

Strumentazione Biomedica

Agostino Accardo

Università di Trieste

accardo@units.it

Parte III

CARATTERISTICHE PARTICOLARI DEI SEGNALI BIOLOGICI

(prima parte)

SEGNALI BIOELETTRICI

SEGNALI BIOELETTRICI

POTENZIALE D'AZIONE

Generato da membrana eccitabile di una o più cellule nervose o muscolari

2 microelettrodi (alta Z)

Ampiezza < 100mV

Banda < 2KHz (ma anche fino 30KHz se si vuole definire la forma)

Spesso non importa la forma del potenziale ma solo il nr di spike/s

Metodi di 'template matching' per identificare gli spike

SEGNALI BIOELETTRICI

ELETTRONEUROGRAMMA (ENG)

Si misura il contributo di più potenziali d'azione trasmessi attraverso il volume conduttore

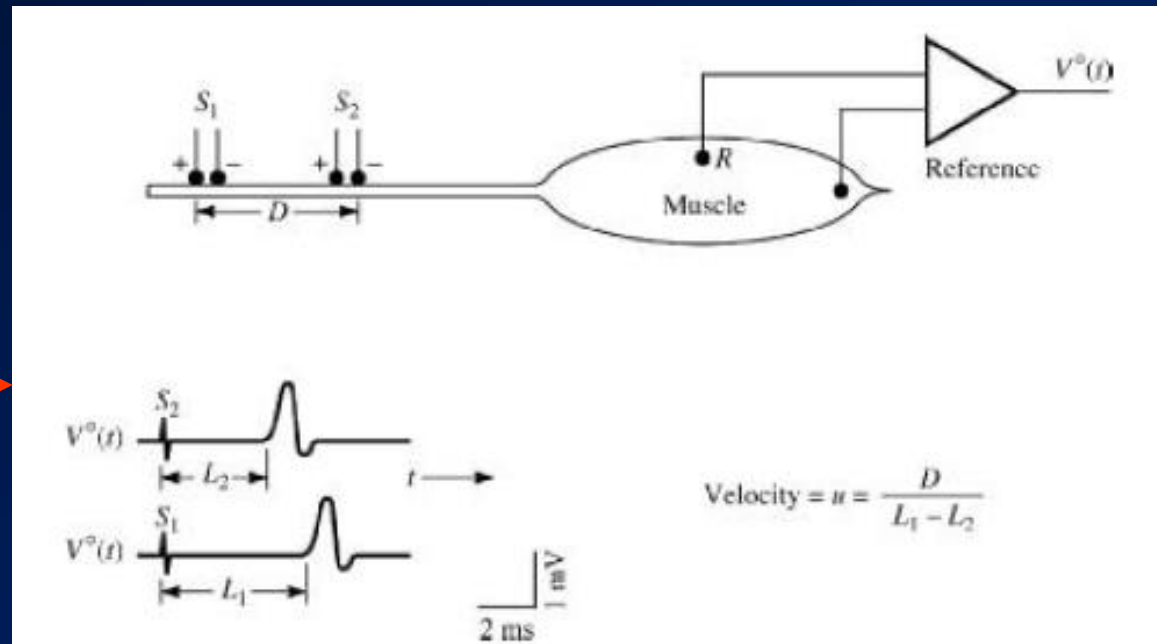
Si valuta: entità fibre danneggiate, grado rigenerazione nervosa

5 μ V - 10mV

Banda < 1KHz (da 10Hz)

Misure su:

- **Nervi motori** \longrightarrow
- Nervi sensoriali
- Entrambi i Nervi



p.es. nervo peroneale della gamba:

S_1 = dietro il ginocchio, S_2 = dietro la caviglia, R = fianco del piede

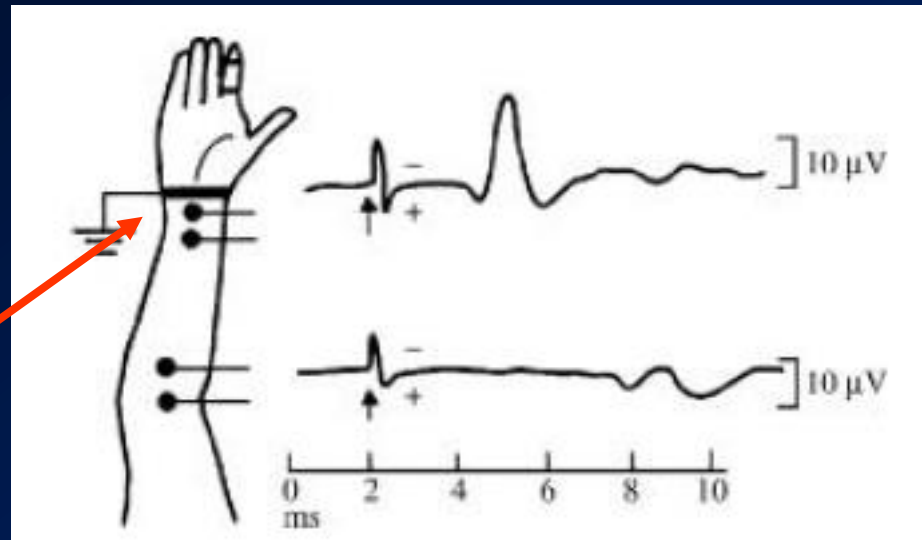
SEGNALI BIOELETTRICI

ELETTRONEUROGRAMMA (ENG)

ENG sensoriale

Nervi sensoriali

Per eliminare campi elettrici passivi accoppiati agli elettrodi di stimolazione



p.es. nervo mediale da indice-medio sino al gomito o nervo ulnare da anulare-mignolo sino all'ascella

Si fa *averaging* sincronizzato allo stimolo => > S/N

Impulsi quadrati di tensione (100-200V isolati per 100-300µs per stimolare la via sensoriale MA non la via del dolore)

Velocità: 40-70m/s

SEGNALI BIOELETTRICI

ENG misto

Nervi sensoriali e motori

Arco riflesso

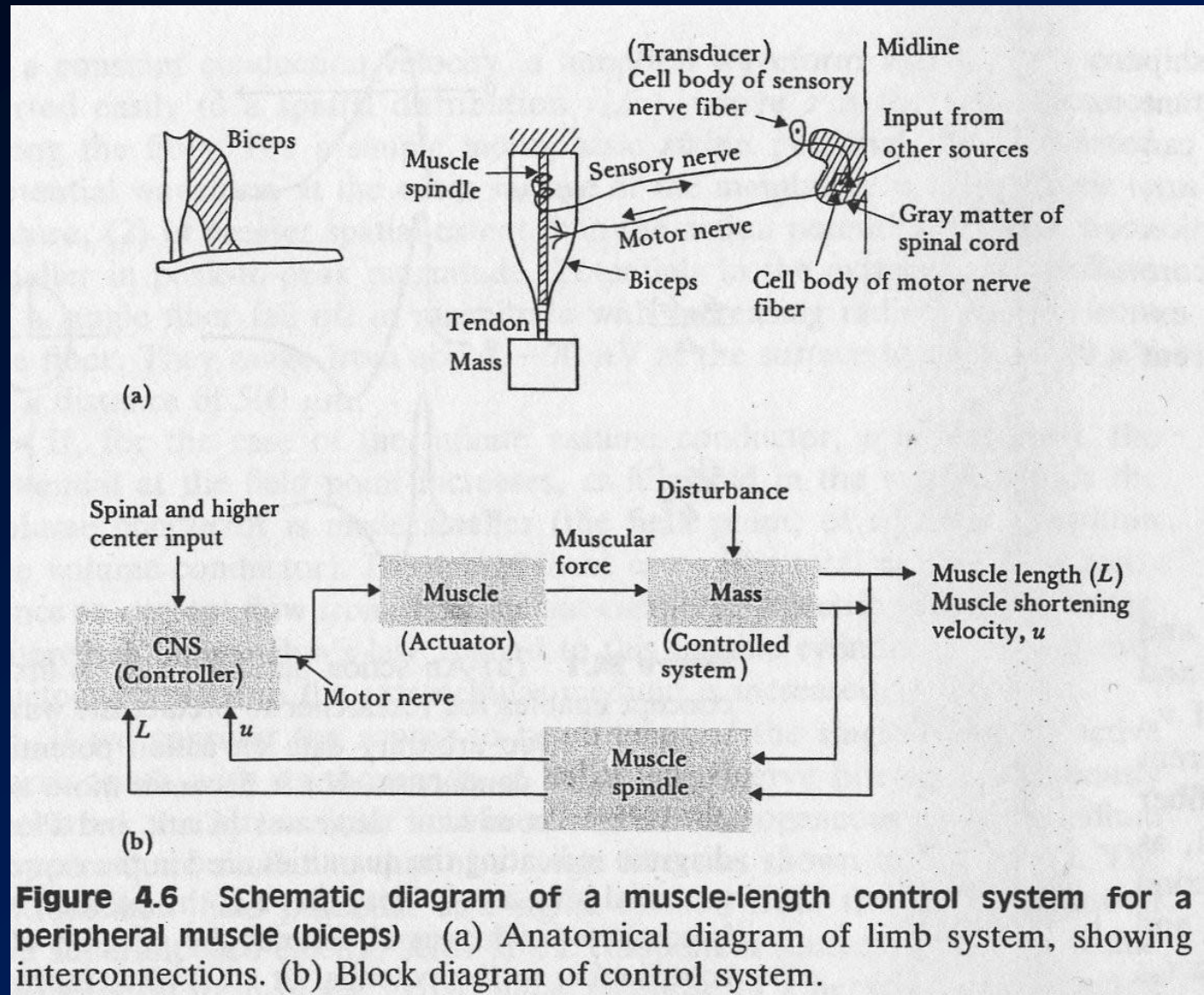


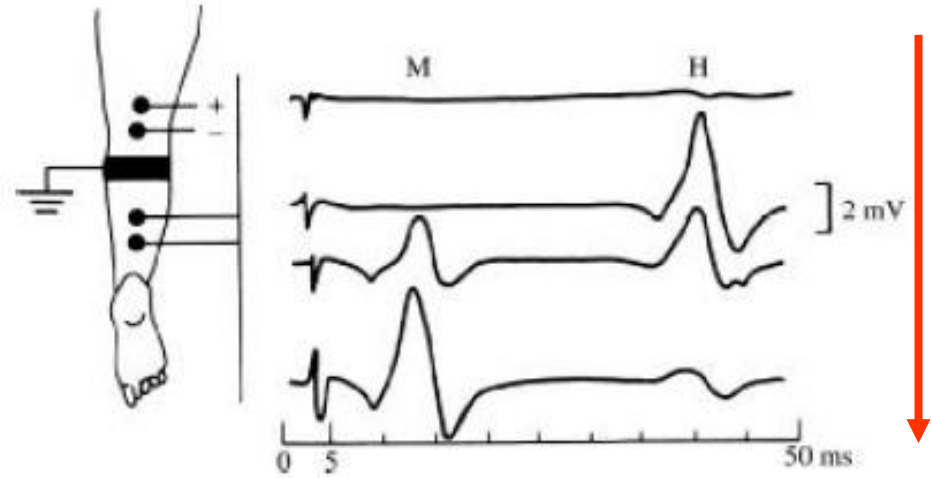
Figure 4.6 Schematic diagram of a muscle-length control system for a peripheral muscle (biceps) (a) Anatomical diagram of limb system, showing interconnections. (b) Block diagram of control system.

SEGNALI BIOELETTRICI

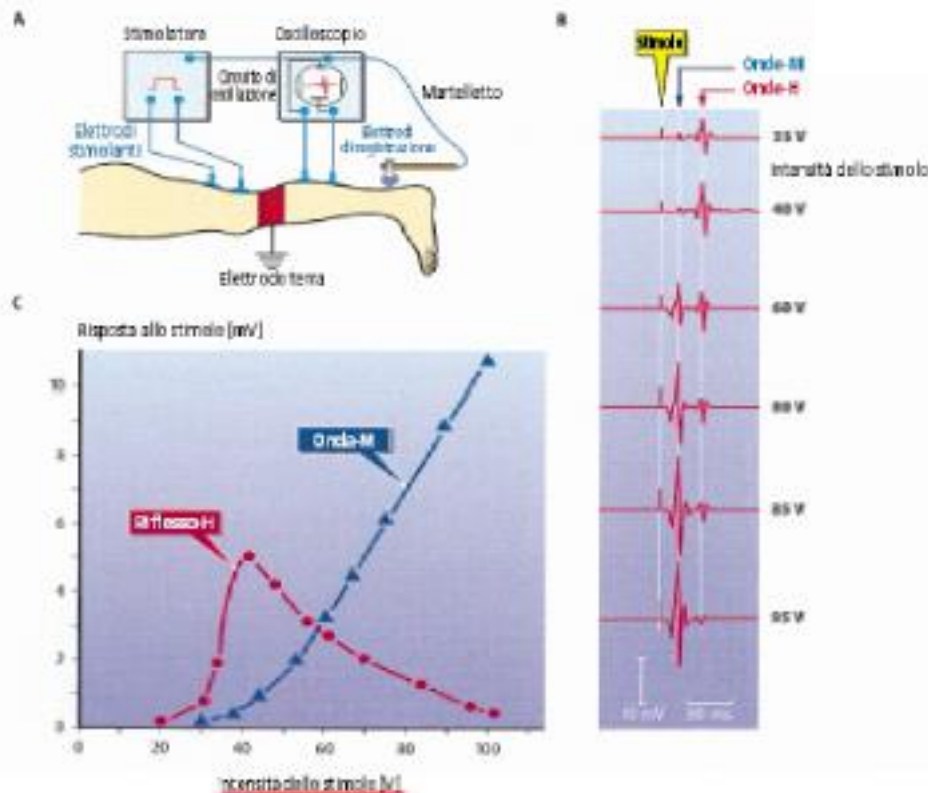
ENG misto

Nervi sensoriale e motorio

Riflesso H



Riflesso H



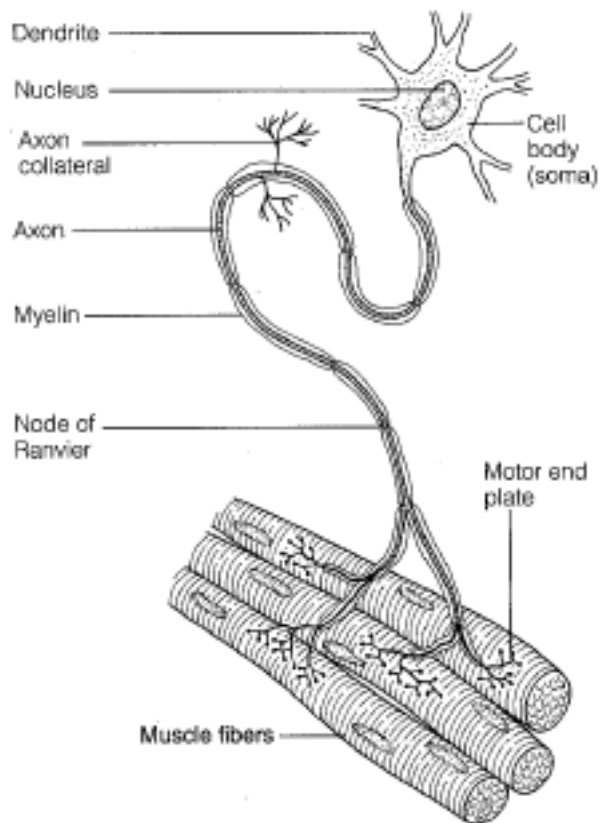
Al crescere di V_{stim}
dapprima solo risposta
riflessa sensori-motoria (H)
poi prevale la motoria (M)
diretta

Curve H-M per grado
allenamento muscolare

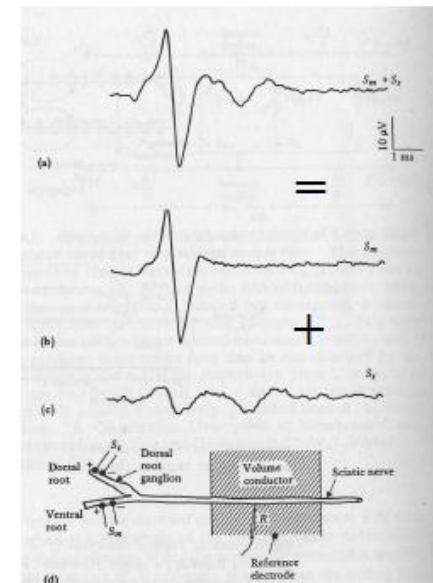
SEGNALI BIOELETTRICI

EMG - ELETTROMIOGRAFIA

Unità Motoria: motoneurone + fibre muscolari innervate



Misura del potenziale d'azione



Segnale misurato

Componente motoria

Componente sensoriale

S_m = stimolo fibra motoria

S_s = stimolo fibra sensoriale

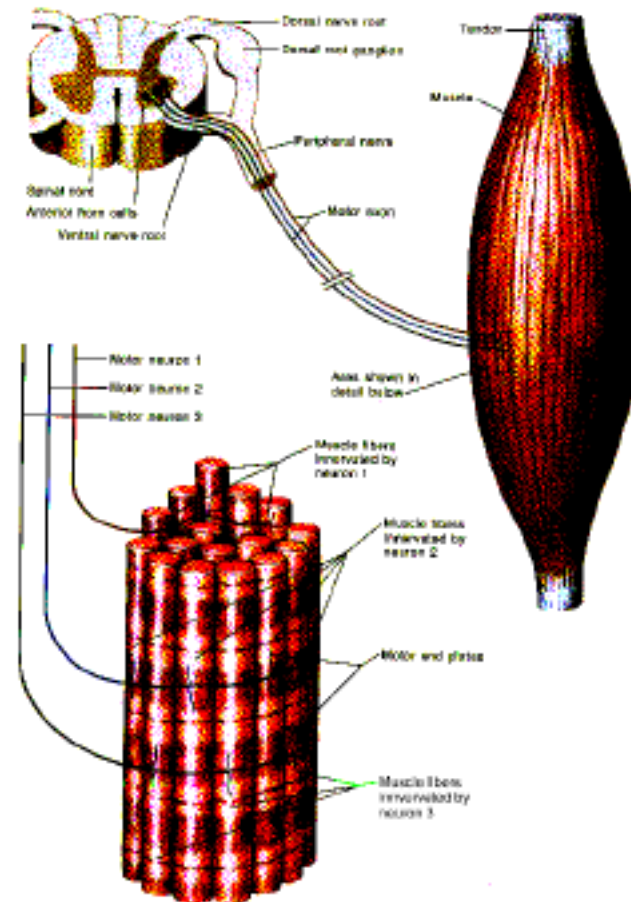
Generato dal muscolo per contrazione volontaria o stimolata

- 3 TIPI:**
- Su singola fibra
 - Su unità motoria
 - Su un'area

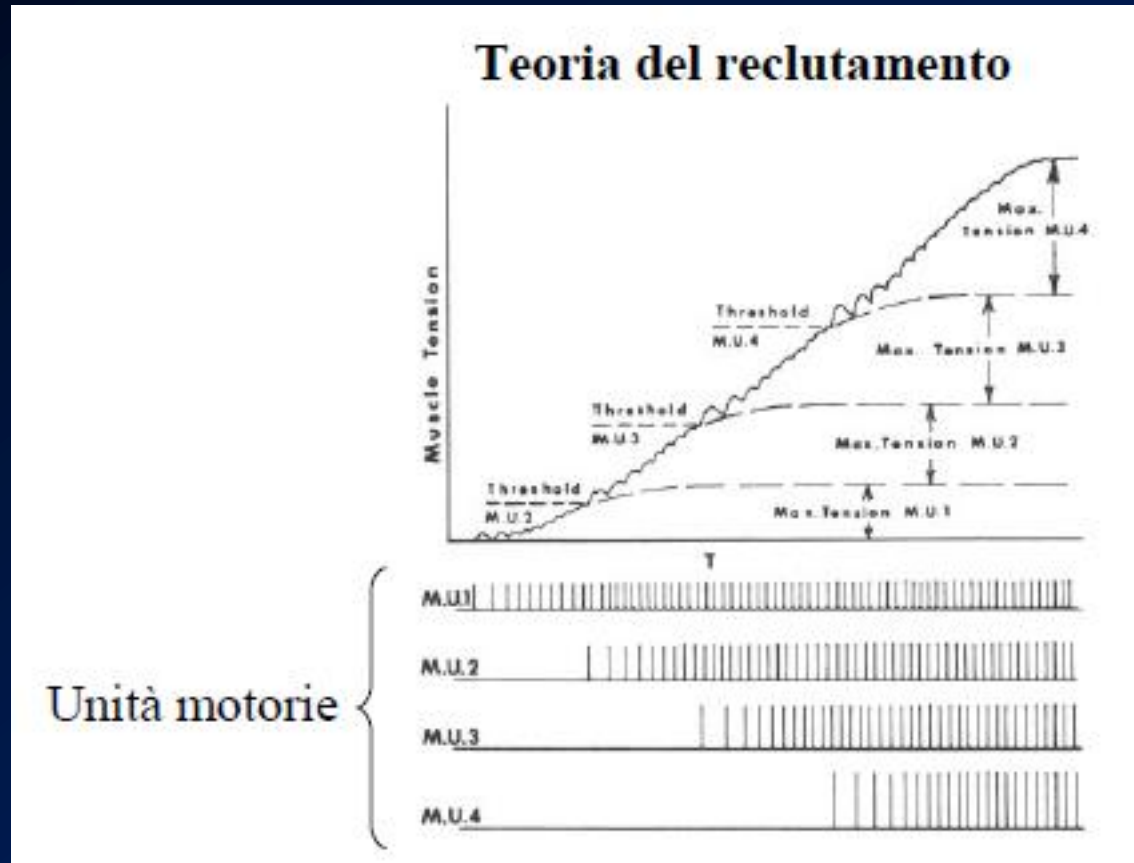
SEGNALI BIOELETTRICI

EMG - ELETTROMIOGRAFIA

- l'*unità motoria* (MU) comprende:
 - un singolo motoneurone
 - l'insieme di fibre muscolari innervate dalle propaggini del motoneurone
- le fibre muscolari di una MU sono assimilabili ad una sorgente di potenziale bioelettrico immerse in un volume conduttore costituito da altre fibre muscolari (attive o inattive)



EMG - ELETTROMIOGRAFIA



Al crescere dello sforzo si ha:

- **Reclutamento spaziale: utilizzo di nuove unità**
- **Reclutamento temporale: incremento frequenza di scarica**

EMG - ELETTROMIOGRAFIA

Su singola fibra: microelettrodi

pochi mV

500Hz-10KHz

Durata ~ 1ms

Utilità clinica: individuazione malfunzionamenti neuromuscolari p.es. miastenia

6-30Hz

- unità motoria

elettrodi ad ago

la forma } dipende dal n° di fibre
ed ampiezza } coinvolte e dal
sincronismo di eccitazione
"recruitment" progressivo } nel condiz. (fibre lente / veloci)

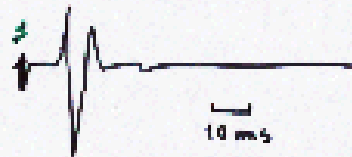
50µV - 2mV (dimensione unità motoria)

5Hz - 10kHz

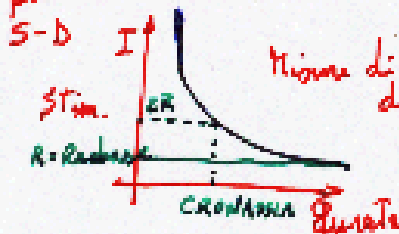
durata 3 - 15 ms

clinica: miopatie
denervazioni; periti e
rigenerazione muscolare

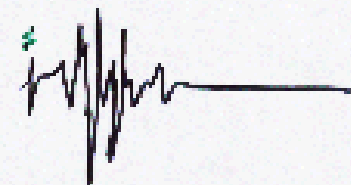
producono variaz. di vel. condiz. ed eccitabilità del muscolo
⇒ disincronizzazione
P.A. =



L'EMG può servire per studiare la curva S-D



muscolare
Misure di eccitabilità a vari livelli di stimolazione.
Cost. membrana
 $\tau = \frac{CRONOMETRO}{\ln 2}$



- SUPERFICIALI (con un'area)

elettrodi superficiali (a disco) (sensibili a grandi aree) attivi: MTC, elettrodi

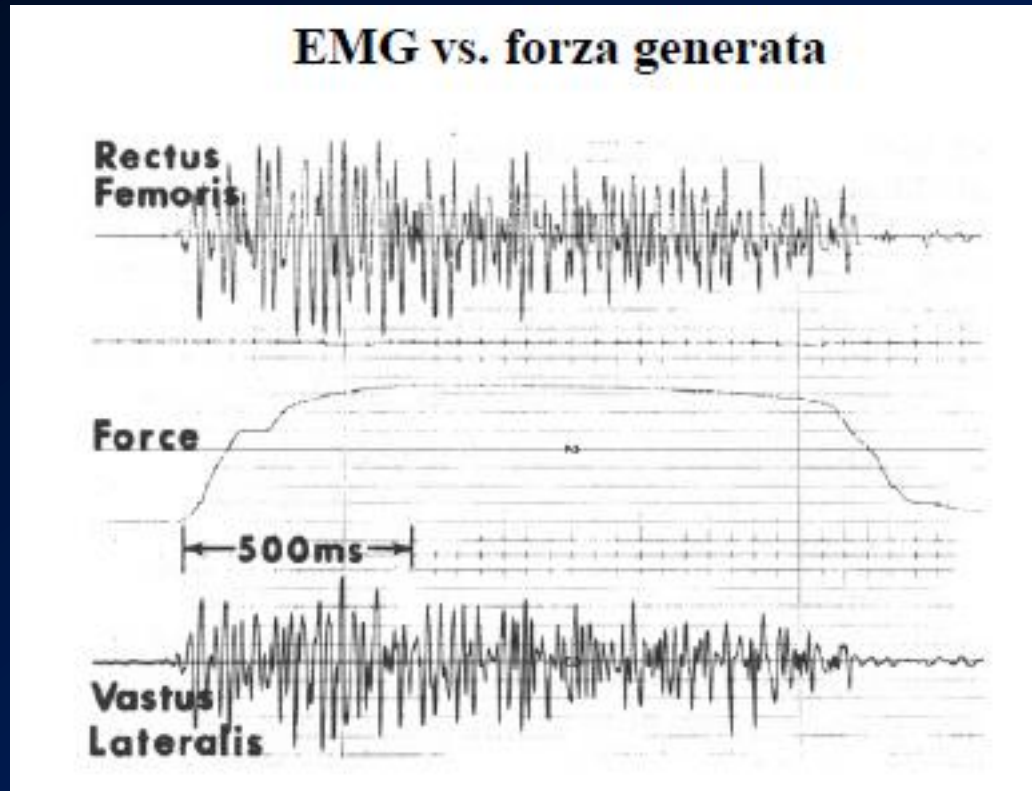
Impedenza pressoché sul muscolo prossimo agli elettrodi

50µV - 5mV

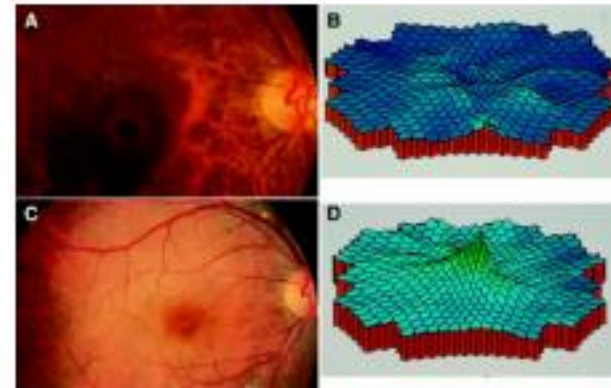
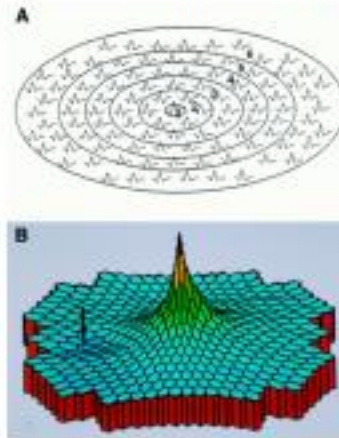
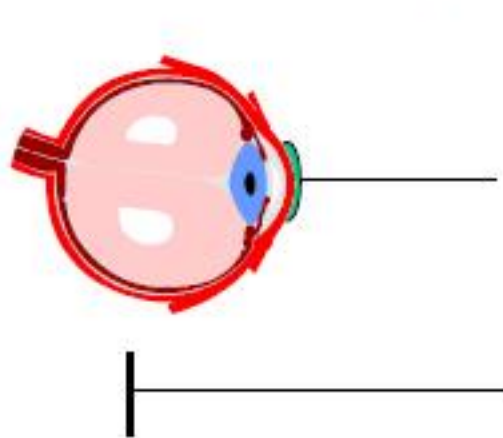
2 - 500 Hz muscoli scheletrici
0.01 - 1 Hz " lisci

clinica: tumori, affitt. cronici, controllo postico

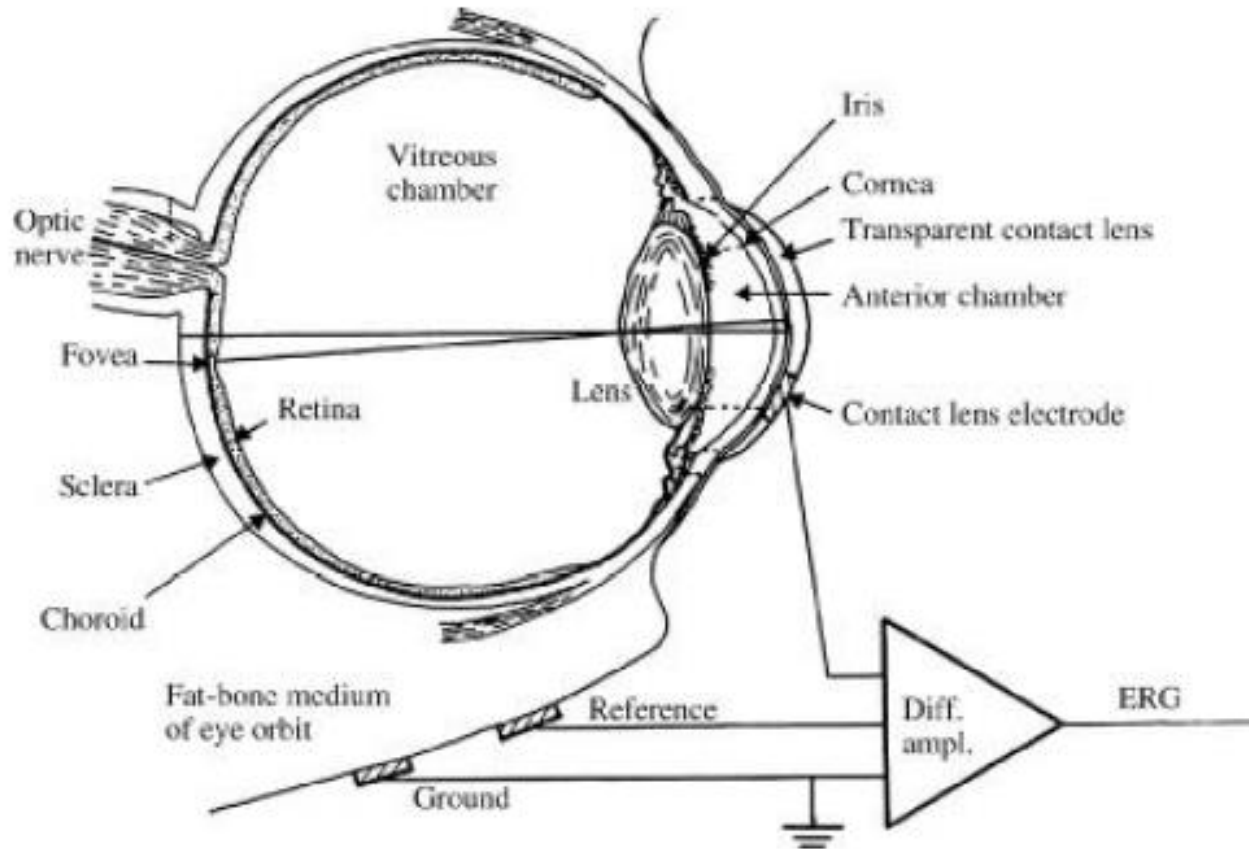
Di solito interessa rilevare solo la pranga o meno di spina
Le stimolazioni portano a un riflesso S/P → coupling.



Analisi della funzionalità dei recettori oculari

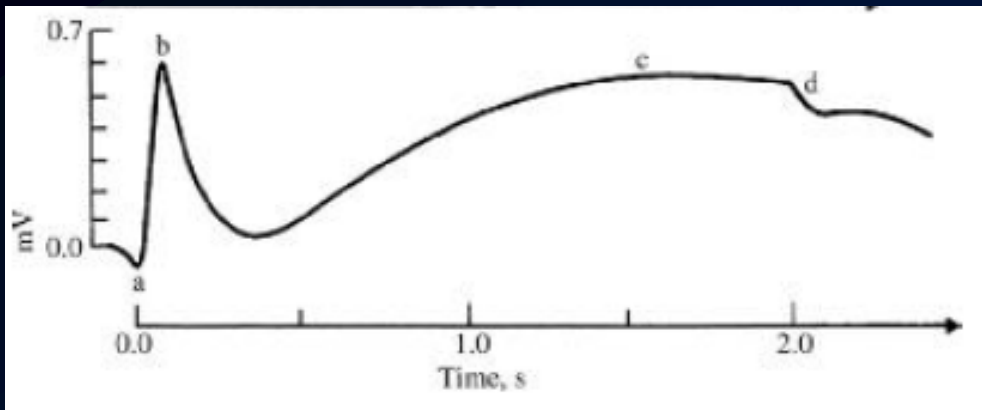


- si misura la d.d.p. tra un elettrodo posto sulla cornea e uno di riferimento
- si misura il complesso dei potenziali bioelettrici prodotti dai recettori visivi opportunamente stimolati



0.5 μ V-1mV
0.2-100Hz

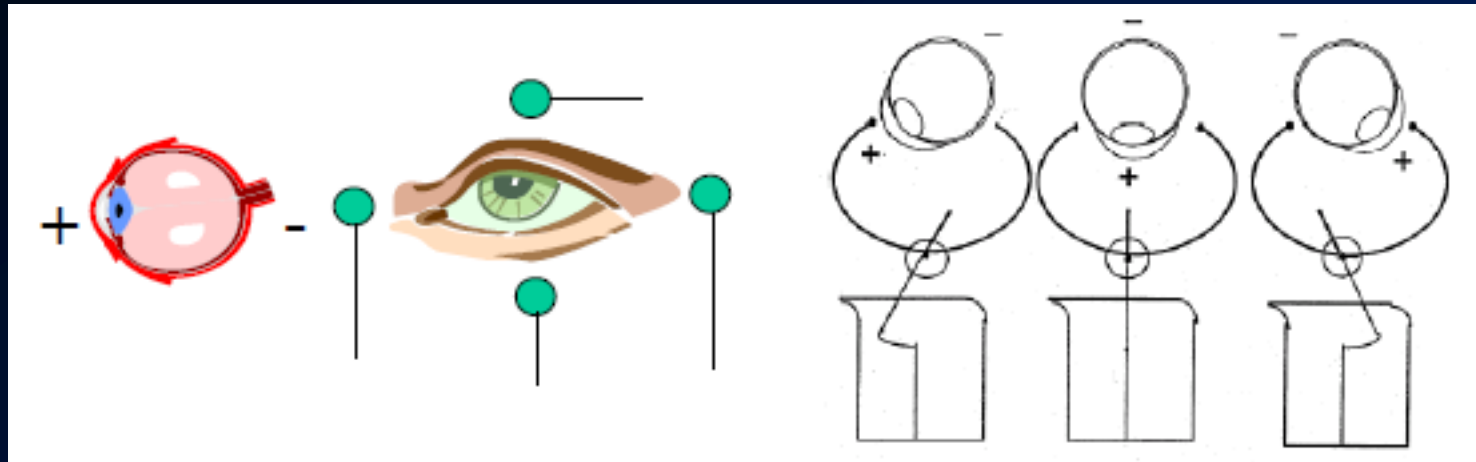
**Integrità
retinica**



In 0 si accende
A 2.0sec si spegne

6.5M coni vs 120M bastoncelli
>> 1M ganglionari

Da studi con elettodi in: vari strati della retina:
→ legarsi tra a, b, c, d e fisiologia
prima parte di a: ERP
(Early-Receptor Potential)
↓
risposta fotopigmenti:
seconda parte di a (1-5ms):
LRP (Late-Receptor Potential)
↓
uscita fotorecettori
b: risposta regione cellule bipolari
(e alcuni ganglionari)
c: part. profonde della retina e
anche l'altre
d: risposta allo spegnimento dello
stimolo



Elettrooculogramma: misura l'ampiezza dei movimenti oculari (prevalentemente sul piano frontale) con elettrodi superficiali

Sfrutta il potenziale corneo-retinico ($17\mu\text{V}/^\circ$ circa $\Rightarrow 10$) μV - 1.2mV)

DC-100Hz, campo di misura $>\pm 70^\circ$, linearità $\pm 20^\circ$, risoluzione $\sim 1^\circ$

Movimenti Saccadici, Smooth Pursuit, Vergenza, Fusione, VOR, OKR

Utilità clinica: in otorino, in oculistica e in neurologia

Nistagmo // Nistagmografo

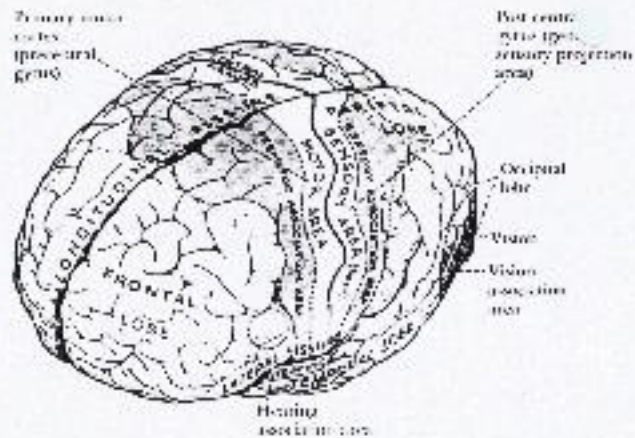


Figure 4.27 The cerebrum, showing the four lobes (frontal, parietal, temporal, and occipital), the lateral and longitudinal fissures, and the central sulcus. (From A.B. McNaught and R. Callinover, *Physiomatic Physiology*, 2nd ed., 1972, by permission of Churchill Livingstone, Head and Neck, publishers of Churchill Livingstone.)

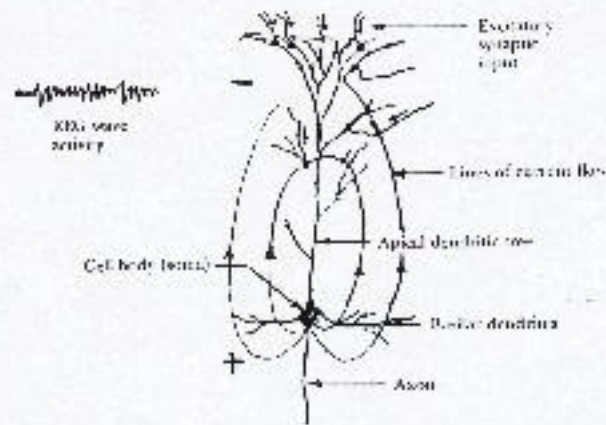


Figure 4.29 Diagram of a pyramidal cell showing the effects of excitatory and inhibitory inputs. For the case of a net inhibitory input, polarity is reversed and the apical region becomes a source (+). Current flow is indicated by arrows. The inhibitory synaptic input on the dendrites produces wave activity.

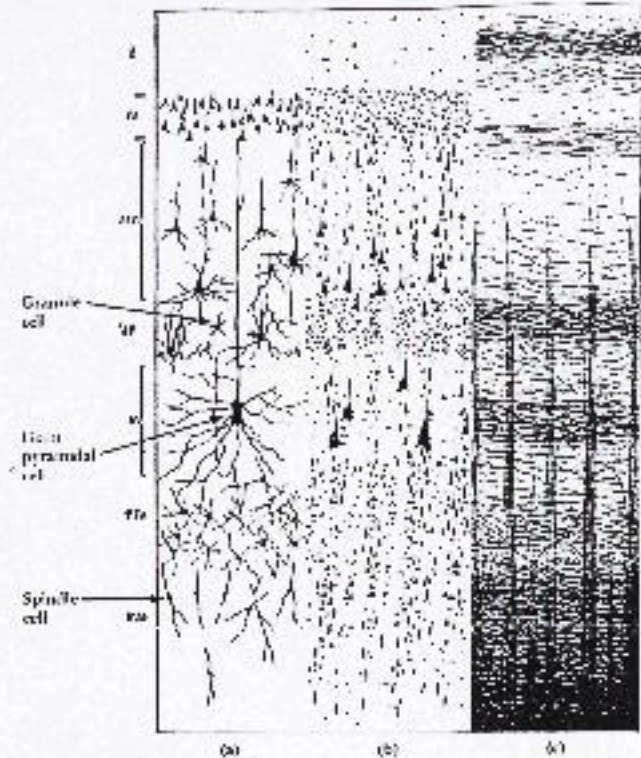


Figure 4.28 Structure of the cerebral cortex. Results obtained using different specific histological stains specific for cell bodies, dendritic and axonal processes, and myelin sheath are shown in (a) Golgi stain, (b) Nissl cellular stain, and (c) myelin sheath stain. The six layers of the cortex are also demonstrated. I = molecular layer, II = external granular layer, III = external pyramidal layer, IV = internal granular layer, V = large pyramidal layer transitional layer, VI = fusiform layer. (From

Elettroencefalogramma: misura l'attività elettrica del cervello (prevalentemente strati superficiali della corteccia)

Tre tipi di registrazione:

- **profonde (elettrodi ad ago sul tessuto nervoso)**
- **Sulla sup. del cervello (Elettrocorticogramma (ECoG))**
- **Sulla sup. dello scalpo (elettrodi sup. con collodio) attività globale**

Due modi di investigare:

- **attività spontanea, attività ordinata e simmetrica di alcune classi di cellule (prob.piramidali) o risposte sincronizzate di molte cellule (p.es. formazione reticolare)**
- **Attività evocata: potenziali 'evocati' da specifici stimoli (luminosi, acustici, somatosensoriali)**

12 CANALI / 19 ELETTRODI



M 1 (RM)	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6
2	2-4	12-4	2-4	17-2	19-10
6	4-6	4-17	1-3	2-1	10-9
8	8-8	17-3	2-12	1-17	9-10
10	8-10	3-11	1-11	18-4	18-12
12	12-14	14-8	12-18	4-3	12-11
16	14-16	6-18	11-15	3-18	11-10
1	1-3	18-5	15-10	19-6	19-14
5	3-5	5-13	15-9	8-5	14-13
7	5-7	16-8	4-8	5-19	13-18
9	7-9	8-19	5-7	18-8	18-16
11	11-13	19-7	8-10	8-7	18-15
13	13-15	7-15	7-9	7-18	15-10

Mod. 75M/1 - 1000 - 4 ES - It. Ankerl

Posizione elettrodi 10-20

6~32 canali

Lunghe durate, grande mole di dati

0.5-80Hz

Unipolare (rispetto riferimento)

Bipolare (tra elettrodi)

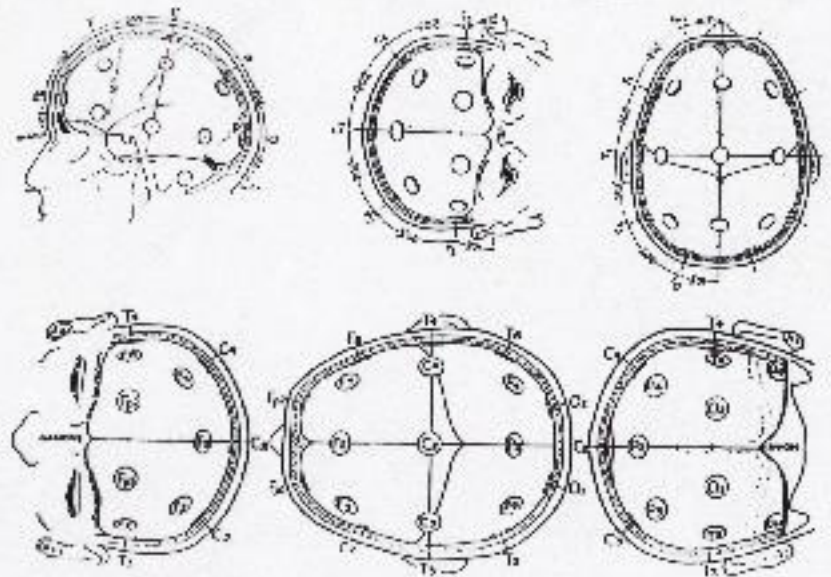


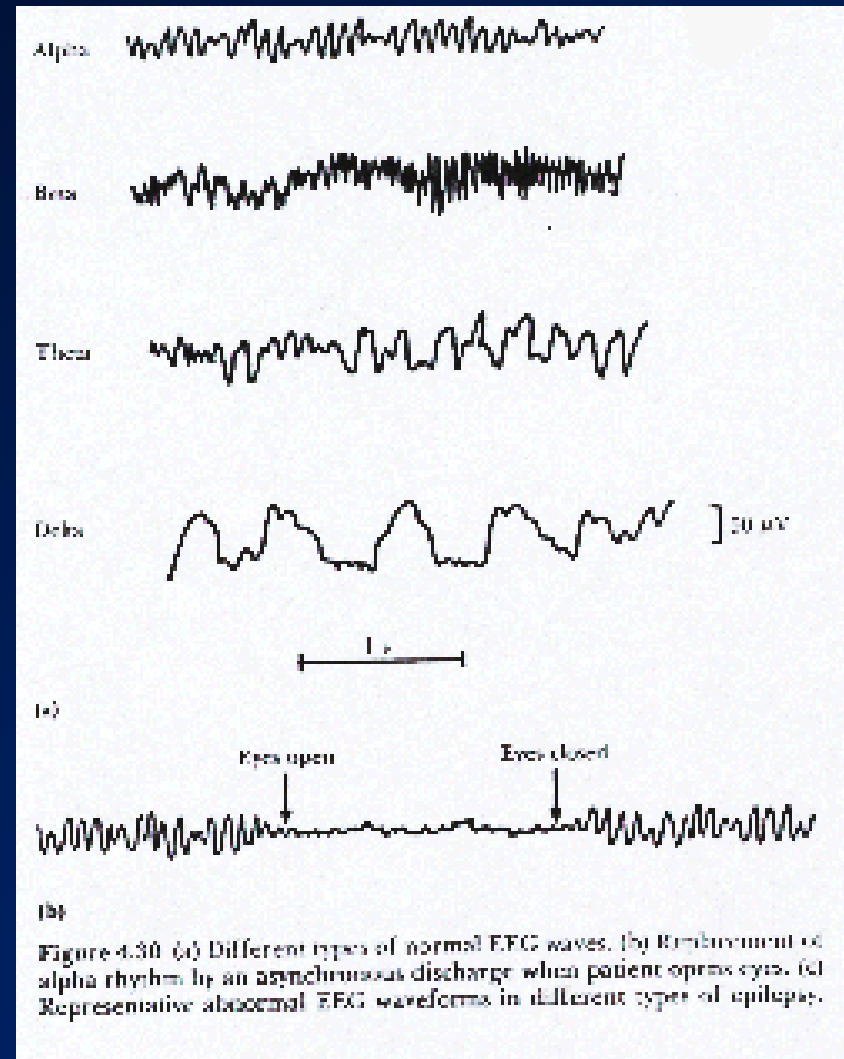
Figure 4.51 The 10-20 electrode system recommended by the International Federation of EEG Societies. (From H. H. Jasper, "The Ten-Twenty Electrode System of the International Federation in Electroencephalography and Clinical Neurophysiology," *EEG Journal*, 1958, 10 (Appendix), 371-373.)

2-100 μ V (10mV nell'ECOG)

0.5-60/100Hz

5/6 bande/ritmi/onde....:

- **Delta 0.5-4Hz (sonno profondo-anestesia) Aree diffuse**
- **Theta 4-8Hz (stadio1 sonno - frustrazione) Aree C/T**
- **Alfa 8-13Hz (svegli a OC) Area Occipitale**
- **Beta 13-22/22-30Hz (intensa attivazione/stati di tensione) Aree C/P/F**
- **Gamma 30-60Hz (motor imagery) Aree pre-frontali**



SEGNALI BIOELETTRICI

EEG

sonno profondo	sonnolenza	riposo a occhi chiusi	attività
delta < 4 Hz	4 Hz < teta < 8 Hz	8 Hz < alfa < 13 Hz	13 Hz < beta < 35 Hz
- 100 μ V	< 100 μ V	- 20-60 μ V	- 10-30 μ V

Tracciato normale

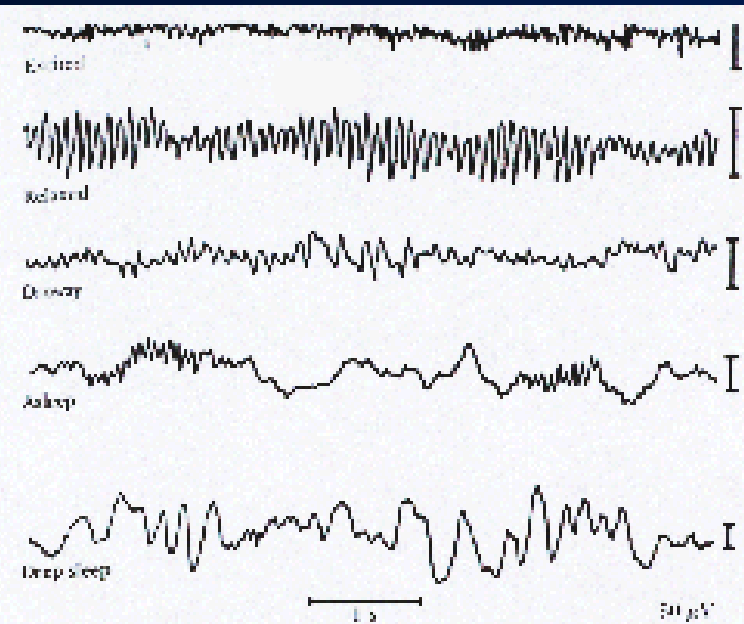
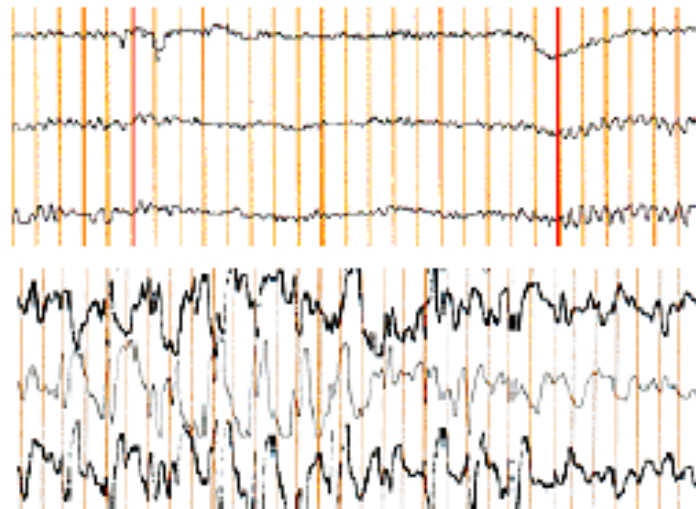
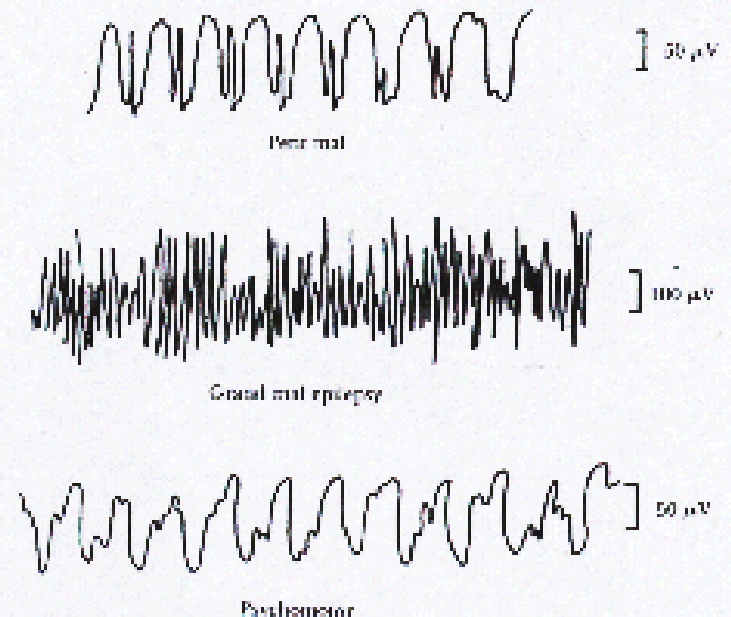


Figure 4.32 The electroencephalographic changes that occur as a human subject goes to sleep. The calibration marks on the right represent 50 μ V. (From H. H. Jasper, "Electroencephalography," in *Epilepsy and Cerebral Localization*, edited by W.G. Penfield and T.C. Erickson, Springfield, Ill.: Charles C. Thomas, 1941.)



Usato per:

- Monitorare anestesia
- Diagnosi epilessia (piccolo/grande male)
- Valutare traumi
- Disturbi del sonno
- Psichiatria
- ecc.

Es.:Stadi del sonno:

- Sonnolenza (alfa diffuso)
- Stadio 1 (theta + onde in risposta a stimoli p.es. sonori)
- Stadio 2 (>bassi frequenze, burst 3-5cicli a 12-16Hz = spindle/fusi)
- Stadio 3-sonno moderato (delta)
- Stadio 4-sonno profondo (>delta)
- REM (simile a stadi 1 e 2 ma con mov. Oculari)

MAPPE CORTICALI

POTENZIALI EVOCATI (EP) -Strumento oggettivo di misura

2 Risposte:

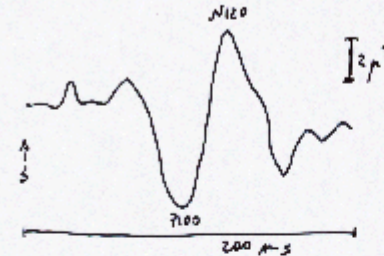
- ASPECIFICA: bassa ampiezza, simile per tutti gli stimoli
- SPECIFICA: caratterizzata da latenze, forme e ampiezze caratteristiche della stimolazione

0.1-10 μ V => AVERAGING
SINCRONIZZATO (S/N $\sim \sqrt{n}$)
o metodi per identificare
singoli eventi (filtri di Kalman)

3 Tipi: VISIVI (VEP)
UDITIVI (AEP)
SOMATOSENSORIALI (SEP) + altri: DOLORE (stimol. termici)
OLFATTIVI
VESTIBOLOSPINALI

(No SC)

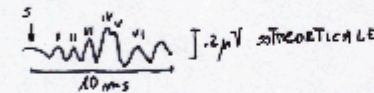
VEP:



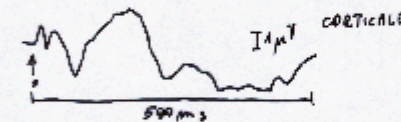
- lobi occipitali
- flash o pattern (a intensità)
- 1: 20 μ V 1: 300 Hz
- durata ~ 200 ms

clinica: dispros: cecità multipla
cecità ai colori
deficit campo visivo
edema visiva optica

AEP:



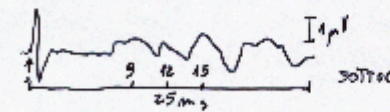
- Elettrodi al vertice
- click o 'tone' burst o rumore bianco
- 300-3000 Hz
- di viso in:



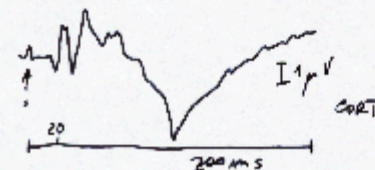
- latenza (I) ~ 1 ms
- risposta precoce (meno ottico + brainstem)
- fino a 8 ms = SOTTOCORTECALE
- risposta media 8-50 ms
- " tardiva 50-500 ms

clinica: deficit uditivi: specie nei bambini

SEP:



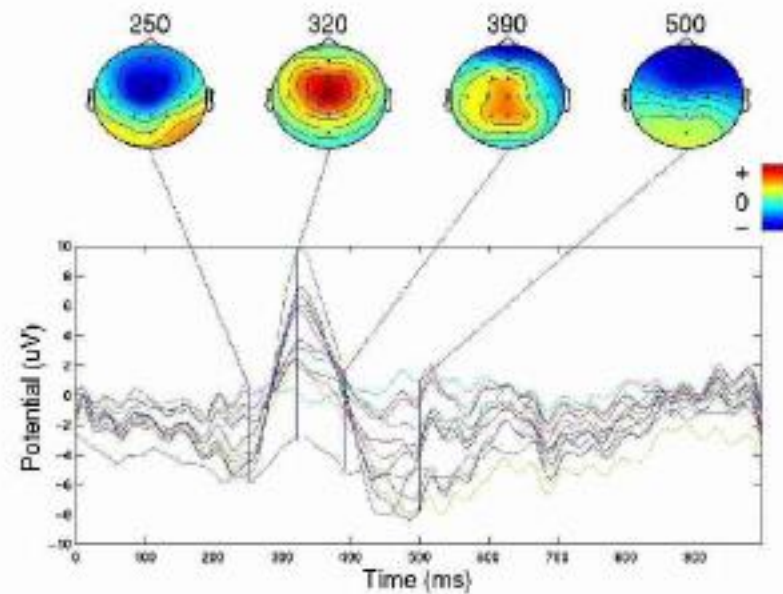
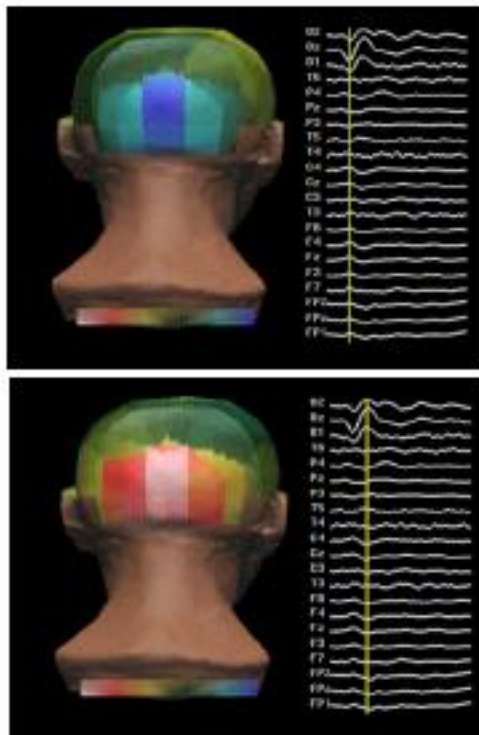
- Elettrodi sulla corteccia sensoriale
- Stimol. meccanici o elettrici (nella periferia)
- 2-3000 Hz
- durata 25-50 ms SOTTOC.
fino 200 ms CORTIC.



clinica: info sulla via della colonna spinale tra i nervi periferici e la corteccia

EEG – Potenziali corticali evocati

Analisi della funzionalità del sistema nervoso centrale



SEGNALI BIOELETTRICI ECG -- ELETTROCARDIOGRAMMA

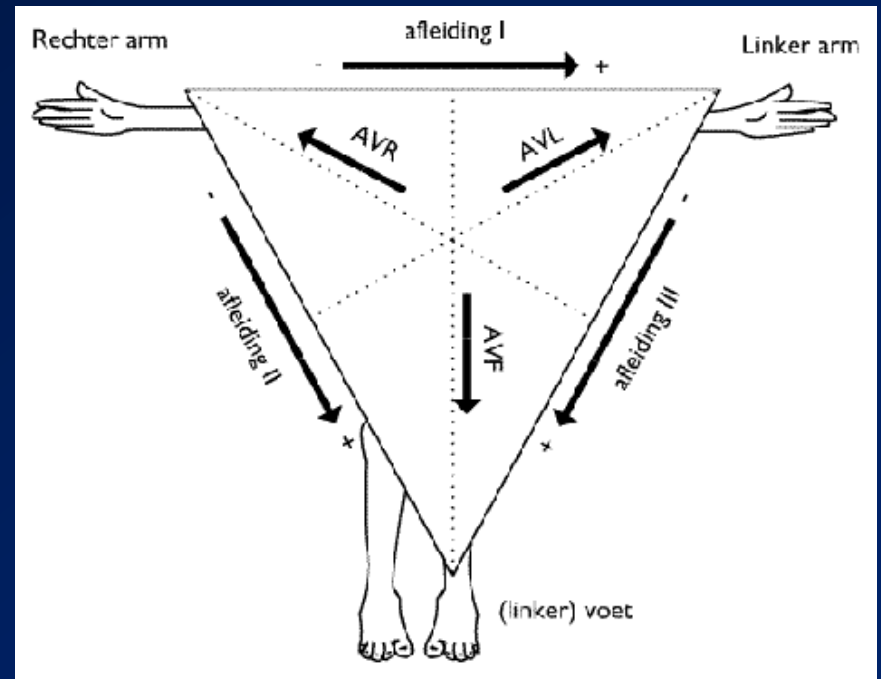
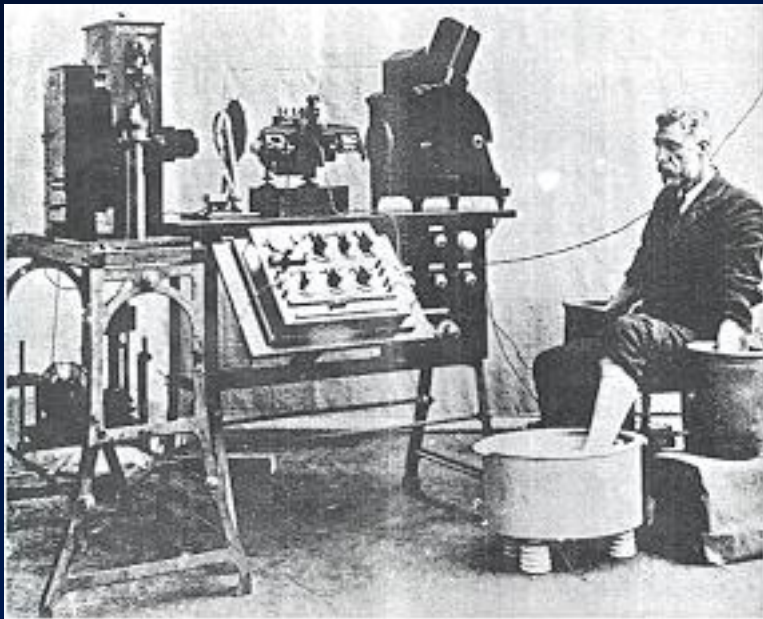
ATTIVITA' ELETTRICA DEL CUORE RILEVATA
SULLA SUPERFICIE DEL TORACE

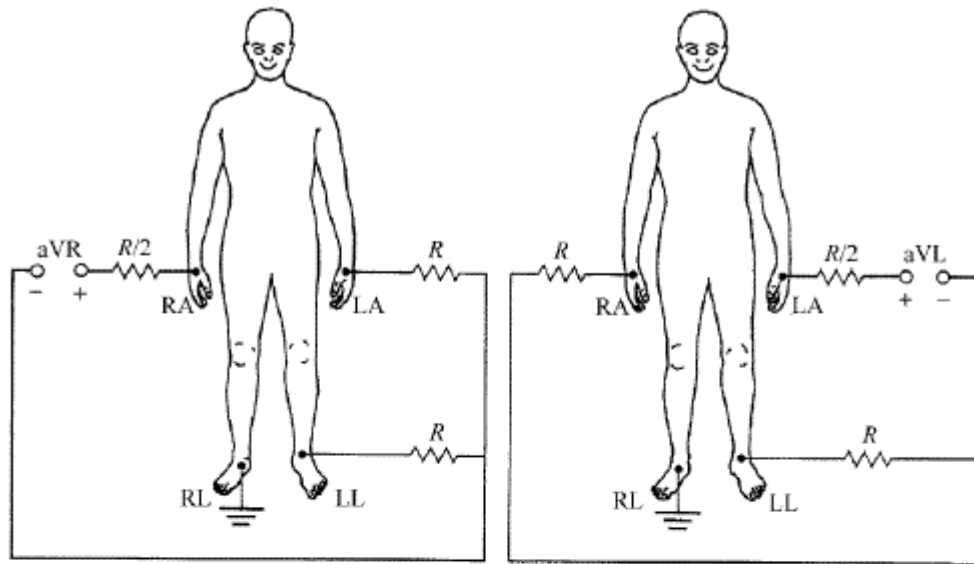
+/- 5mV .01 – 150 Hz

Hp: DIPOLO PERIODICO
TEMPO VARIANTE

PER 1 EMG => CIRCA 2 EEG E 35 ECG!

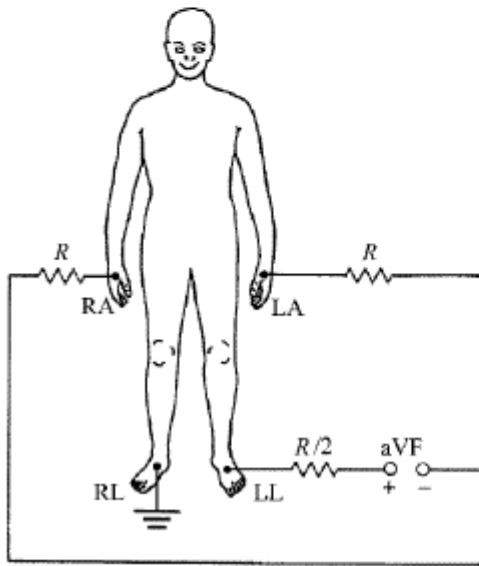
Triangolo di EINTHOVEN



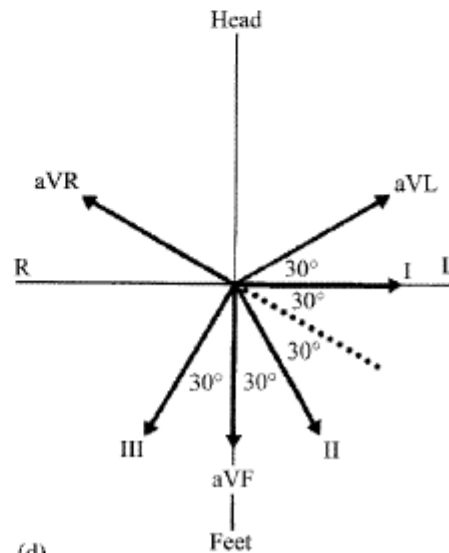


(a)

(b)



(c)

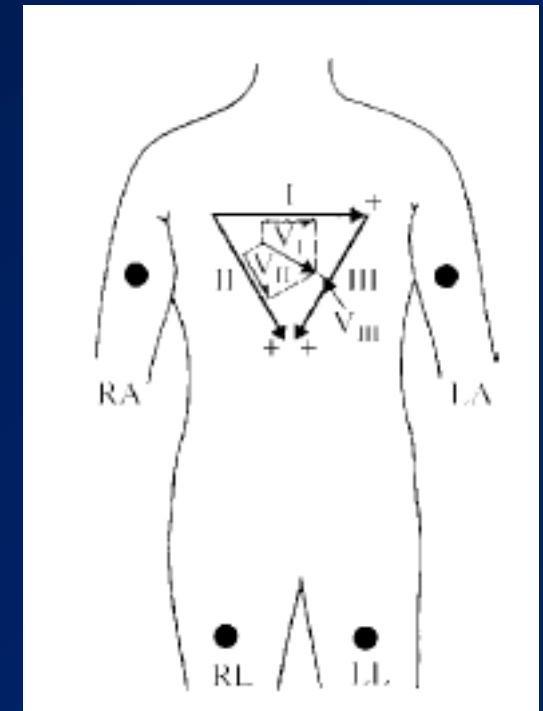


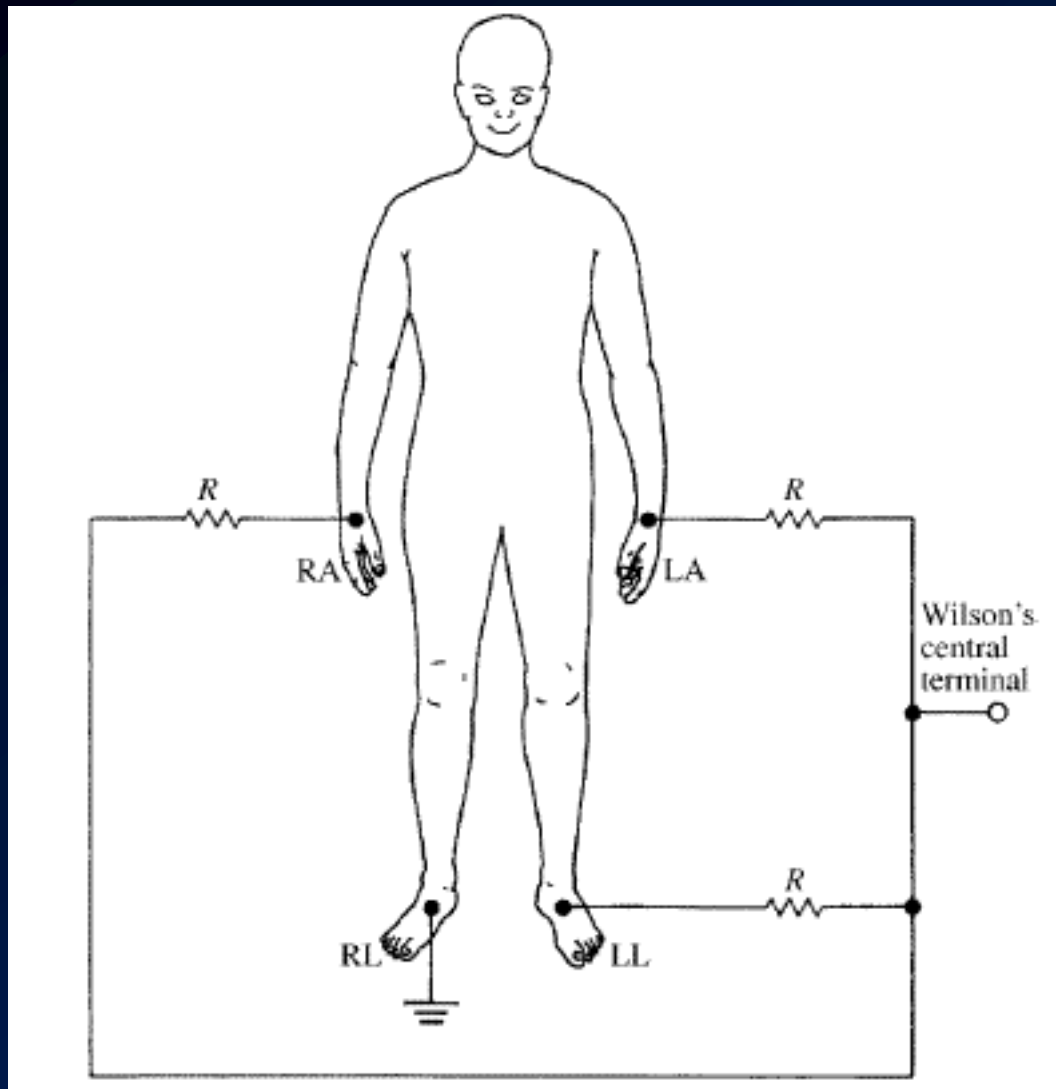
(d)

6+6 DERIVAZIONI

Derivazioni
aumentate

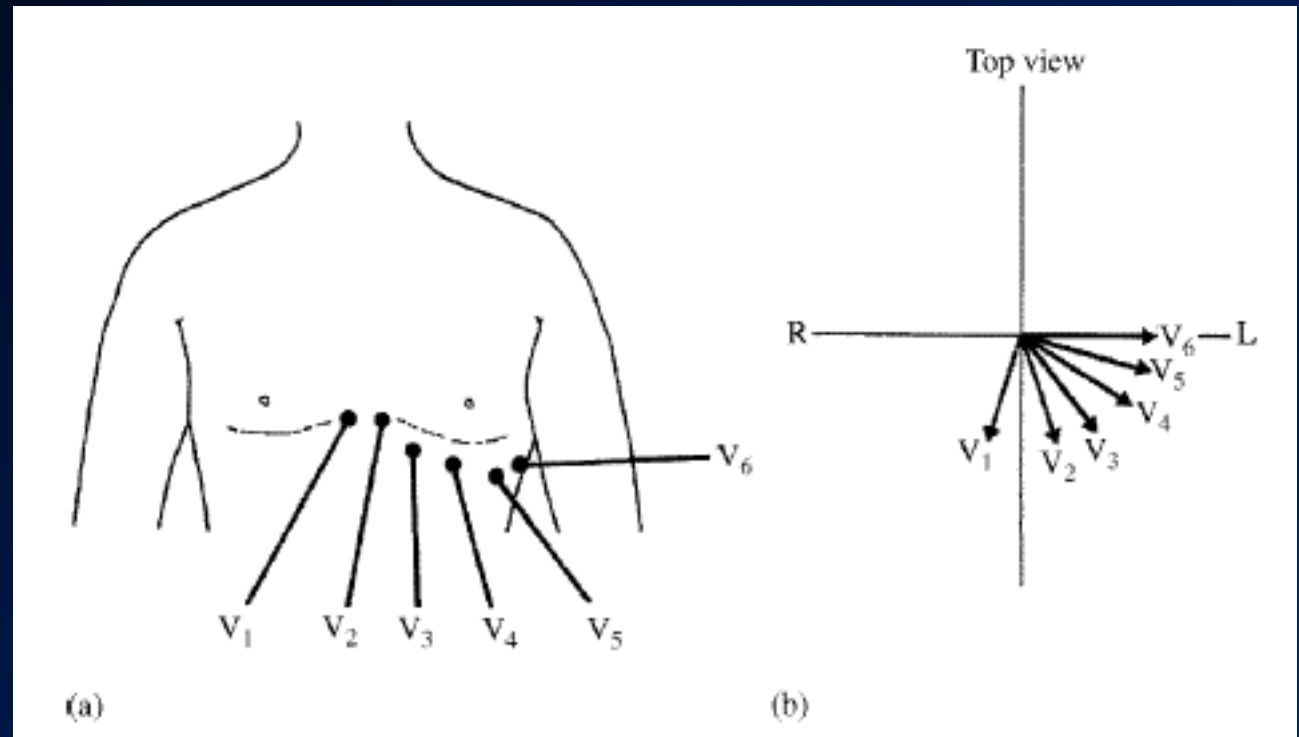
Derivazioni
principali





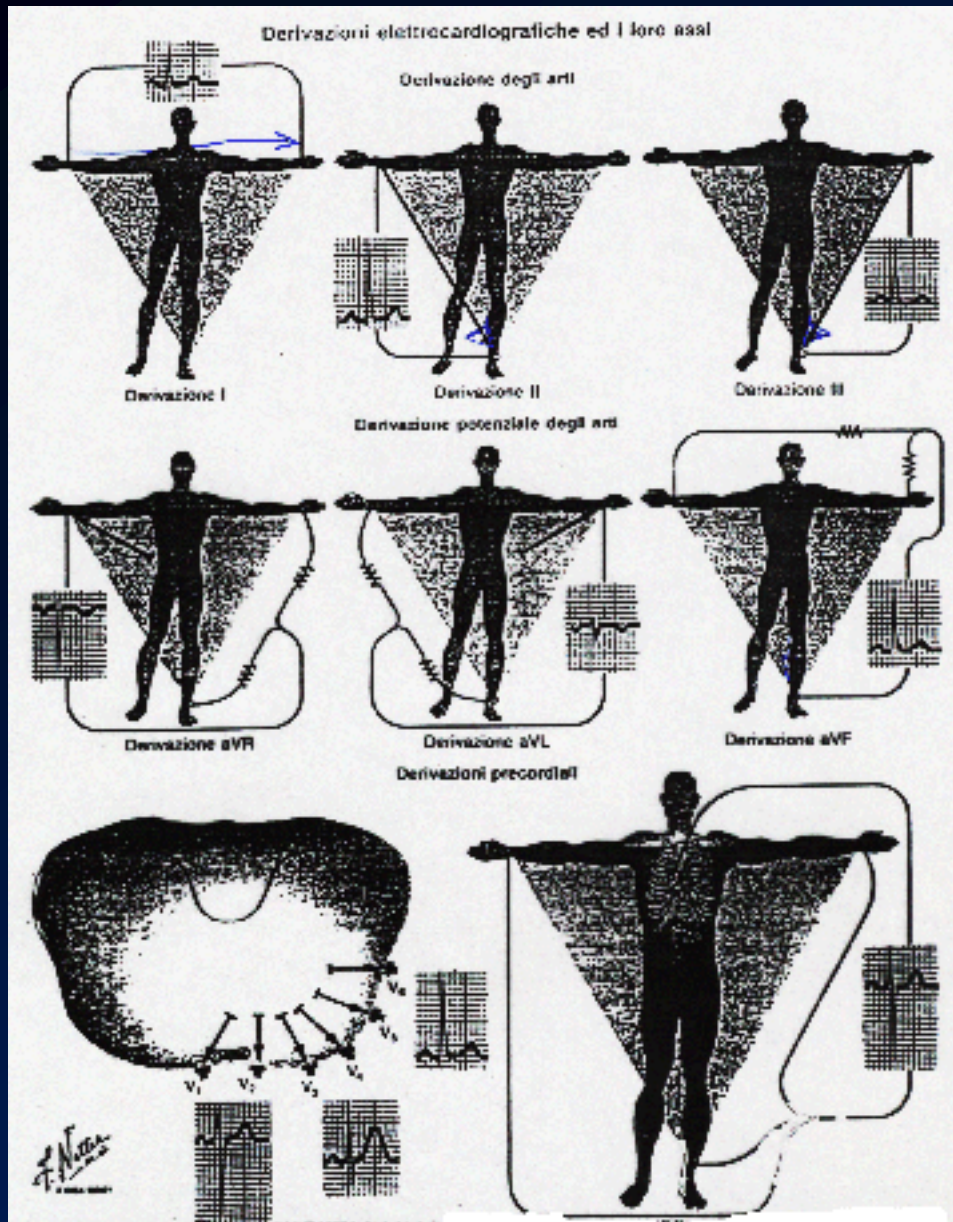
**Riferimento
centrale di
Wilson**

Derivazioni precordiali

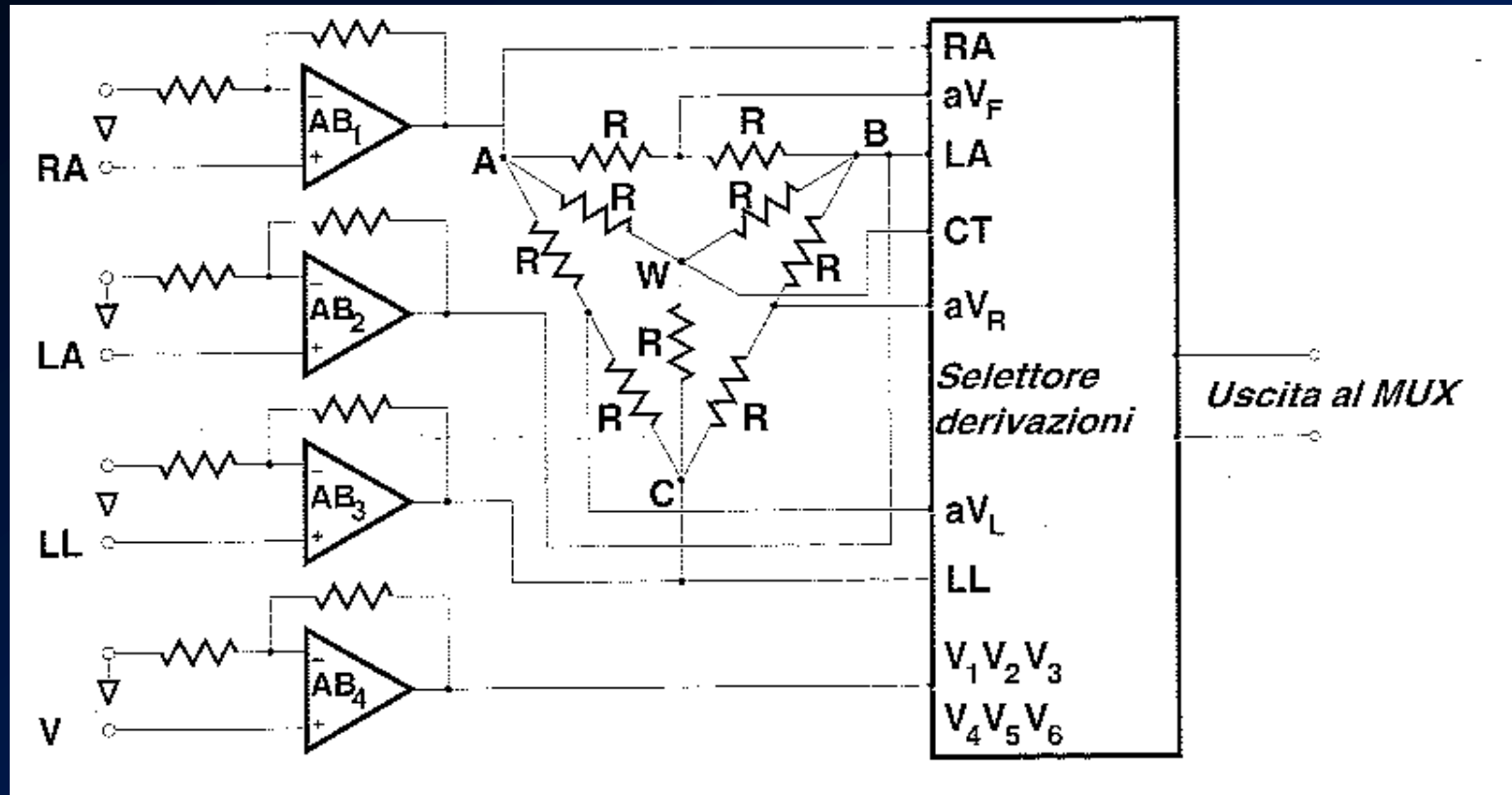


Per una proiezione antero-posteriore: elettrodo di riferimento dentro l'esofago all'altezza del cuore o Wilson

SEGNALI BIOELETTRICI ECG -- ELETTROCARDIOGRAMMA

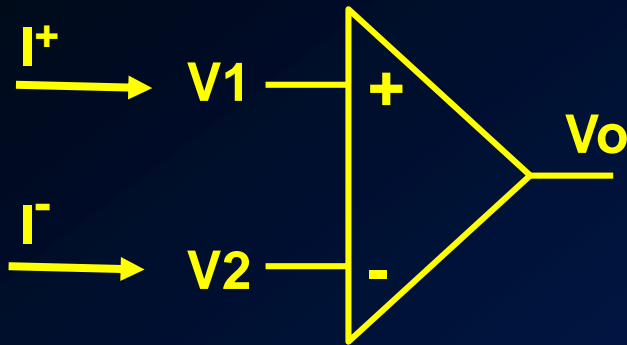


SEGNALI BIOELETTRICI ECG -- ELETTROCARDIOGRAMMA



Richiami di elettronica di base

OP IDEALE:



$V_o = 0$ se $V_1 = V_2$

$Ampl = \infty$

$Z_{in} = \infty$ $Z_{out} = 0$

$I^+ = I^- = 0$

Banda infinita

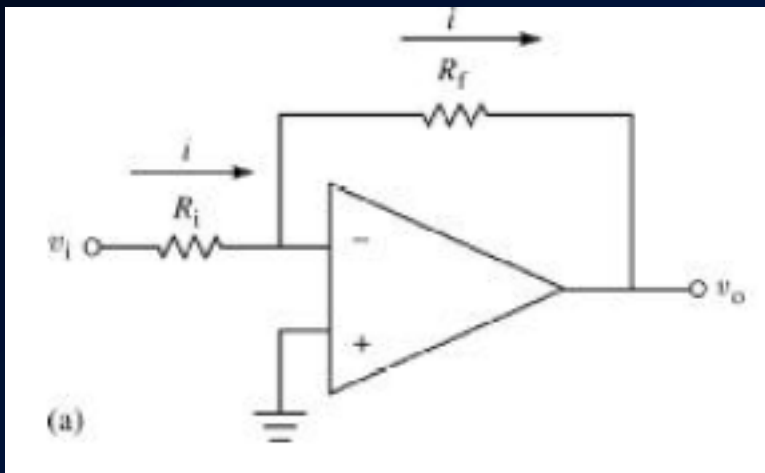
Nella zona lineare V_1 è sempre = V_2 (altrimenti $V_1 - V_2$ sarebbe amplificato per $A = \infty$ e quindi uscita in saturazione!) Se $V_{lim} = \pm 15V$, linearità sino a $\pm 10V$, anche se alcuni saturano solo oltre $\pm 13V$

CONFIGURAZIONI BASE:

- UNIPOLARI (INVERTENTE E NON)
- DIFFERENZIALE

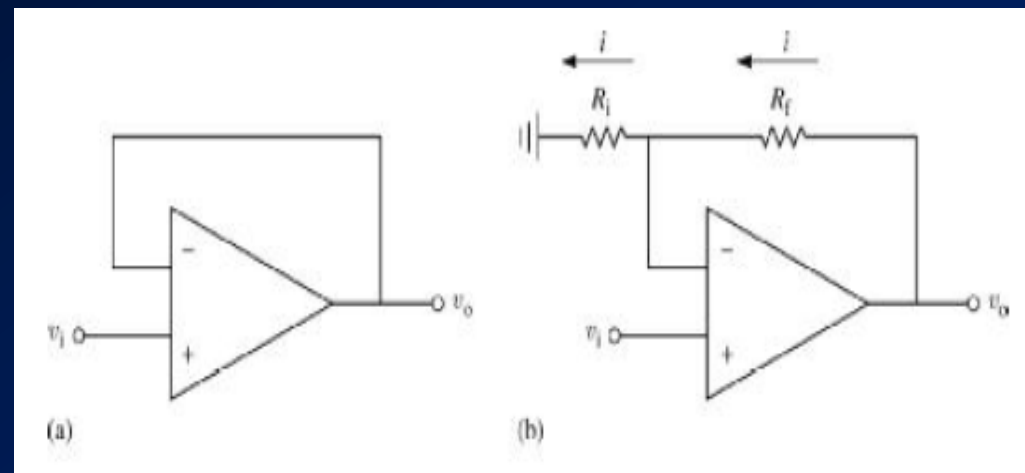
Configurazioni unipolari:

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{R_f}{R_i}$$



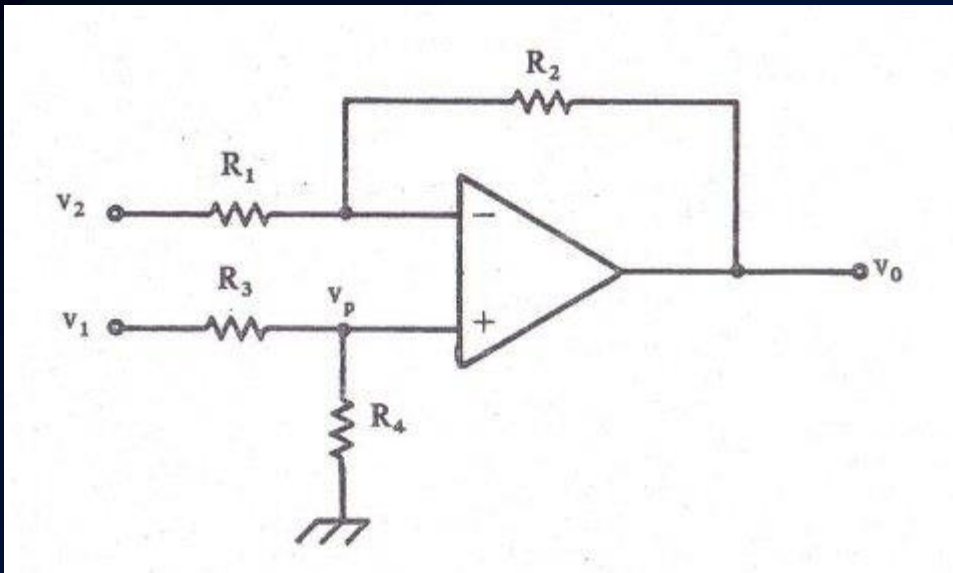
Zin bassa

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{i(R_f + R_i)}{iR_i} = \frac{R_f + R_i}{R_i}$$



Zin elevata

Configurazione differenziale:



$$V_2 = V^-$$
$$V_1 = V^+$$

CMRR elevato

MA

Zin NON elevata

Sovrapposizione effetti:

$$V_o = -R_2/R_1 * V_2 + R_4/(R_3 + R_4) * (1 + R_2/R_1) * V_1$$

$$\text{Se } R_2/R_1 = R_4/R_3 \Rightarrow V_o = (V_1 - V_2) * R_2/R_1 \Rightarrow \text{CMRR} \Rightarrow \infty$$

considerando $V_2 = V_{CM} + V_{DIF}/2$ e $V_1 = V_{CM} - V_{DIF}/2$ cioè $V_o = A_{DIF} * V_{DIF} + A_{CM} * V_{CM}$

si ricavano A_{DIF} e A_{CM}



Configurazione differenziale:

$$A_{DIF} = -\frac{1}{2} \left[\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_4}{R_3} \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_4}{R_3}} \right]$$

$$A_{CM} = \frac{R_4}{R_3} \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_4}{R_3}} - \frac{R_2}{R_1}$$

Se T = tolleranza delle resistenze e K = gain, nella situazione peggiore

$R_{2min}/R_{1max} = K*(1-T)/(1+T)$ e $R_{4max}/R_{3min} = K*(1+T)/(1-T)$,

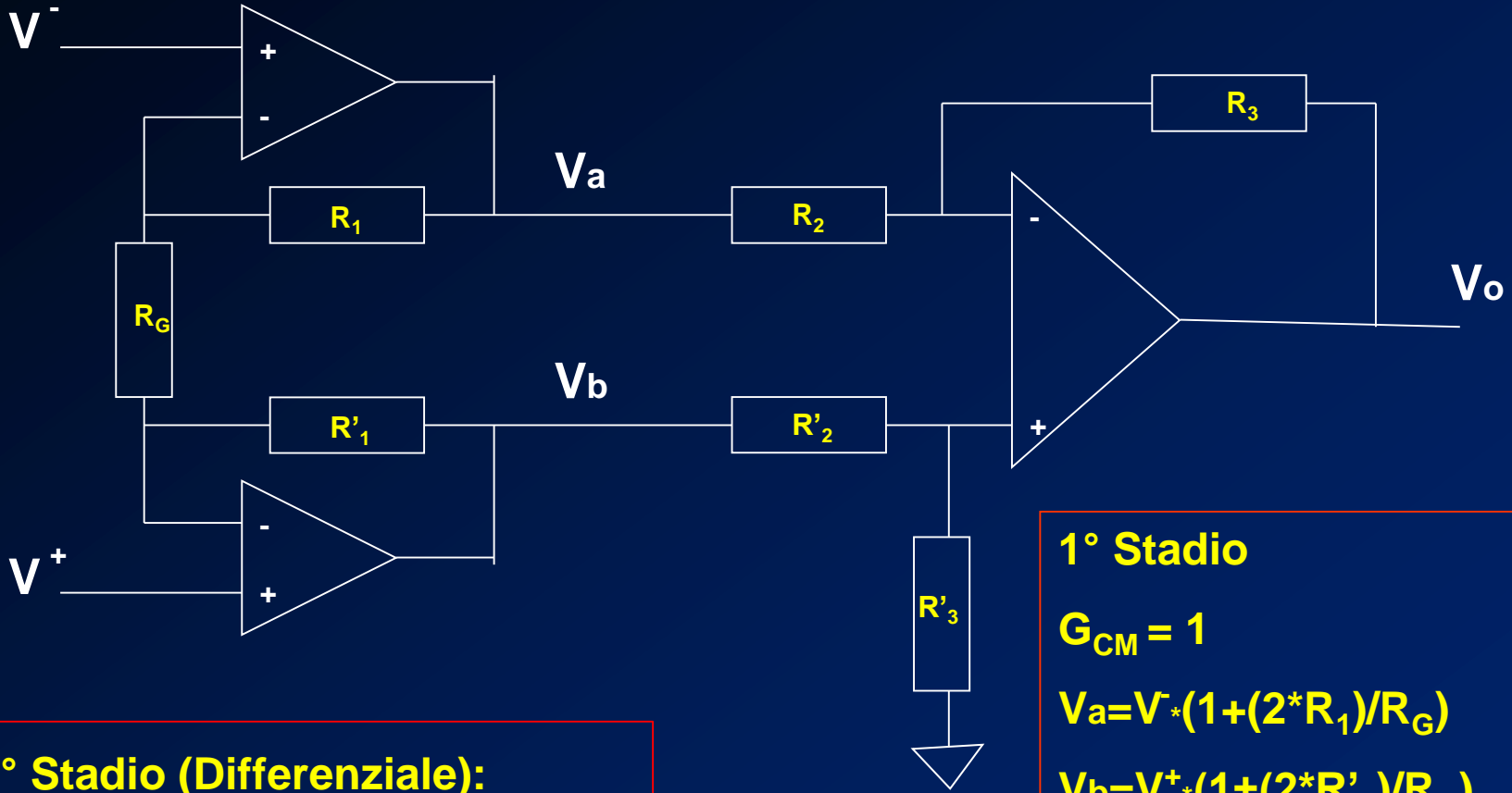
il $CMRR_{min}$ vale: $(1+T^2+K*(1-T^2))/(4*T)$ dipende dal guadagno!

p.es. se $T=0.01$ (1%) e $K=10$ allora $CMRR_{min} = 275 \approx 49dB$!

con $K=100$ $CMRR_{min} = 2525 \approx 68dB$ e con $K=1000 \approx 88dB$ ----

Preamplificatori – Instrumentation Amplifier (2OP, 3OP)

CARATTERISTICHE 3OP: ALTO CMRR ($\approx 100\text{dB}$), ALTA Z_{in} ($10^8\text{-}10^{12}\Omega$)

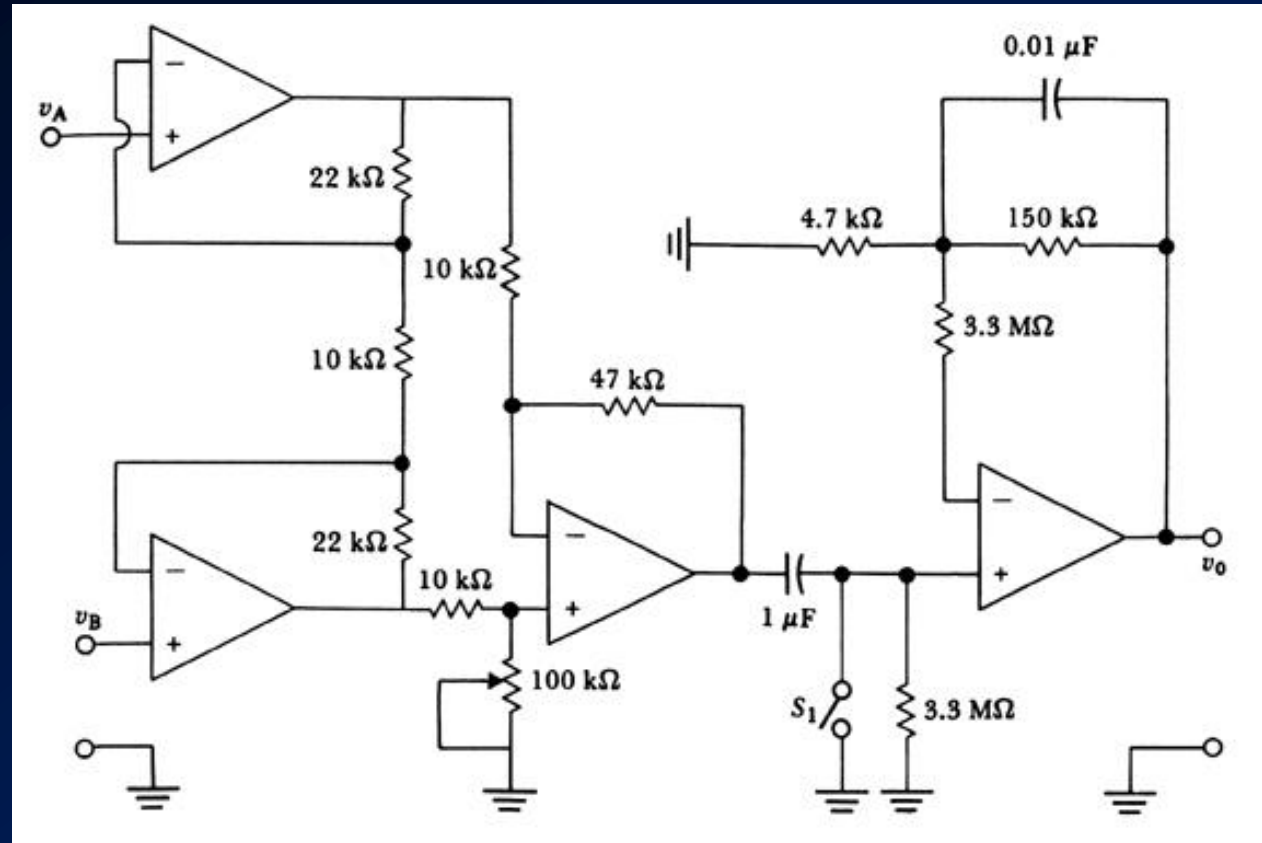


2° Stadio (Differenziale):
 Se $R_3/R_2=R'_3/R'_2$
 $V_o=(V_b-V_a)*R_3/R_2$ $G_{CM_TEOR} = 0$

1° Stadio
 $G_{CM} = 1$
 $V_a=V^-(1+(2*R_1)/R_G)$
 $V_b=V^+(1+(2*R'_1)/R_G)$

Se $R_1=R'_1$
 $G_{DIFF_TOT}=(V^+-V^-)*(1+(2*R_1)/R_G)* R_3/R_2$

Pre-amplificatore



Caratteristiche del pre-amplificatore:

- ✓ basso rumore
- ✓ accoppiato direttamente agli elettrodi
- ✓ bassa corrente di polarizzazione
- ✓ alta impedenza di ingresso

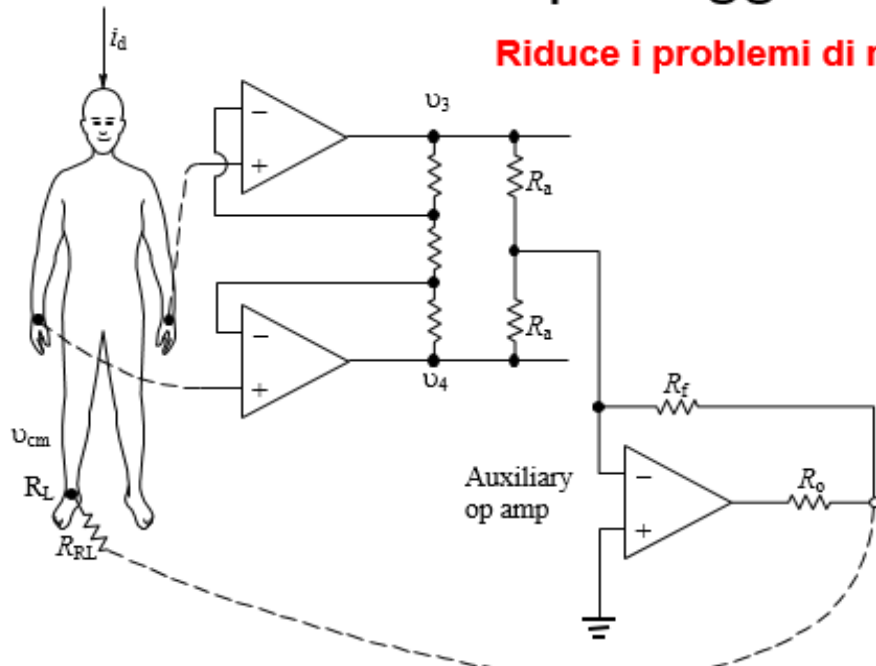
Esercizio.....

Calcolare:

- ✓ CMRR
- ✓ banda
- ✓ guadagno

Circuito di pilotaggio della gamba destra

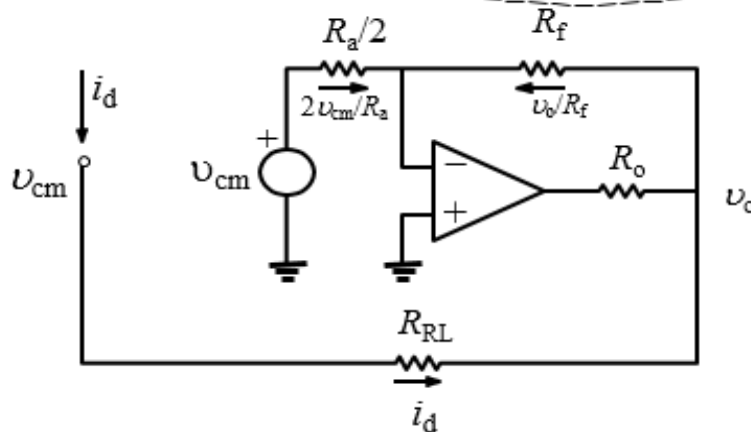
Riduce i problemi di modo comune



$$\frac{2v_{cm}}{R_a} + \frac{v_0}{R_f} = 0$$

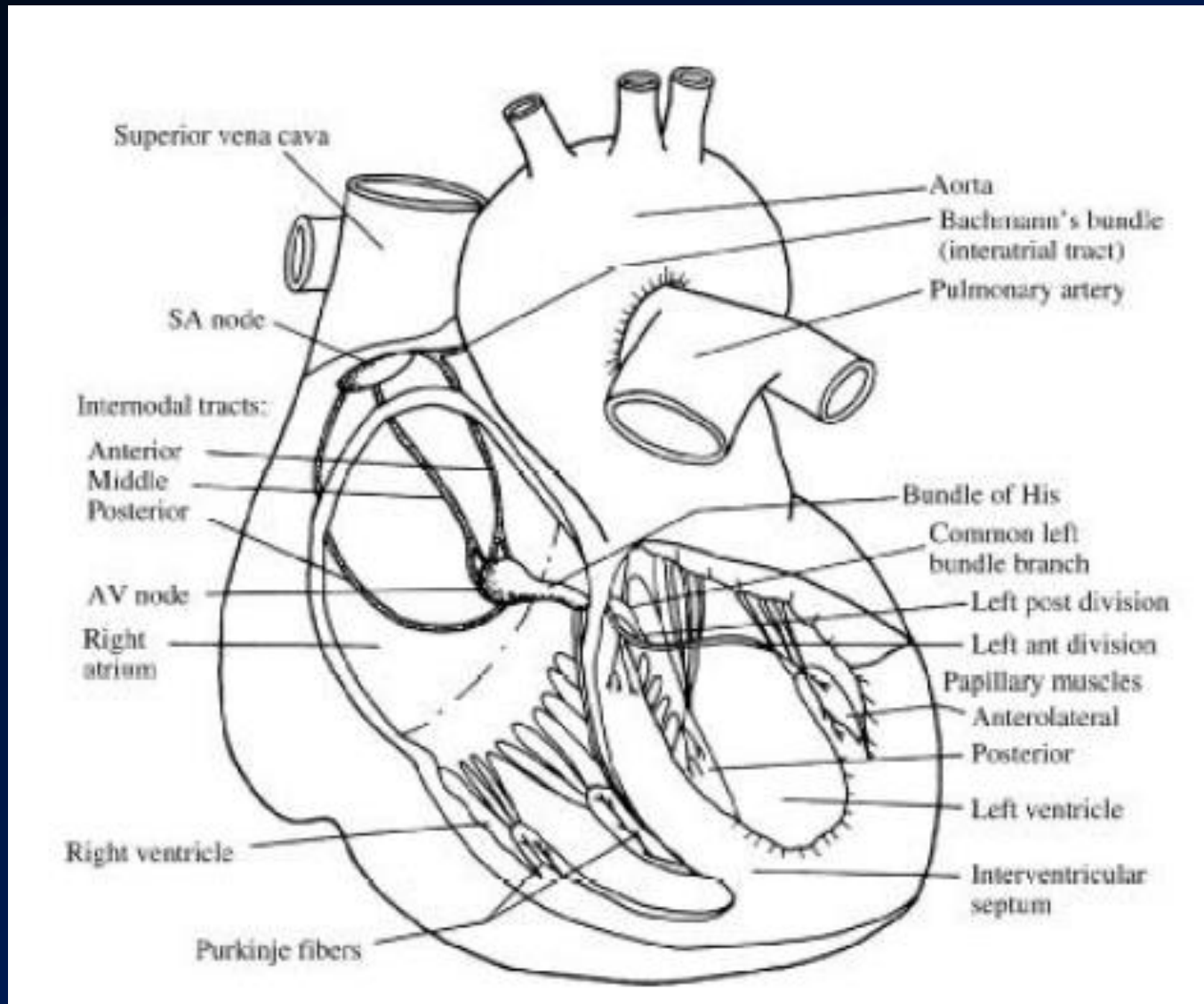
$$v_0 = -\frac{2R_f}{R_a} v_{cm}$$

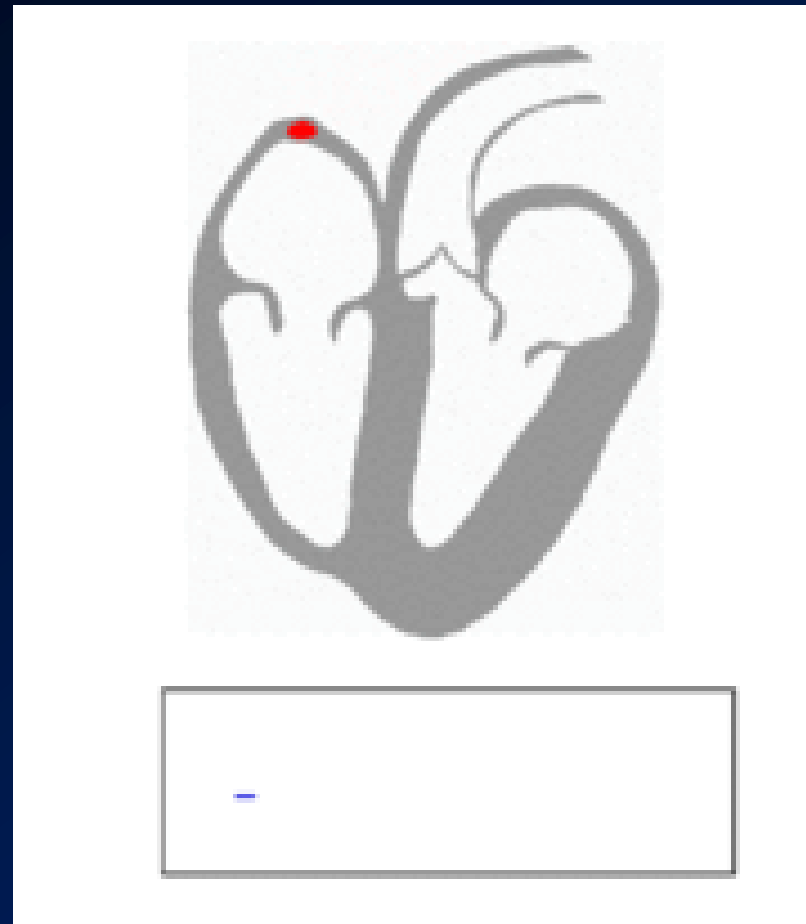
$$v_{cm} = R_{RL} i_d + v_0$$



$$v_{cm} = \frac{R_{RL} i_d}{1 + 2 \frac{R_f}{R_a}}$$

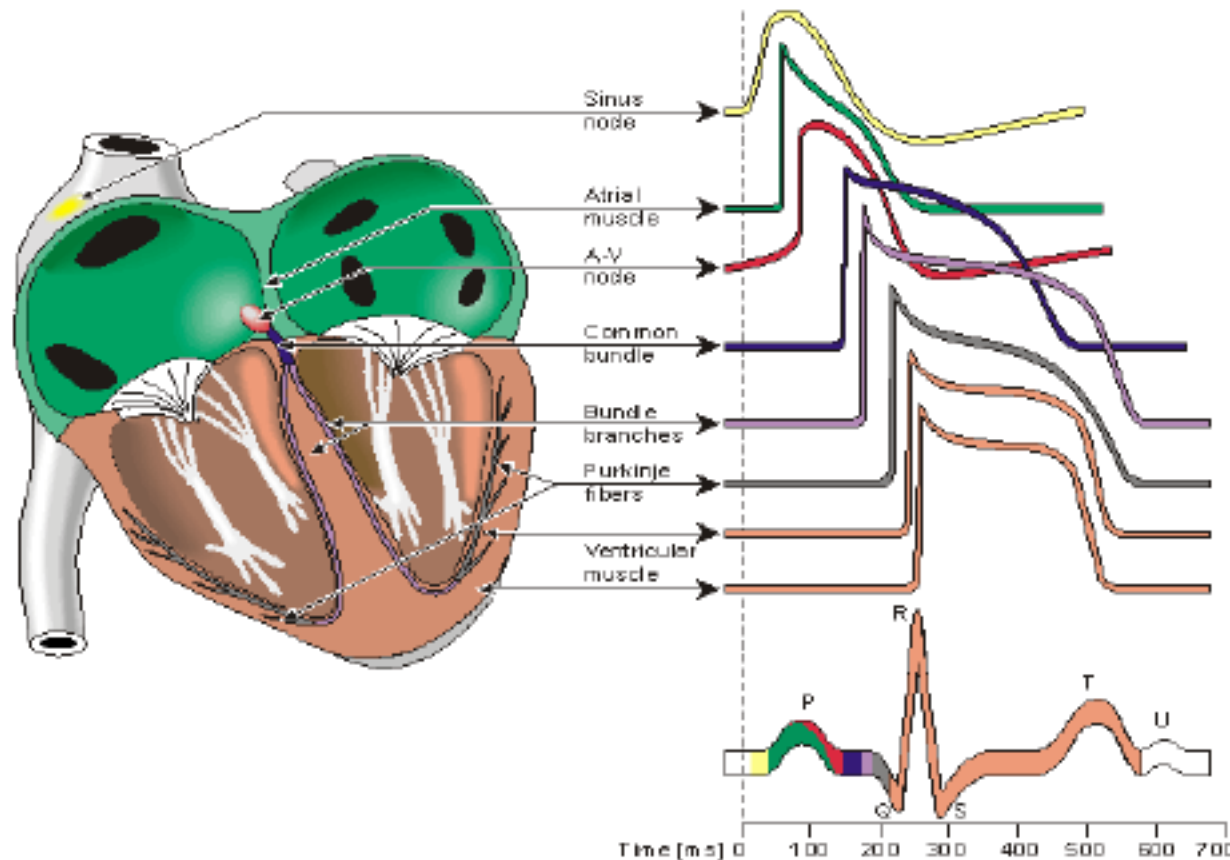
SEGNALI BIOELETTRICI ECG -- ELETTROCARDIOGRAMMA





Risposta cardiaca: complesso PQRST

Potenziale d'azione nel miocardio



Fenomeno Elettrico

1. depolarizzazione
2. ripolarizzazione

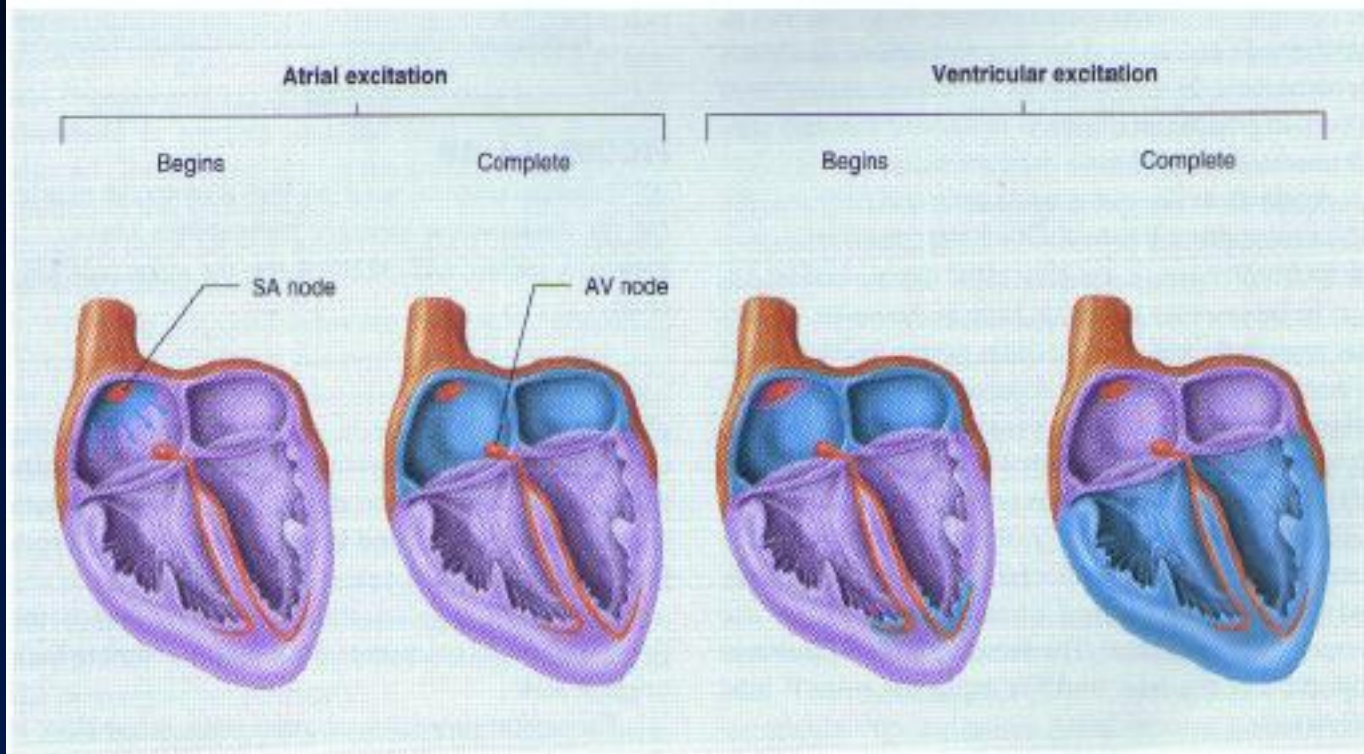


Fenomeno Meccanico

1. sistole (contrazione)
2. diastole (rilassamento)

Risposta cardiaca: complesso PQRST

Sincronizzazione delle fibre cardiache



RITMO CARDIACO (R-R) RITENUTO 'STOCASTICO'

PIU' RECENTEMENTE => CAOTICO DETERMINISTICO

ANALISI HRV (HEART RATE VARIABILITY)

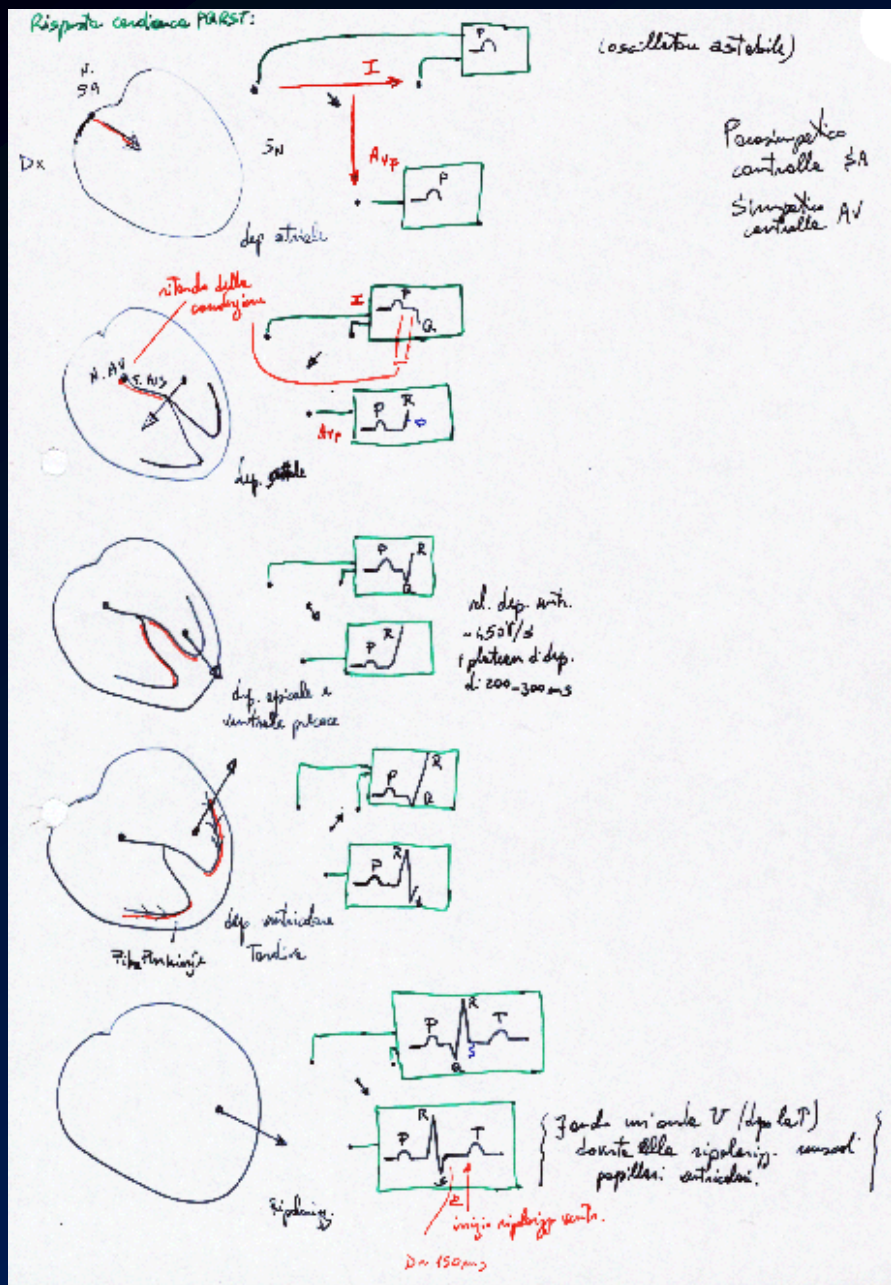
BRACHICARDIA (sonno, alcune patologie)

TACHICARDIA (esercizio fisico, stress, febbre,)

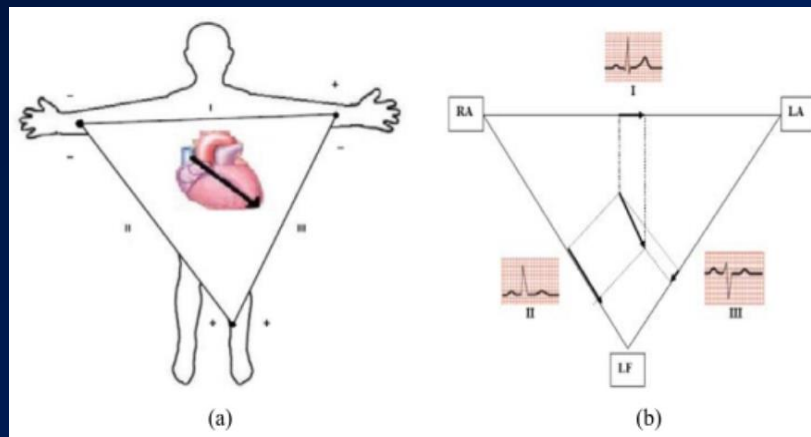
ARITMIE (varie patologie) => ogni punto del cuore può diventare il *pacemaker*

blocco cardiaco/fibrillazione/defibrillazione

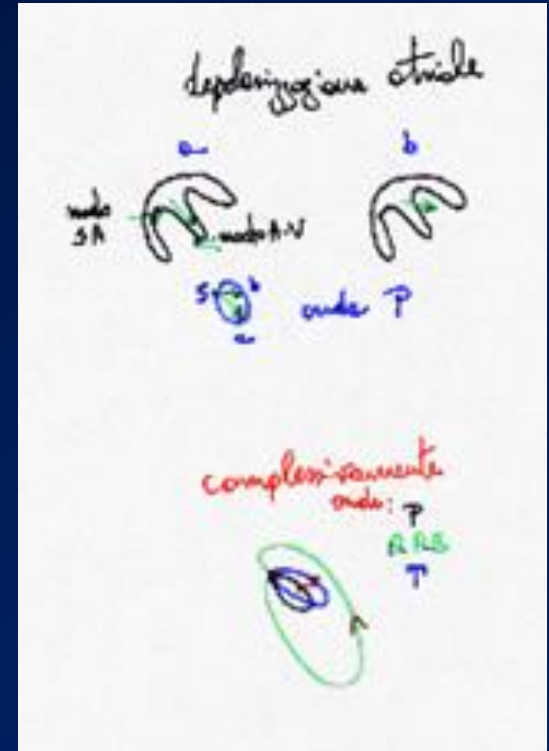
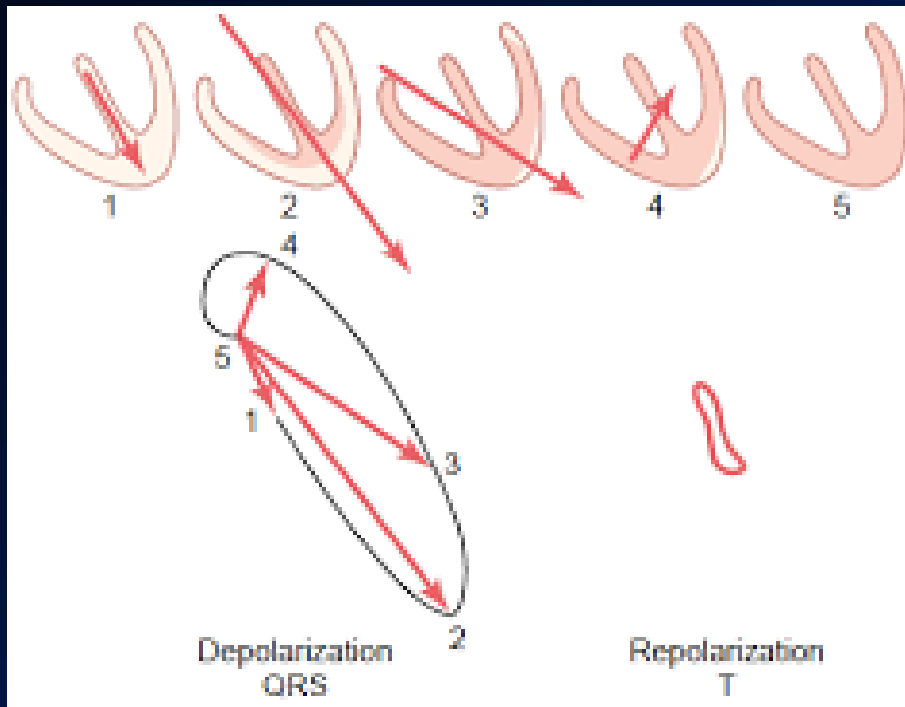
Diagnosi Ischemia Cardiaca e altre patologie



V - ECG



V - ECG



ELETTROCARDIOGRAMMA FETALE (F-ECG) 125-160bpm

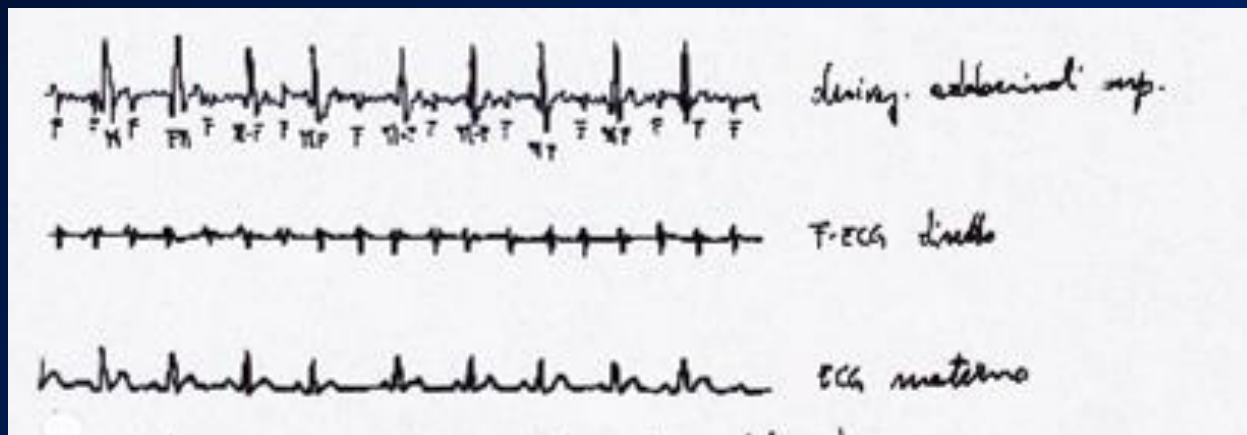
Per identificare tempestivamente ipossia fetale

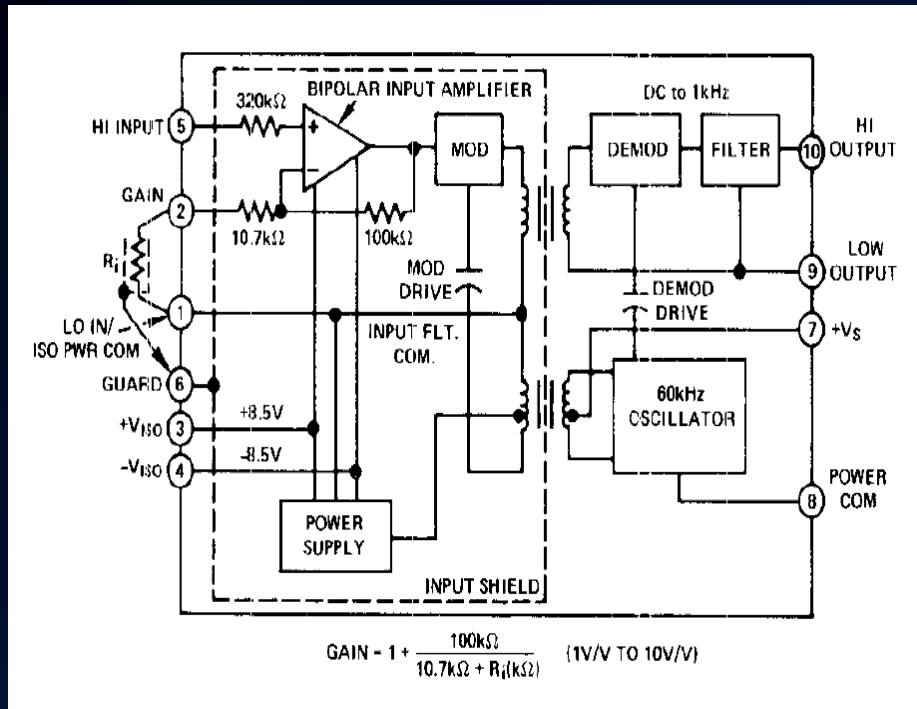
Elettrodi sull'addome della madre, posizionamento per tentativi....

Dall'11a settimana (bene dalla 16a alla 24a -- 4° / 6° mese)

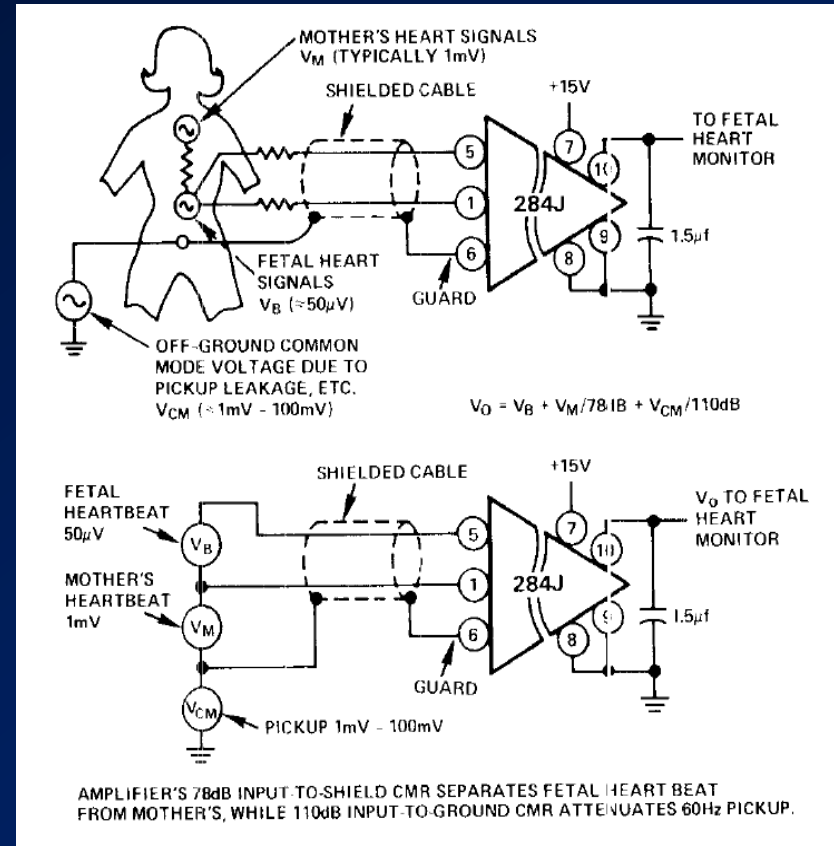
Problemi: coesistenza ECG materno, potenziali d'azione muscolari, forte attenuazione ECG fetale, varia con l'età gestazionale e con la posizione del feto

Si rileva solo il complesso Q-R-S





**ISOLATION AMPLIFIER
AD 284J
Per monitor fetale**



HOLTER ECG per monitoraggio ECG 24h

ANALISI AUTOMATICA DELL'ECG:

- **ACQUISIZIONE**
- **PRE-ELABORAZIONE**
- **ANALISI**
- **CLASSIFICAZIONE**

CARDIOTACOMETRI (per misurare la frequenza cardiaca)

MONITOR CARDIACI

MAPPE CARDIACHE



SEGNALI BIOELETTRICI

EGG -- ELETTROGASTROGRAFIA

POTENZIALI CICLICI DELLO STOMACO, TRASMESSI LUNGO LENTE FIBRE MUSCOLARI CHE PROVOCANO MOVIMENTI LENTI E RITMICI => MESCOLOAMENTO / TRITURAZIONE / MOVIMENTO DEL CIBO

ELETTRODI SUPERFICIALI

0.01 – 0.5 Hz (freq. dominante a 0.05Hz), piccola ampiezza

RIFLESSO GALVANICO DELLA PELLE

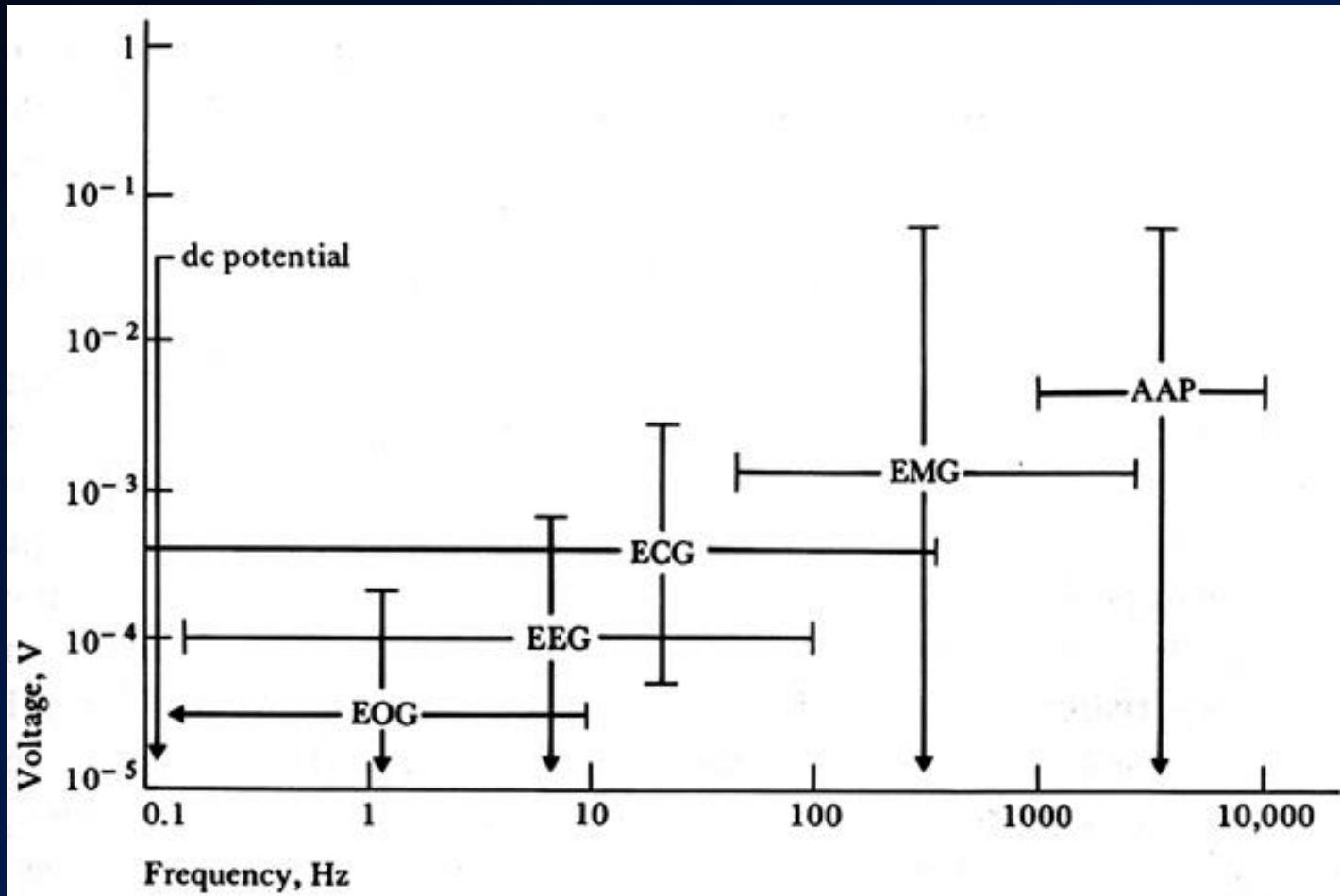
MACCHINA DELLA VERITA'

2 Elettrodi sul palmo (alta concentrazione ghiandole sud.)

1 Elettrodo sul dorso

Amp: < 1 mV, Banda: 0 – 5 Hz

SEGNALI BIOELETTRICI



MISURE DI IMPEDENZA

Bioimpedenza

Tessuti biologici obbediscono alla legge di Ohm (o con Capacità trascurabili) per correnti $< 20\text{mA}$

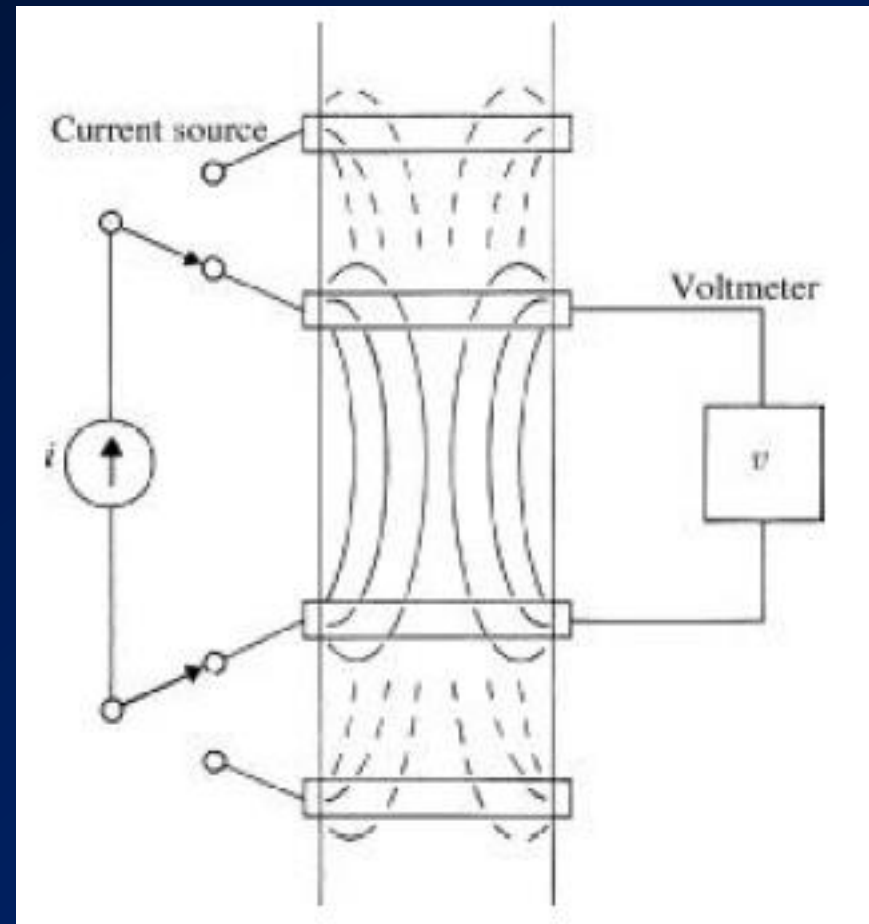
Z varia in funzione di:

- Δ Volume sangue/aria
- Velocità sangue
- Sudorazione

4 elettrodi

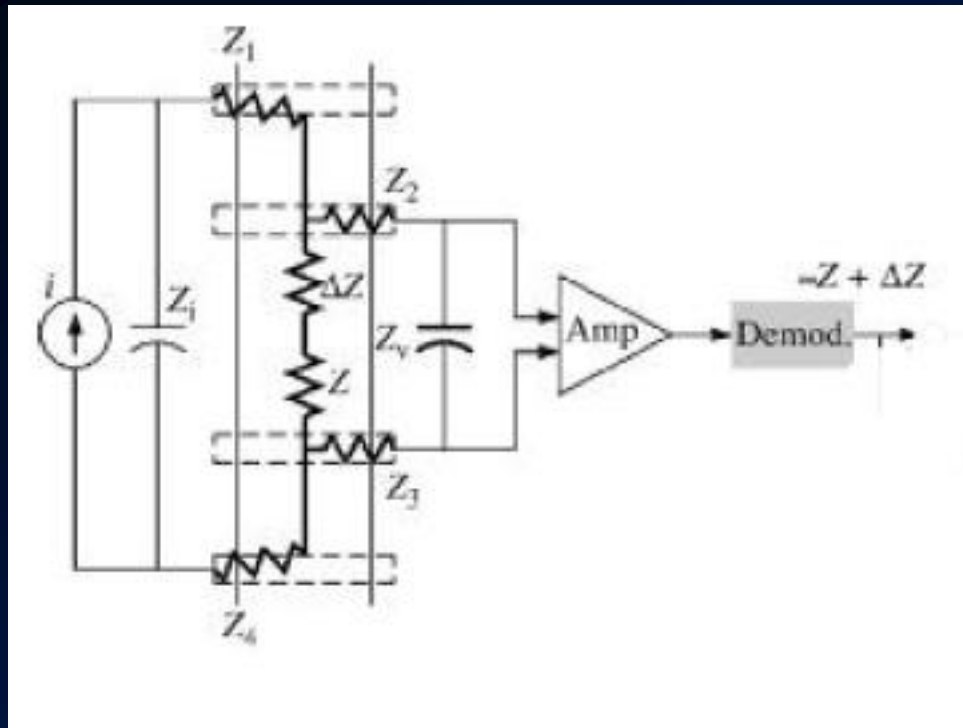
Stimolazione a Corrente costante

- onda quadra simmetrica (per evitare polarizzazione elettrodi)
- 50KHz – 1MHz (per evitare macroshock)



MISURE DI IMPEDENZA

PLETISMOGRAFO A IMPEDENZA



- Non invasivo
- Semplice
- Poco accurato
- Poco costoso

ΔZ dovuta a variazione di Volume

Applicato a dita, arti, torace, ecc. per misurare:

Pulsazione sanguigna,
Volume polmonare,
Volume sangue nei tessuti
per rilevare occlusioni
venose / monitorare ritmo
respiratorio (pneumografo)

Difficoltà di calibrazione
=> monitoraggi relativi e
non assoluti

Ampiezza $\Delta Z \approx 1/1000$ del
segnale di fondo

MISURE DI IMPEDENZA

REOENCEFALOGRAFO:

Elettrodi sullo scalpo

misura variazioni di flusso sanguigno cerebrale – anomalie vascolari

Z intracranica $\approx 100 \Omega$ $\Delta Z \approx 0.1 \Omega$

OCULOGRAFO A IMPEDENZA:

Posizione oculare da misure di impedenza ai lati degli occhi

MISURE DI IMPEDENZA

ELETTROGLOTTOGRAFO:

ΔZ dovuta alla variazione della dimensione della glottide causata dalla vibrazione delle corde vocali

Si usa per misurare il 'pitch'

