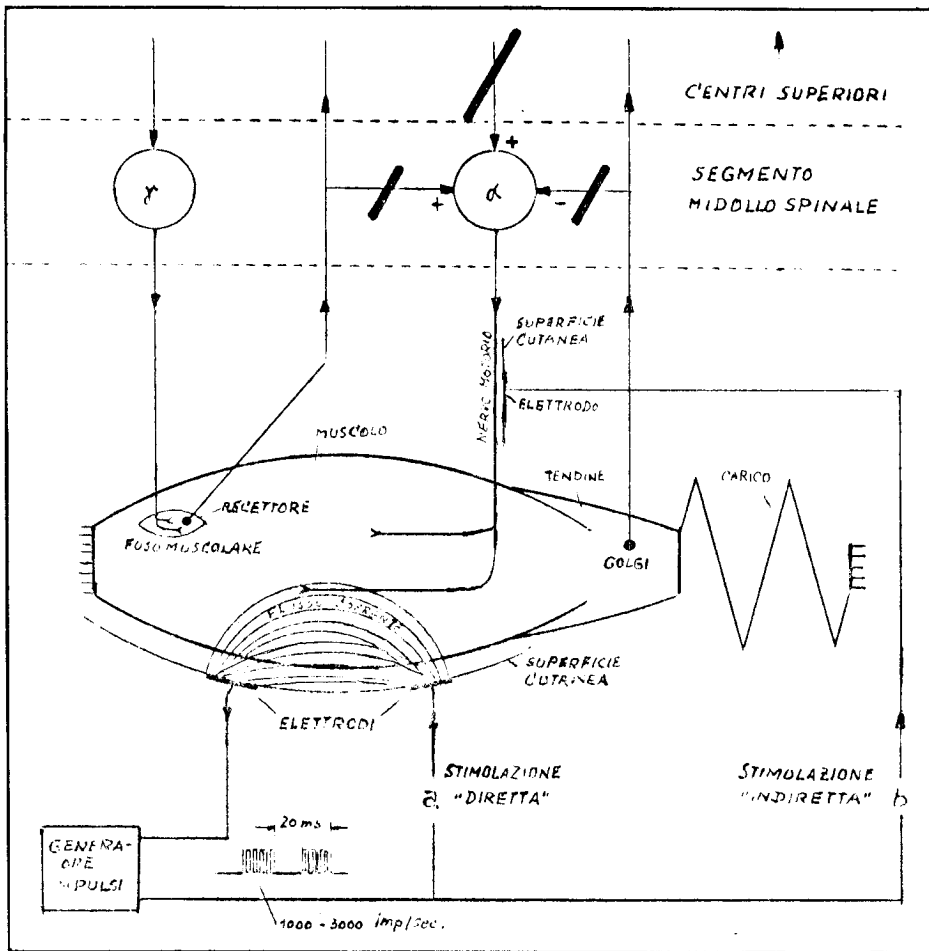


Fig. 7 - Schema per l'elettrostimolazione. L'effetto-controllo tramite i conduttori neuro-fisiologici è eliminato (le linee sono state sbarrate diagonalmente) in entrambi i metodi (a e b) di elettrostimolazione.

1) *La distribuzione del campo di corrente stimolante e la riproducibilità delle condizioni di stimolazione.*

Ogni contrazione provocata esternamente da impulsi di corrente elettrica deve essere, per principio, condotta con la minima corrente indispensabile ad ottenere un determinato valore di contrazione muscolare. Ciò richiede innanzitutto una precisa determinazione della posizione ottimale degli elettrodi. A tal fine devono, in primo luogo, essere trovati i « punti motori » del muscolo da stimolare (11).

Già un minimo spostamento degli elettrodi, rispetto alla posizione ottimale richiede un notevole aumento della corrente per raggiungere la medesima forza di contrazione. Con ciò aumentano, contemporaneamente, nei tessuti attraversati dalla corrente, gli effetti indesiderati, per lo più di tipo dolorifico (12). Il flusso di corrente da elettrodo a elettrodo, deve superare, oltre all'impedenza del muscolo e degli altri tessuti, due volte l'impedenza della cute (fig. 7). L'impedenza cutanea varia però non solo da uomo a uomo, ma anche con la temperatura ambientale, la posizione degli elettrodi, lo stato psichico e di salute del soggetto ecc. Essa può, inoltre, essere facilmente alterata da agenti meccanici e chimici (13) (14).

Entro certi limiti, un adeguato generatore di stimoli può fornire una corrente indipendente dalle variazioni dell'impedenza cutanea, ma l'aumento dell'impedenza porta pur sempre ad un forte aumento del gradiente della tensione là dove l'impedenza è aumentata: ciò spesso avviene nelle posizioni di passaggio (cioè vicino agli elettrodi), dove, essendo la densità di corrente già assai elevata, vi può essere un notevole sviluppo di calore nelle posizioni, in cui la densità di corrente è già assai elevata. Ci sono degli strati con minima (tessuto adiposo) e massima conduttività elettrica (tessuti ben vascolarizzati, liquidi corporei), in cui gran parte dell'energia conferita si trasforma in calore.

Dalla inomogeneità della resistività dei tessuti ne consegue una distribuzione di campo elettrico molto deformata e difficilmente valutabile. Spesso vengono provocate, così, sensazioni dolorifiche intense prima che sia raggiunto lo scopo voluto, cioè la contrazione massimale del muscolo (15). Le condizioni effettive di stimolazione, perciò, non si lasciano praticamente determinare come grandezze fisse. Le tecniche di stimolazione non danno perciò risultati riproducibili, e questo risulta tanto più vero nei casi di applicazione pratica della elettrostimolazione nell'ambito sportivo. Ci si deve limitare, qui, per evidenti ragioni, ad un posizionamento il più possibile preciso degli elettrodi e all'utilizzazione di corrente di intensità costante, come unico criterio oggettivo di stimolazione.

Né il test di sopportazione dolorifica per la determinazione dell'intensità di stimolazione prima di ogni allenamento, né una corrente di intensità prestabilita e tenuta costante per una serie di unità di allenamento, garantiscono in alcuna maniera condizioni costanti e riproducibili di stimolazione.

Si deve partire quindi, dal fatto che, ogni allenamento stimolatorio avviene sotto diverse condizioni di variabilità difficilmente valutabile. Ciò è un grave handicap per un metodo che vuole essere consi-

derato seriamente. Nella scienza e nella tecnica, infatti, vengono considerati validi soltanto metodi che sono sperimentalmente riproducibili.

2) *Effetti collaterali dell'elettrostimolazione sull'organizzazione neurofisiologica del controllo motorio.*

L'elettrostimolazione di muscoli o gruppi muscolari equivale sempre ad un intervento esterno su di un sistema organico di regolazione e controllo molto complesso e delicato.

Questo sistema è adattabile e le sue caratteristiche corrispondono, nell'uomo sano, alle esigenze motorie dettate dall'ambiente. Tramite l'allenamento finalizzato (adattamento finalizzato) possono essere « modellate » funzioni motorie specifiche, fino ai limiti funzionali del sistema. Ciò è tipico nello sport di alto livello. L'uso dell'elettrostimolazione in uno sportivo di elevato livello, significa quindi, un intervento nel funzionamento di un sistema organico di regolazione e controllo estremamente sviluppato. Inoltre sono oggetto della stimolazione quasi sempre quei muscoli o gruppi muscolari che, nei processi motori specifici delle diverse discipline sportive, hanno funzioni determinanti per la prestazione.

Come già citato nel capitolo A, i segnali afferenti dei propriorecettori hanno un importante ruolo per la formazione di programmi motori nei centri superiori. Essi vengono memorizzati, nel decorso di un processo di apprendimento motorio, e sono, perciò, decisamente compartecipi all'organizzazione del processo motorio. Non c'è dubbio che si possa modificare l'organizzazione di un processo motorio tramite una modificazione artificialmente imposta dei segnali cinestetici.

Ai livelli inferiori di coordinazione motoria, i propriorecettori adempiono contemporaneamente e rapidamente (riflessi) a compiti di controllo e protezione (vedi fig. 3). Controllando, però, un muscolo con un segnale elettrico che conduce alla sua parziale o totale contrazione, *si rendono inefficaci le funzioni di controllo e di protezione dei suoi propriorecettori*. La retroazione, provocata dai segnali dei corpuscoli del Golgi sui motoneuroni alfa per la limitazione della tensione muscolare, come del resto anche la retroazione provocata dai segnali cinestetici agenti sui centri superiori, avente per scopo il rilassamento del muscolo (e una diminuzione della sensazione dolorifica), viene eliminata e resa inefficiente dai segnali stimolatori (Fig. 7). Come già detto, durante l'elettrostimolazione i segnali afferenti sono completamente non correlati da quelli efferenti.

Ciò può portare ad un mutamento nell'organizzazione motoria neurofisiologica del muscolo stimolato (8). Questo effetto si utilizza nella terapia riabilitatoria per la riorganizzazione strutturale del controllo motorio di muscoli spastici o nei casi di deficit motorio dovuti a danni nei centri superiori (17) (18) (20). I rispettivi muscoli e gruppi muscolari vengono stimolati in modo appropriato — spesso sulle linee nervose afferenti (8) e inibitorie (nei muscoli spastici) (21) — per « provocare un processo di informazione nei centri superiori » (Vodovnik) (19) (22) (23) (26).

Quando l'elettrostimolazione è adoperata per compensare la ipocinesi essa serve a portare e mantenere l'efficienza di un muscolo a livelli normali. In questi casi, i possibili effetti negativi sulla organizzazione motoria neurofisiologica hanno un'importanza secondaria. Nell'allenamento stimolatorio sportivo, tuttavia, tali effetti non possono essere trascurati. Nel sistema funzionale altamente sviluppato di un atleta non si può valutare separatamente le capacità coordinative (condizionate dal sistema di controllo neuromotorio) e le capacità condizionali (nel caso dell'allenamento stimolatorio condizionate principalmente dalla forza): esse rappresentano un'unità. *La prestazione massima di un atleta è, in primo luogo, il frutto di una completa armonia di entrambe le componenti di questa unità.*

L'allenamento stimolatorio non può certamente giovare a questa desiderata armonia. Il dedurre un miglioramento funzionale, in base ad un corrispondente miglioramento del test di Abalakow (10) in tutti i soggetti, non è accettabile dal punto di vista cibernetico. Nell'atleta di elevato valore con capacità condizionali e coordinative molto sviluppate il decorso di entrambi i più essenziali effetti dell'elettrostimolazione — l'aumento della forza di contrazione e la modificazione delle capacità coordinative — non è sufficientemente chiarito. Dati riguardanti un raggiunto incremento di forza, correlati dalla non impegnativa constatazione: « non si sono riscontrate alcune sostanziali conseguenze negative sulle capacità coordinative », non possono soddisfare la giusta pretesa dell'allenatore di una informazione corretta e completa negli effetti dell'elettrostimolazione. Il rilevamento dei processi informativi che possano portare nei centri superiori, a un mutamento nell'organizzazione dei processi motori, non è certamente semplice. Essa, tuttavia, non è neanche impossibile, purché, come dimostra la proposta di Bracale e Serra (21) tale complesso processo venga adeguatamente semplificato (Fig. 8).

L'elettrostimolazione — oltre all'effetto descritto sull'organizzazione motoria nei centri superiori — può condurre a gravi disturbi fun-

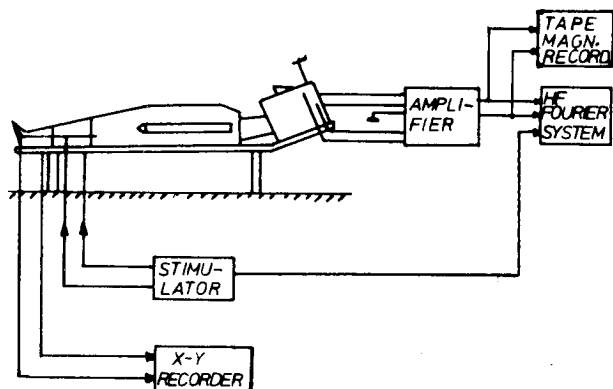


Fig. 8 - Metodo per il rilevamento dei processi informativi nelle strutture corticali e subcorticali durante l'elettrostimolazione. I segnali vengono derivati esternamente tramite elettrodi applicati sopra la calotta cranica (secondo Bracale e Serra).

zionali nei sistemi di controllo che agiscono a livelli inferiori. Comandare (24) parla di un « circolo vizioso propriocettivo », che, in un caso studiato da Viani e coll. (25) ha condotto un giocatore francese di rugby, ad una spasticità quasi permanente dei muscoli del polpaccio stimolato. Nella medesima ricerca venne riscontrato, come conseguenza all'elettrostimolazione, un trauma venoso di natura trombotica e una iperlattacidemia.

Nella terapia riabilitativa si tenta, tramite appropriate tecniche di stimolazione, di tenere in considerazione il più possibile l'alternata compartecipazione delle coppie muscolari antagoniste (22). La Fig. 9 ne mostra un esempio schematico.

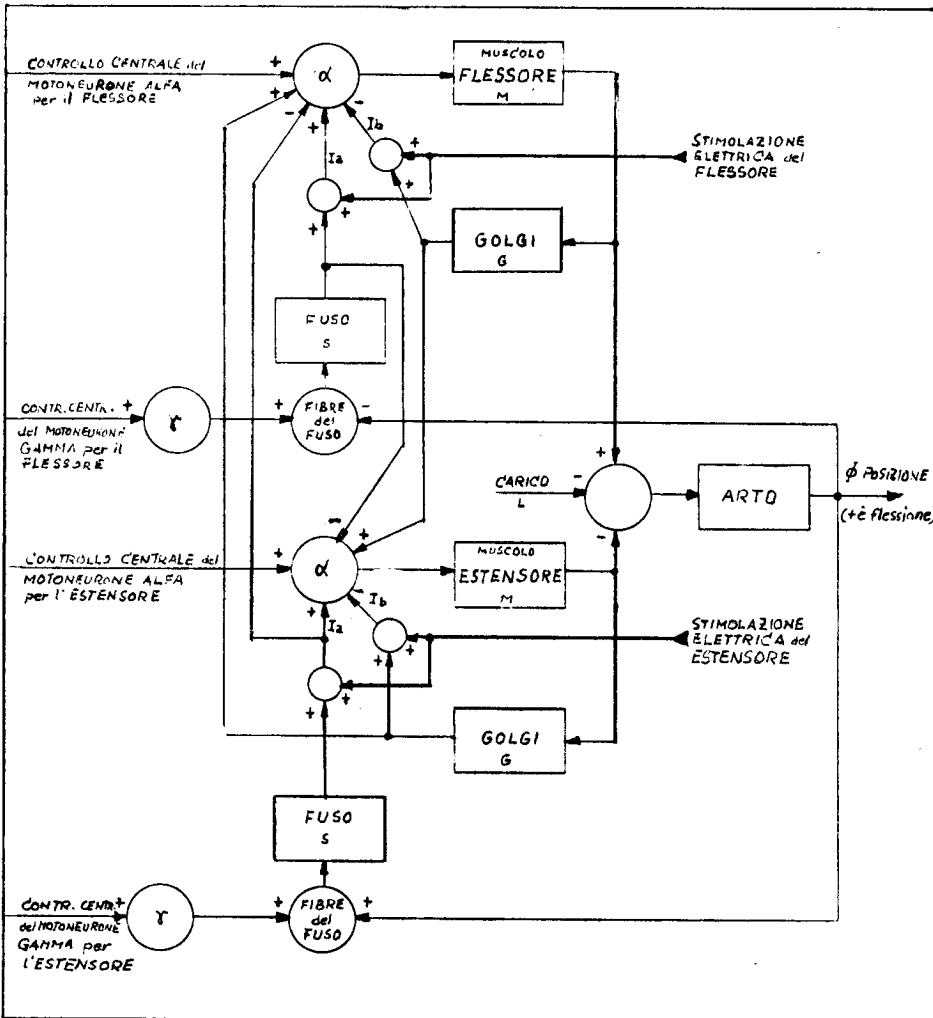


Fig. 9 - Stimolazione elettrica di una coppia di muscoli antagonisti (secondo Vodovnik, Van der Meulen).

Biomeccanicamente possiamo considerare una coppia muscolare antagonista come un generatore reciproco di forze, che, nel movimento volontario, è controllato ottimalmente nello spazio e nel tempo tramite impulsi nervosi.

Ciò porta ad un'azione muscolare equilibrata ed armonica. L'allenamento stimolatorio, nella « tradizionale » metodica, può provocare invece una azione muscolare squilibrata. Si hanno così oltre ai già citati problemi, buone chances di disturbare anche l'armonia biomeccanica delle funzioni delle coppie muscolari antagoniste.

3) *Problemi di affaticamento.*

L'affaticamento del muscolo ha, nelle azioni motorie volontarie, due principali componenti — una incosciente l'altra cosciente — che adempiono, in parte parallelamente e in parte in tempi diversi, a una importante funzione protettiva organica. Durante contrazioni sufficientemente intense la circolazione sanguigna nel muscolo viene, parzialmente o completamente, interrotta. Il metabolismo energetico del muscolo può diventare anaerobico e l'accresciuta concentrazione di ioni di idrogeno provoca sensazioni dolorifiche (27). In questo modo il segnale d'allarme incosciente (determinato essenzialmente dal metabolismo) viene rafforzato con un segnale d'allarme cosciente (conseguente al dolore).

Durante l'elettrostimolazione la contrazione delle fibre muscolari esterne raggiunge valori sovramassimali e le sensazioni dolorifiche sono più intense che nella contrazione volontaria. L'organismo, però, è « indifeso »: l'allarme metabolico è in parte eliminato dal segnale stimolatorio che d'altra parte rende completamente inefficace qualunque altro « segnale d'allarme ». Sembra quasi un cattivo scherzo che il limite di sopportazione dolorifica dell'atleta venga accertato *prima* dell'inizio dell'allenamento stimolatorio.

L'affaticamento muscolare, durante la contrazione volontaria, può essere dedotto da alcune modificazioni dei segnali mioelettrici.

L'affaticamento ha come conseguenza un accresciuto reclutamento del numero di unità motorie fino all'esaurimento di tutte le riserve. Soltanto allora compare una progressiva diminuzione dello sviluppo di forza. Secondo un'altra teoria (24) avviene un « reclutamento circolatorio » delle unità motorie (rotazione delle unità motorie) in cui, al reclutamento di alcune U.M. si accompagna il rilassamento di quelle precedentemente attive e già affaticate. Ciò porta a un affaticamento più uniforme di tutte le unità motorie interessate alla contrazione.

Nella usuale elettrostimolazione non vi è questo fenomeno, poiché le unità motorie innervate dalla corrente stimolante rimangono costantemente contratte. L'affaticamento, in questo caso, non può essere dedotto da variazioni dei segnali mioelettrici: poiché manca il normale controllo nervoso sulla contrazione del muscolo. L'affaticamento del muscolo stimolato, in questi casi, può essere rilevato solo tramite il decorso temporale della tensione muscolare (Fig. 10)

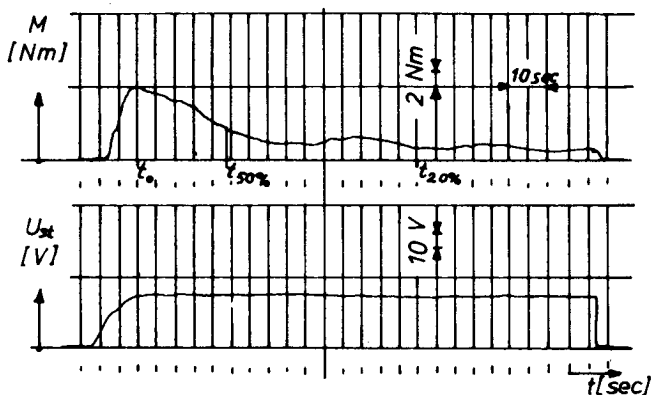


Fig. 10 - L'affaticamento muscolare come effetto dell'elettrostimolazione (secondo Krajl, Trnkoczy e Vodovnik).

U_{st} = Voltaggio di stimolazione.

M = Forza sviluppata dal muscolo.

Oltre al puro affaticamento muscolare, con molta probabilità si può supporre anche un affaticamento dai centri di controllo neurofisiologici, a causa dell'insolita elevata frequenza degli stimoli propriocettori (30). Affermazioni quantitative su ciò, tuttavia, sarebbero, allo stato attuale delle conoscenze, puramente speculative.

D - Conclusioni.

Poiché maggior parte delle pubblicazioni hanno confermato, sebbene in termini unilaterali, l'utilità dell'elettrostimolazione come mezzo di allenamento, si è logicamente diffusa l'opinione, che l'allenamento stimolatorio sia una questione semplice e largamente priva di rischi. Questo è per molti aspetti sbagliato, come si può facilmente dedurre da quanto sopra esposto. Risultano infatti, specialmente in riferimento alle « tradizionali » metodiche stimolatorie (10), che esistono alcuni seri problemi, che non si possono facilmente ignorare. Commandre e coll. (24) se ne sono certamente resi conto nell'elaborazione del loro metodo di stimolazione. Ciò viene evidenziato tra l'altro dal principio base da loro utilizzato di far lavorare il muscolo durante l'elettrostimolazione contro una resistenza esterna. Ciò porta ad un'azione muscolare mista isotonica-isometrica con carattere in parte dinamico che porta a modificare considerevolmente, le condizioni di affaticamento. Problematica ci sembra invece, la durata di stimolazione (fino a 2 x 45 minuti giornalmente) a causa dell'inevitabile effetto sull'organizzazione dei centri di controllo motori.

L'allenatore, che si serve dell'elettrostimolazione, deve rendersi conto della problematica molto complessa di questo metodo. Ciò presuppone una adeguata base informativa per una giusta valutazione dei rischi e dei limiti dell'allenamento stimolatorio.

Questo articolo non ha lo scopo di condannare l'elettrostimolazione a priori. Tuttavia, l'elettrostimolazione, se considerata in una più ampia prospettiva, non è applicabile in modo standardizzato e con la « leggerezza » spesso riscontrabile nello sport. Se tale tecnica, considerando l'attuale insufficiente grado di conoscenze sui suoi effetti, sia razionalmente applicabile come metodo di allenamento nello sport, specialmente ad alto livello, può anche essere messo ragionevolmente in dubbio.

Annotazioni: al Prof. Tanzi dell'università di Pavia e all'ing. W. Becker del C.C.R. delle Comunità Europee vanno i migliori ringraziamenti per il loro qualificato aiuto nella discussione e documentazione per la stesura del presente lavoro.

GLOSSARIO

Afferenza: designazione generale per le eccitazioni decorrenti da uno o più recettori, (organi di senso) fino al sistema nervoso centrale (1).

Potenziale d'azione (delle fibre nervose): stimolando una fibra nervosa (tramite l'eccitazione di un organo sensorio attraverso l'eccitamento di altre cellule nervose in contatto sinaptico con tale fibra o — sperimentalmente — tramite una corrente elettrica, si può registrare, dopo un tempo di latenza, una breve fluttuazione della tensione. Questa viene chiamata, appunto, potenziale d'azione (o anche: impulso nervoso, eccitamento nervoso, onda eccitatoria, spike, potenziale di punta, scarica). Nella derivazione intracellulare, l'ampiezza del potenziale d'azione è compreso fra i 60-150 mV. Poiché il potenziale di membrana a riposo è compreso normalmente fra i 30-80 mV. (interno negativo), durante il potenziale d'azione, il potenziale di membrana non solo si azzerava ma si inverte (overshoot, l'interno diventa transitoriamente positivo). Nella derivazione extracellulare, l'ampiezza e la forma del potenziale d'azione vengono determinate dalle condizioni di derivazione; la variazione di tensione tipica è negativa (1).

Assone: sinonimo di neurite, è il prolungamento di un acellula nervosa, che propaga l'eccitamento secondo la legge del tutto o nulla (1).

Efferenza: designazione generale per le eccitazioni decorrenti dal SNC alla periferia (1).

Unità motoria: le fibre nervose motorie dei vertebrati si ramificano così che un motoneurone innerva più di una fibra muscolare. Durante la scarica di un singolo motoneurone, si contraggono, perciò contemporaneamente, un numero più o meno grande di fibre muscolari.

Il motoneurone e tutte le fibre muscolari da esso innervate, costituiscono la cosiddetta « unità motoria » (1).

Modulazione di frequenza: la trasmissione di informazioni tramite impulsi o oscillazioni, la cui frequenza è funzione del segnale che deve essere trasmesso, mentre l'ampiezza rimane costante. La denominazione derivata dalla tecnica delle telecomunicazioni, è applicata talvolta anche nella trasmissione di informazione tramite le fibre nervose; in questo caso l'ampiezza dei potenziali d'azione rimane costante, mentre la loro successione temporale varia. Tuttavia, la codificazione degli stimoli può avvenire anche con modalità diverse da quella precedentemente descritta.

Motoneurone: una cellula nervosa i cui prolungamenti innervano un muscolo: tali cellule sono situate nelle corna anteriori del midollo spinale e nei nuclei motori dei nervi cranici. Nei vertebrati, i motoneuroni sono i punti d'arrivo di tutti i riflessi muscolari importanti (1).

Fibre muscolari intrafusali: le fibre muscolari poste all'interno dei fusi muscolari dei vertebrati (1).

Fuso muscolare: un recettore meccanico che si riscontra nel muscolo scheletrico dei vertebrati. Il singolo muscolo contiene da alcuni a numerosi fusi muscolari. Lo stimolo appropriato è l'allungamento del muscolo stesso. I fusi muscolari sono costituiti da 5-7 fibre muscolari striate (fibre intrafusali o fasci di Weismann), che sono contenute in un involucro connettivale a forma di fuso. Queste fibre muscolari sono innervate dalle fibre motorie γ e da 2-4 fibre sensitive del gruppo $A\alpha$ a $A\beta$. Le fibre sensitive formano, circa nel mezzo del fuso, delle ramificazioni finali a fiorami od anulo-spirali, che aderiscono alle fibre muscolari intrafusali. I fusi sono in parallelo alle normali fibre muscolari scheletriche. Durante un allungamento del muscolo si rinforza nelle fibre efferenti la scarica costante, già precedente alla lunghezza di riposo del muscolo, tale frequenza cresce circa linearmente con l'allungamento delle fibre muscolari. Le fibre efferenti possono far contrarre le fibre intrafusali modulando così le risposte del fuso agli allungamenti. I fusi muscolari controllano il riflesso monosinaptico di stiramento come pure altri riflessi polisinpatici (1).

Controllo muscolare o controllo nervoso del muscolo. L'attività del muscolo, nei vertebrati; viene controllata tramite una serie di riflessi ed afferenze dal S.N.C.. Vi appartengono 1) Riflessi propriocettivi monosinaptici e disinaptici, che partono dagli organi sensori posti nel muscolo stesso. Il riflesso monosinaptico controllato dai fusi muscolari è un circuito per il mantenimento della lunghezza muscolare in diverse condizioni di carico. Il riflesso disinaptico, controllato dai corpuscoli del Goigi è, fra l'altro, un riflesso di proiezione in presenza di carichi troppo grandi.

2) Riflessi muscolari di - e polisinpatici partono da fusi tendinei e muscolari situati in altri muscoli. Contemporaneamente alla messa in funzione del riflesso propriocettivo dell'agonista tramite l'azione di - o polisinpatici dei fusi muscolari, vengono attivati muscoli sinergici ed inibiti gli antagonisti, contemporaneamente vengono anche controllati i corrispondenti muscoli della metà controlaterale del corpo.

3) Riflessi esterocettivi. L'attività muscolare è controllata tramite altri organi sensori, principalmente recettori cutanei. Per esempio, l'eccitamento dei recettori cutanei della parte cutanea sovrastante un muscolo può portare alla contrazione del muscolo stesso ed alla inibizione di altri muscoli. I controlli (riflessi) finora descritti sono mediati essenzialmente dal midollo spinale.

4) L'attività muscolare riflessa è controllata anche da una serie di meccanismi superiori. Vi appartengono i riflessi posturali e del portamento che partono dal labirinto, dagli occhi e dai propriocettori della zona cervicale e che concorrono a determinare il tono muscolare. Questi controlli sono interdipendenti con l'attività volontaria; essi sono organizzati essenzialmente dal cervelletto e dal mesencefalo.

5) La mobilità volontaria, nei mammiferi è controllata dalla corteccia cerebrale (corteccia motoria, vie piramidali ed extrapiramidali) (1).

Tono muscolare e suo controllo nervoso: con « tono muscolare », s'intende uno stato di tensione continua di un muscolo; tensione che può essere attivamente sostenuta e modificata, tramite un controllo nervoso. Al tono si possono sovrapporre fenomeni fasici più o meno rapidi (contrazione o rilassamento). Il tono è controllato da una serie di diversi meccanismi:

1) nel muscolo scheletrico degli animali a sangue caldo sono attivate in successione rotatoria (rotazione dell'attività), solamente un ben determinato numero delle unità motorie che danno luogo ad una tensione muscolare all'incirca costante. La forza muscolare può essere variata, variando il numero di U.M. attive e la loro frequenza di attivazione.

2) La fibra muscolare scheletrica dei vertebrati può essere portata ad uno stato di contrazione permanente; in questo caso, la successione temporale degli stimoli è talmente fitta (elevata frequenza) di stimolarne che i singoli spasmi si fondono in una contrazione continua (tetano) (1).

Propriocettori o propriorecettori:

1) In senso stretto: recettori meccanici sensibili alla lunghezza o alla tensione presente in muscoli, tendini ed articolazioni. Nei vertebrati vi appartengono principalmente i fusi muscolari, i corpuscoli del Golgi e i recettori articolari.

2) Talvolta vengono inclusi in tale classe anche i recettori delle sensazioni posturali statiche e dinamiche.

3) In senso più ampio (sinonimo di recettore interno): tutti i recettori che rispondono alle condizioni o alle loro variazioni all'interno del corpo (1).

Principio della refferenza: in generale è il principio funzionale del controllo nervoso, che si basa sull'arco riflesso chiuso, cioè nell'influenza reciproca tra recettore ed effetto (retroazione o feedback). Il principio di retroazione trasforma l'arco riflesso aperto in circuito funzio-

nale chiuso. L'attività di un effettore, è infatti retrosegnalata tramite recettori; in questo modo è garantito un continuo controllo di tutte le reazioni dell'organismo.

La refferenza, perciò, estraendo dalle sue particolari qualità neurofisiologiche, può essere considerata dal punto di vista cibernetico, come un collegamento retroattivo. Esso viene detto positivo, quando la prestazione originaria viene rafforzata e negativo, quando la prestazione originaria viene indebolita. Secondo questo presupposto, il principio di retroazione contribuisce a raggiungere un soddisfacente adattamento alla variabilità dell'ambiente esterno (2).

Reclutamento o recruitment. L'attività di determinate strutture nervose (la formazione reticolare) può influenzare l'attività in gruppo di neuroni, aumentando la frequenza di scarica di neuroni già attivati, l'attività di singoli neuroni cresce lentamente e parallelamente, attivando neuroni prima inattivi. Questo tipo di attivazione di unità nervose è denominato appunto reclutamento o recruitment.

Analogamente, nel muscolo scheletrico dei vertebrati, si parla di un reclutamento di unità motorie quando, per ottenere un crescente sviluppo di tensione, aumenta sia il numero di motoneuroni attivati sia la loro frequenza di scarica (2).

Valore soglia: il valore soglia di un neurone è quella quantità minima di energia stimolatrice, che deve agire per un determinato periodo di tempo sul neurone affinché esso giunga allo stato di eccitazione (cioè, venga generato un potenziale d'azione) (2).

Tetano o tono tetanico: una contrazione continua di un muscolo (o tensione muscolare) provocata dalla sommazione delle singole contrazioni susseguentesi rapidamente l'una all'altra (1).

Le definizioni sono ricavate da:

(1) D. Burkhardt: *Vocabolario di neurofisiologia*. Jena 1969.

(2) C. Klaus: *Vocabolario di cibernetica*. Francoforte 1969.

La loro presentazione in italiano è elaborata dal Prof. Tanzi, Pavia.

BIBLIOGRAFIA

- (1) BURKE R.E.: Central Nervous Control System of Fast and Slow Twitch Motor Units. Rapports du 4^e Congres International d'Electromyographie. Bruxelles, Sept. 1971.
- (2) LINN K.O., VOSSIUS G.: Der kybernetische Aspekt der Korrelation zwischen der Kontraktionszeit der Muskeln und dem Entladungsverhalten ihrer Motoneurone. Biomedizinische Technik, Band 22, Ergänzungsband. Schiele & Schön. Berlin, Okt. 1977.
- (3) LINN K.G., VOSSIUS G.: Der Einfluss der Muskelkontraktionszeit auf die Stabilität von Bewegungen, Biomedizinische Technik, Band 20, Ergänzungsband. Schiele & Schön. Berlin, Mai 1975.
- (4) INBAR G.F.: Estimation of Modification in Muscle Reflex Dynamic Parameters by Modulation of the Gamma System, Digest of the X International Conference on Medical and Biological Engineering. Dresden, Aug. 1973.
- (5) ANDERSSON B., LÉNNESTRAND G.: Frequenzanalysen von einem Muskel-Muskel-spindelssystem. Aus Fortschritte der Kybernetik R. Oldenburg Verlag, München, Wien 1967.
- (6) FRANK H.: Kybernetische Grundlage der Pädagogik, ACIS-Verlag. Baden-Baden 1962.
- (7) GAWRONSKI R.: On Structures of the Muscle Control System. Advances of the External Control of Human Extremities. Belgrad 1970.
- (8) GRACANIN F., MARINCEK I.: Development of New Systems for Functional Electrical Stimulation. Siene (7).
- (9) VOLTA A.: Collezione dell'Opere del Cavaliere Conte Alessandro Volta. Florenz 1816.
- (10) ADRIANOWA G.G., KOC J.M., MARTJANOW V.A., CHVILON V.A.: Uso della stimolazione elettrica per l'allenamento della forza muscolare (ital. Übersetzung aus « Nowosti medicinskogo priborostroenija »), « Atletica leggera ». Heft Nr. 173, April 1974, Milano.
- (11) PECKHAM P.H.: Design Considerations in Electrical Stimulation of Sceletal Muscle Report No. EDC 4-68-23, Cybernetic System Group, Cleveland/Ohio, Juni 1968.
- (12) KUGELBERG E.: Distribution, Histochemical and Physiological Properties of Normal and Reinnervated Rat Motor Units. Rapports du 4^e Congres International d'Electromyographie. Bruxelles, Sept. 1971.
- (13) SILNY J., RAU G.: Messung des komplexen Hautwiderstandes. Biomedizinische Technik, Band 22, Ergänzungsband. Schiele & Schön. Berlin, Okt. 1977.
- (14) FABER S.: Methodische Probleme bei Hautwiderstandsmessungen. Biomedizinische Technik, Band 22, Ergänzungsband. Schiele & Schön. Berlin, Okt. 1977.
- (15) MAAS J.A.: Induktive Stimulatoren zur berührungslosen Übertragung von Reizströmen. Biomedizinische Technik, Band 20, Ergänzungsband. Schiele & Schön. Berlin, Mai 1975.
- (16) TRNKOCZY A.: Repeatability of Functional Electrically Stimulations. Digest of the 10th International Conference on Medical and Biological Engineering. Dresden, Aug. 1973.
- (17) McNEAL D.R., WILEMON W.K.: Treatment of Spacity Through Functional Electrical Stimulation. Neuroelectric Conference. San Francisco, Febr. 1969.
- (18) LIBERSON W.T., HOLMQUEST H.J., SCOTT D., DOW M.: Functional Electrotherapy. Phys Med. Rehabilitation 42 (1961), 101.
- (19) BRACALE M., CASTELLUCI R., OLIVA S.: A Two Channel Proportionally Controlled Functional Electrical Stimulator for Orthotic and Rehabilitation Purposes in Hemiplegic Patients. Digest of Papers, 6th Medical and Biological Engineering Conference. Ottawa, Aug. 1976.
- (20) VODOVNIK L.: Information Processing in the Central Nervous System During Functional Electrical Stimulation. Final Report of Project 19-P-58391-F-01. Ljubljana, Dez. 1971.
- (21) BRACALE M., SERRA C.: EEG Evoked Response to Somatosensory Stimulation: a Possible Test for Assessing the Long-Terme Effects of FES on Paretic Muscles Digest of Papers, 6th Medical and Biological Engineering Conference. Ottawa, Aug. 1976.

- (22) VODOVNIK L., VAN DER MEULEN J.P.: Modelling of Spasticity and its Compensation by Electrical Stimulation. Final Report of Project 19-P-58391-F-01, Ljubljana, Dez. 1971.
- (23) KRALJ A.: Muscle Coordination Studies in Man and their Relation to Functional Electric Stimulation of Muscle. Final Report of Project 19-P-58391-F-01, Ljubljana, Dez. 1971.
- (24) COMMANDRE F.: Electromusculature. *Medecine du Sport*, N. 6, 1977.
- (25) VIANI J.L., CALLIGARIS B., COMMANDRE F., BERTOLINO N., ROUSSON R.: Entrainement isotonique par excitation électrique. Un cas de surmenage et d'incidents *Médecine du Sport*, N. 3, 1975.
- (26) DIMITRIJEVIC M.R.: Further Advances in Use of Physiological Mechanisms in the External Control of Human Extremities. *Advances of the External Control of Human Extremities*. Belgrad, 1970.
- (27) LINDSTROM L., KADEFORS R., PETERSEN I.: A New Electromyographic Index for Muscle Fatigue Studies. *Digest of the 11th International Conference on Medical and Biological Engineering*. Ottawa, Aug. 1976.
- (28) KRALJ A., TRNKOCZY A., VODOVNIK L.: Muscle Fatigue due to Electrical Stimulation of Normal and Paraplegic Patients. Final Report of Project 19-P-58391-F-01, Ljubljana, Dez. 1971.
- (29) RAU G., VREDENBREGT J.: EMG Activity, Force and Fatigue during Voluntary Static Contractions. *Rapports du 4^e Congrès International d'Electromyographie*. Bruxelles, Sept. 1971.
- (30) JEGLIC, PAJNTAR, VODOVNIK: Modification on FES-induced Motor Response by Means of Hypnosis *Advances in External Control of Human Extremities*. Belgrad 1973.