



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



DIPARTIMENTO  
DI INGEGNERIA  
DELL'INFORMAZIONE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE  
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA

**BRAIN COMPUTER INTERFACES:  
LA TECNOLOGIA DEI PROSSIMI DECENNI  
DAL SOSTEGNO FUNZIONALE IN MALATTIE NEUROLOGICHE  
A NUOVI ORIZZONTI PER LA MENTE UMANA**

Relatrice: Prof.ssa Mariapia Saccomani

Laureando: Giovanni Chiementin

Corelatore: Dott. Stefano Silvoni

Anno accademico 2021 - 2022  
Data di laurea: 22/09/2022



## Abstract

Lo scopo del seguente elaborato è analizzare l'attuale stato dell'arte delle *Brain Computer Interfaces* (BCIs), ponendo particolare attenzione nel descrivere le differenze tra BCIs invasive e BCIs non invasive approfondendone i rispettivi campi applicativi. Di questi ultimi verranno trattati separatamente gli impieghi clinici e quelli non clinici (ad oggi, l'impiego di BCIs invasive su soggetti sani è limitato all'ambito della sperimentazione animale), analizzando nel dettaglio i più probabili risvolti futuri di questa tecnologia.

Successivamente, si discuteranno tutte le componenti di una BCI, che comprendono la realizzazione fisica dell'apparato, la misurazione ed amplificazione del segnale e l'elaborazione dello stesso.

Si osserverà inoltre quanto fondamentale sia il ruolo dell'intelligenza artificiale al crescere della complessità delle applicazioni: i segnali cerebrali, non seguendo schemi logici predeterminati ma essendo segnali biologici, hanno bisogno di essere tradotti in un linguaggio comprensibile da un elaboratore artificiale. Per l'interpretazione di questi segnali non deterministici bensì stocastici, è quindi necessario l'impiego di tecniche evolute di machine learning.

# INDICE

1	INTRODUZIONE.....	5
2	IL CERVELLO .....	6
2.1	Cenni di anatomia del cervello umano.....	6
2.1.1	Collocazione del cervello .....	6
2.1.2	La corteccia cerebrale.....	7
2.1.3	I neuroni .....	8
2.1.4	Le regioni corticali .....	9
2.1.5	Homunculus .....	10
3	TIPOLOGIE DI BCIs.....	12
3.1	Differenze tra BCIs invasive e BCIs non invasive.....	12
3.2	Perché usare BCIs invasive? .....	14
4	A QUALE SCOPO SERVONO LE BCIs?.....	15
4.1	Impieghi clinici .....	15
4.1.1	Comunicazione alternativa aumentativa .....	15
4.1.2	Recupero delle funzionalità motorie .....	17
4.1.3	Recupero delle funzionalità sensoriali .....	21
4.1.4	Differenze tra Utah Array e <i>Link</i> .....	22
4.2	Altri campi d’impiego .....	24
4.3	Considerazioni etiche .....	26
4.3.1	Siamo già dei “cyborg” .....	26
4.3.2	Problemi etici .....	26
5	MISURAZIONE ED ELABORAZIONE DEI SEGNALI CEREBRALI .....	28
5.1	Elettrodi superficiali .....	28
5.2	Biomateriali compatibili con il cervello per elettrodi intra-cellulari.....	29
5.3	Interpretazione dei segnali - Segnali deterministici e segnali stocastici .....	30
5.4	Ruolo dell’intelligenza artificiale nell’elaborazione dei segnali.....	31
6	CONCLUSIONI.....	32

# 1 INTRODUZIONE

## Che cos'è una Brain Computer Interface?

Una *Brain Computer Interface* è, come suggerisce il nome, un'interfaccia tra il cervello ed un computer.

Le BCIs fanno parte delle più generiche *Human Computer Interfaces* (HCIs).

Stando a questa definizione rientrano tra le HCIs anche le nostre stesse mani che, insieme allo schermo del nostro smartphone o alla tastiera del nostro PC, creano il collegamento che permette ad una nostra intenzione di diventare un'istruzione per una macchina in grado di eseguirla.

La prima ovvia limitazione di questo tipo “primitivo” di interfaccia è che qualora una persona fosse impossibilitata all'utilizzo delle mani, verrebbe meno anche la sua capacità di interagire con un computer.

Una seconda limitazione è dovuta alla velocità con cui riusciamo a trasferire le informazioni (misurabile come quantità di informazione nell'unità di tempo) dalla nostra mente al dispositivo esterno.

Per ovviare a questi due problemi è possibile implementare, tramite una vasta gamma di tecnologie, dei dispositivi in grado di leggere ed interpretare delle intenzioni senza il bisogno che queste si manifestino attraverso il movimento di qualche parte del nostro corpo.

Da qui deriva l'accezione più utilizzata del termine BCI, ossia quella che indica un dispositivo in grado di misurare direttamente dei segnali cerebrali, digitalizzarli e trasmetterli ad una macchina che dovrà poi processarli, interpretarli e gestirli.

Nonostante la semplicità con cui viene presentato questo problema (dopotutto siamo abituati a collegare vari apparati tramite l'utilizzo di fili), il cervello ed il computer utilizzano segnali di natura totalmente diversa. Mentre con i segnali digitali abbiamo una grandissima familiarità (siamo stati noi ad inventarli e quindi a definirne le regole), i segnali biologici, come quelli cerebrali, necessitano di un'interpretazione continua, in quanto non c'è una corrispondenza univoca tra pensiero e segnale cerebrale; non basta quindi comprendere il significato di un segnale una volta per poi tradurre tutte le occorrenze successive.

## 2 IL CERVELLO

Il cervello è l'organo principale del sistema nervoso centrale.

Il cervello si occupa di parte della regolazione delle funzioni vitali ed è sede delle regolazioni omeostatiche e delle funzioni cerebrali superiori.

Nell'uomo l'attività del cervello, studiata dalle neuroscienze, dà vita alla mente con le sue funzioni cognitive superiori e più in generale alla psiche con le sue funzioni psichiche, studiate nell'ambito della psicologia e della psichiatria.<sup>i</sup>

Per la tecnologia discussa nel seguente elaborato è di particolare interesse comprendere il funzionamento del cervello a basso livello, al fine di poter sia rilevarne i segnali ed elaborarli, sia mimarli per stimolarlo.

### 2.1 Cenni di anatomia del cervello umano

#### 2.1.1 Collocazione del cervello

Il cervello occupa lo spazio racchiuso nella scatola cranica (o neuroencefalo), una struttura scheletrica composta prevalentemente da ossa piatte con lo scopo di sostenere e proteggere questo delicato organo di consistenza gelatinosa.

Frapposti tra il cervello e le ossa del cranio vi sono vari strati tissutali che fanno da membrana (Figura 1): le meningi (dura madre, aracnoide e pia madre), che formano un triplo strato protettivo. Tra aracnoide e pia madre è incluso lo spazio subaracnoideo in cui scorre il fluido cerebrospinale prodotto dal plesso corioideo localizzato nelle cavità del cervello.

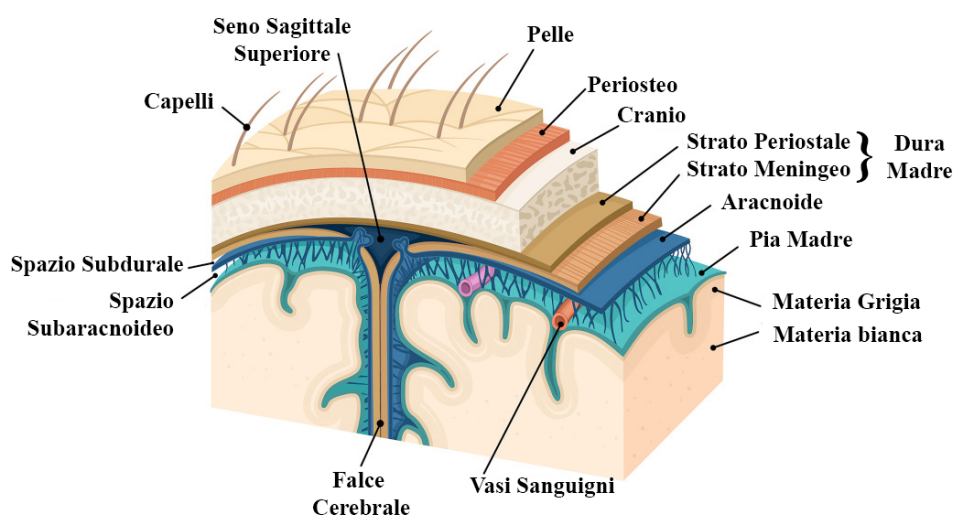


Figura 1: Rappresentazione di una sezione cerebrale con i suoi strati tissutali di protezione.

### 2.1.2 La corteccia cerebrale

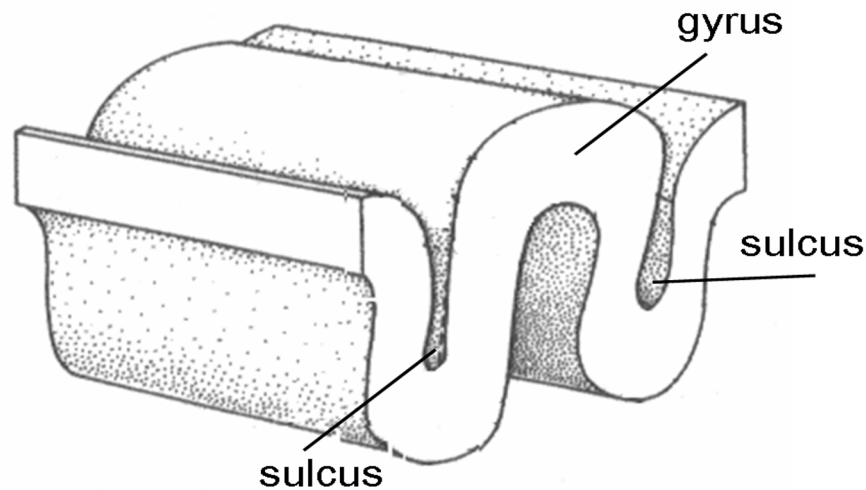
La corteccia cerebrale è uno strato laminare continuo che rappresenta la parte più esterna del cervello. Formata dai neuroni, dalla glia e da fibre nervose senza mielina e con uno spessore di circa 2–4 mm, alla corteccia cerebrale umana si devono le capacità sensoriali, motorie e percettive, la memoria e le funzioni che chiamiamo superiori (linguaggio, coscienza, capacità logica, previsione delle conseguenze delle azioni, creatività e così via); capacità e funzioni che permettono la miglior adattabilità della nostra specie all'ambiente e rappresentano la base della cultura dell'uomo.<sup>ii iii</sup>

Essa è sostenuta dalla sostanza bianca, la quale contiene diversi elementi, tra cui assoni mielinici in grandi quantità, cellule della glia appartenenti alla tipologia degli oligodendrociti e astrociti e vasi capillari.

Quest'ultima è priva di neuroni; infatti, l'attività neuronale si svolge unicamente nella corteccia.<sup>iv</sup>

Per questa ragione, le BCIs si interfacciano unicamente con la corteccia cerebrale.

Essendo la corteccia una struttura bidimensionale, maggiore è la superficie che ricopre maggiore è il numero di neuroni in essa contenuti e quindi maggiore la capacità di svolgere attività cerebrale. Per questo motivo la corteccia umana presenta un'accentuata alternanza tra profonde scanalature dette solchi e creste denominate circonvoluzioni o giri (Figura 2). Ciò permette alla corteccia di coprire, a parità di volume cerebrale, un'area superficiale drasticamente maggiore rispetto a quella di un cervello in cui questa struttura è meno evidente.



*Figura 2: Le convoluzioni cerebrali formate da giri e solchi permettono di aumentare drasticamente la superficie disponibile.*

### 2.1.3 I neuroni

Il neurone è una cellula altamente specializzata per la raccolta, l'elaborazione e la conduzione degli impulsi nervosi e rappresenta l'unità funzionale del sistema nervoso. La trasmissione di impulsi nervosi sia eccitatori che inibitori avviene tramite lo spostamento di ioni  $\text{Na}^+$  dall'esterno all'interno della membrana dell'assone (ossia il prolungamento principale della cellula nervosa). Questo spostamento di ioni crea un potenziale d'azione centrifugo, che si allontana quindi dal corpo del neurone avvicinandosi ai terminali assonici dove provoca, in seguito alla depolarizzazione, un ingresso di ioni  $\text{Ca}^+$ . Questi stimolano a loro volta l'esocitosi di neurotrasmettitori e quindi il loro rilascio nella fessura sinaptica.

Successivamente queste molecole si legano a specifici recettori presenti nei dendriti del neurone a valle della fessura sinaptica di interesse, determinando nello stesso potenziali post-sinaptici iperpolarizzanti o depolarizzanti.

Nel neurone post-sinaptico si formerà un nuovo potenziale d'azione solo se la somma pesata (integrazione) di segnali depolarizzanti e iperpolarizzanti provenienti da diverse sinapsi raggiunge un certo valore di soglia.

Un insieme organizzato di queste cellule forma strutture chiamate reti neurali, ciascuna con una propria funzione fisiologica.

Le reti neurali sono strutture dinamiche, la cui potenza ed efficienza è da attribuire al numero di connessioni sinaptiche all'interno delle stesse.

La quantità di queste connessioni aumenta con il ripetuto stimolo della rete neurale. Da questo principio emerge la capacità di apprendimento del cervello.

L'implementazione di una BCI rende possibile intercettare i segnali elettrici all'interno di una rete neurale per estrarne dei pattern e carpirne l'informazione; pattern che, sempre grazie alla stessa tecnologia, si possono emulare stimolando il cervello con il suo stesso "linguaggio". È attraverso questo principio che è possibile simulare sensazioni tattili, visive, uditive e più in generale simulare la moltitudine di sensazioni afferenti che ci permettono di percepire la realtà che ci circonda.



## 2.1.4 Le regioni corticali

Una caratteristica del cervello che rende possibile l'implementazione di BCIs di dimensioni ridotte è la sua suddivisione in aree funzionali dette regioni corticali. In prima approssimazione, reti neurali con compiti affini sono raggruppate in aree affini. Da un punto di vista evolutivo, questo comporta una maggiore efficienza del cervello, rendendo questo tipo di configurazioni favorite rispetto a configurazioni più caotiche. È possibile individuare 12 distinte regioni corticali e le loro principali funzioni (Figura 3):

- corteccia prefrontale: emozioni e risoluzione di problemi;
- corteccia motoria associativa: coordinazione dei movimenti complessi;
- corteccia motoria primaria: inizio movimenti volontari;
- corteccia somatosensoriale primaria: riconoscimento informazioni sensitive;
- corteccia sensoriale associativa: elaborazione informazioni sensitive;
- corteccia visiva associativa: elaborazione delle informazioni visive;
- corteccia visiva: riconoscimento di stimoli visivi semplici;
- area di Wernicke: comprensione del linguaggio;
- corteccia uditiva associativa: elaborazione delle informazioni uditive;
- corteccia uditiva: riconoscimento delle qualità dei suoni (volume, tono);
- corteccia inferotemporale: elaborazioni legate alla memoria;
- area di Broca: produzione del linguaggio.<sup>v</sup>

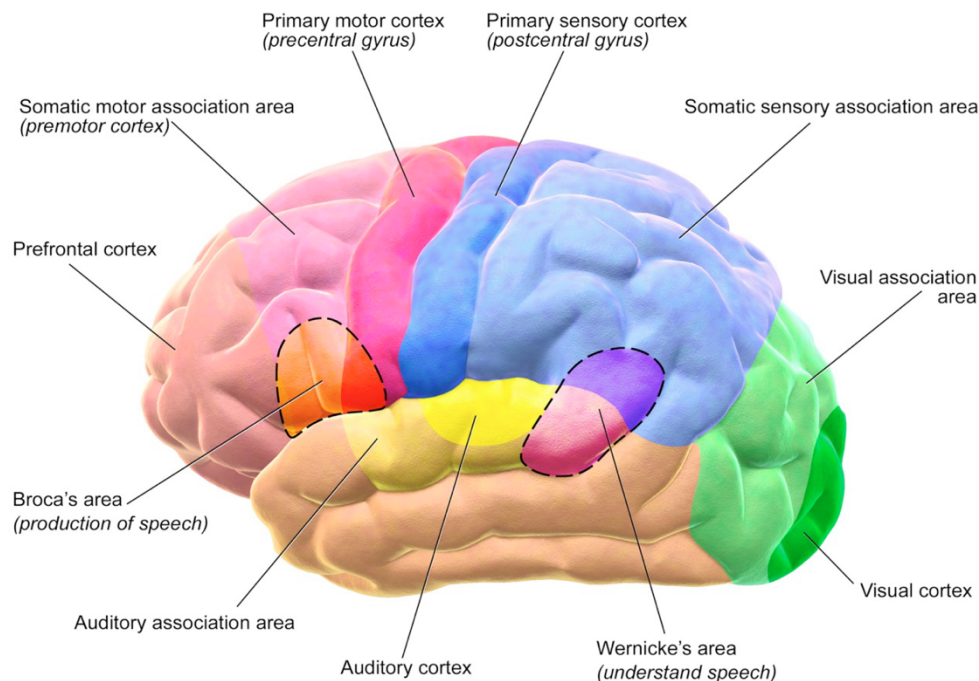


Figura 3: Rappresentazione della suddivisione del cervello in regioni corticali (nella figura non è indicata la corteccia inferotemporale in quanto non presente in questa specifica proiezione).

Le regioni corticali sono a loro volta suddivise in zone a maggior specificità. Insieme alla corteccia uditiva ed alla corteccia visiva, di particolare interesse per le BCIs sono le corteccie somatosensoriale primaria e motoria primaria, in quanto sono le regioni in cui avviene l'attività "più semplice" del cervello (al giorno d'oggi è difficile poter decodificare segnali neuronali relativi ad un pensiero complesso o un'emozione tramite un sistema digitale, per questo motivo studi riguardo l'applicazione di BCIs alla corteccia prefrontale, per esempio, sono molto limitati: in particolare si riescono a studiare pensieri specifici e ripetibili come il calcolo aritmetico<sup>vi</sup>).

La relativa facilità con cui è possibile interfacciarsi con la corteccia motoria e somatosensoriale è comprensibile vedendo come sono mappate le varie zone. Da questa semplificazione è nato Homunculus.

### 2.1.5 Homunculus

*Homunculus* corticale è una rappresentazione del corpo umano in cui le proporzioni di ogni parte del corpo sono in funzione della sensibilità (*Homunculus* somatosensoriale) o della motricità (*Homunculus* motorio) della stessa (Figura 4).

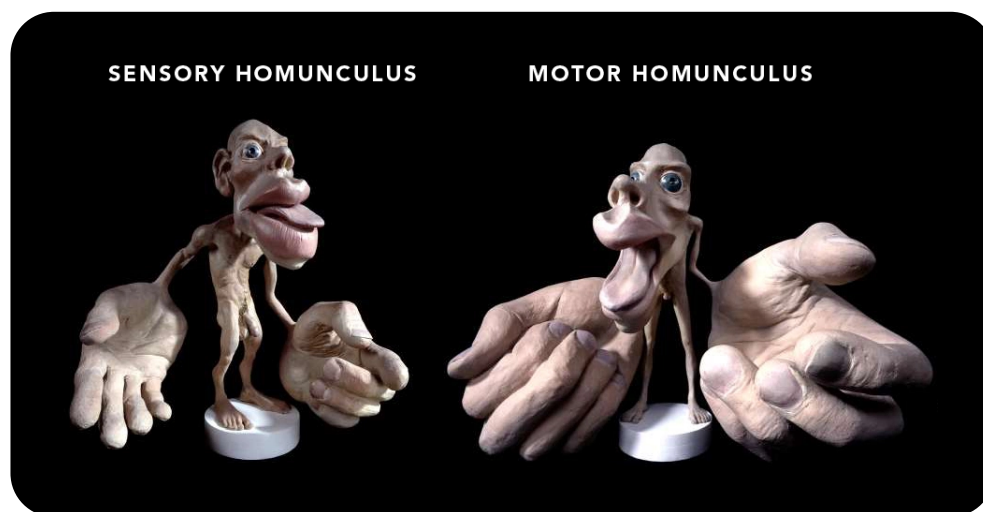


Figura 4: *Homunculus*, le dimensioni relative delle parti del corpo sono in proporzione alla quantità di superficie corticale (rispettivamente motoria e somatosensoriale) ad essa collegate.

L'accentuata sensibilità o motricità di una parte del corpo sono direttamente correlate ad una maggiore estensione della zona ad essa collegata, rispettivamente nella corteccia somatosensoriale o motoria.

Lo stesso concetto è possibile esprimerlo guardando una sezione del cervello in corrispondenza delle cortecce somatosensoriale e motoria (Figura5).

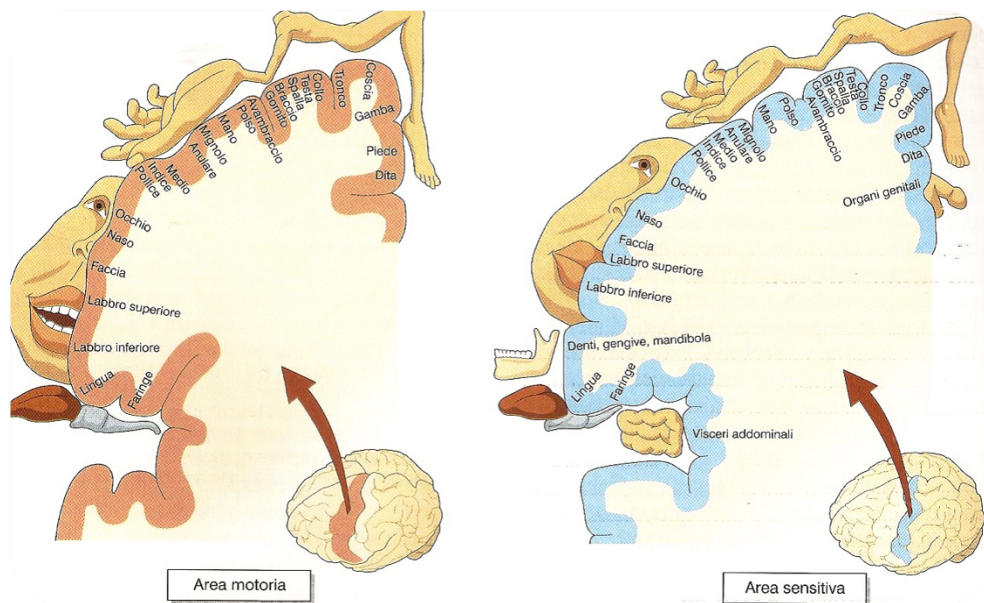


Figura 5: Lo stesso concetto di Homunculus ma con un riscontro diretto delle dimensioni delle regioni corticali.

Confrontando *Homunculus* in Figura 4 con la corrispettiva mappatura corticale è facile vedere come le distorte proporzioni del manichino rispecchino la dimensione relativa della zona corticale corrispondente.

In relazione alle BCIs, queste immagini fanno capire quanto sia importante il corretto posizionamento degli elettrodi sulla base della specifica applicazione, e permettono anche di capire per quale motivo le BCIs invasive siano l'unica strada percorribile se si vuole avere sufficiente definizione spaziale (vedi Figura 9).

### 3 TIPOLOGIE DI BCIs

#### 3.1 Differenze tra BCIs invasive e BCIs non invasive

##### BCIs non invasive

Questo tipo di interfaccia offre la possibilità di leggere l'intenzione del paziente senza dover ricorrere ad operazioni invasive sullo stesso.

L'intenzione del paziente può essere misurata in diversi modi: registrando il movimento di alcuni muscoli, registrando dei segnali elettrici prodotti dal corpo, registrando la presenza ed intensità di attività metaboliche in alcune aree del cervello.

La misurazione di movimenti muscolari può avvenire sia tramite rilevatori meccanici quali pulsanti (questi possono, per esempio, registrare il movimento delle dita su una tastiera o un selettore binario) sia tramite rilevatori ottici di movimento di muscoli facciali o oculari. Per esempio, sia per scrivere che per parlare Stephen Hawking utilizzava un sensore ad infrarossi in grado di misurare movimenti del mento con i quali poteva scegliere la successione di lettere da utilizzare.

La misurazione di segnali elettrici cerebrali può avvenire in due modi:

- Per applicazioni di protesi robotiche in cui il computer, implementato direttamente nella protesi stessa, ha la sola funzione di trasformare la volontà di movimento del paziente in movimento effettivo dell'arto artificiale, si può utilizzare l'attività elettromiografica di superficie (EMG) dei muscoli interessati. Nell'esempio di una protesi robotica della mano, saranno di particolare interesse i segnali elettrici provenienti dai muscoli dell'avambraccio deputati all'apertura e chiusura delle singole dita, ai quali l'interfaccia farà corrispondere dei movimenti coerenti nella mano robotica;
- Per applicazioni meno specifiche è possibile misurare l'attività elettrica cerebrale attraverso degli elettrodi posti sullo scalpo. Tale misurazione è nota come elettroencefalogramma (EEG) ed è la tecnologia ad oggi più usata nell'ambito delle BCIs non invasive.

La misurazione di attività metaboliche del cervello è possibile implementando un sistema basato sulla spettroscopia del vicino infrarosso (*Near InfraRed Spectroscopy*, NIRS). Questo dispositivo utilizza radiazioni luminose nel vicino infrarosso (700-950nm) per rilevare il livello di ossigenazione dell'emoglobina nella zona cerebrale di interesse. L'ossigenazione dell'emoglobina è indicativa dell'assorbimento di ossigeno da parte dei tessuti, e quindi del livello di attività cellulare negli stessi.

L'interfaccia che utilizza il segnale EEG è la più semplice da realizzare e da implementare in quanto consiste in una cuffia di elettrodi da posizionare sullo scalpo. Il segnale rilevato da questi elettrodi interessa l'intera superficie cerebrale ed è originato dall'attività di moltissimi neuroni i cui impulsi elettrici si combinano e, passando attraverso i vari strati che separano il cervello dal cuoio capelluto, risultano misurabili sulla superficie dello stesso.

Questo segnale andrà poi opportunamente elaborato e sarà quindi utilizzabile a seconda delle necessità.

Nel momento in cui tramite una semplice cuffia elettroencefalografica è possibile misurare ed interpretare l'attività cerebrale, sorge spontanea la domanda: come mai allora le BCIs invasive sono sempre più oggetto di studio?

Una risposta intuitiva la si può trovare nel sito di Neuralink, azienda leader nel settore delle BCIs invasive:

*“L'attività cerebrale può essere monitorata dall'esterno della testa usando tecniche non invasive come l'EEG. Con queste tecniche, ogni canale registra la combinazione delle attività di milioni di neuroni, il che comporta una vera e propria sfocatura dei dettagli derivanti dai singoli neuroni. Immaginate di assistere ad un evento sportivo attraverso le sole informazioni derivanti da un microfono posizionato all'esterno dello stadio. Dalle grida della folla si può capire quando è in corso una buona azione della squadra che gioca in casa o quando la stessa subisce un punto, ma sarebbe estremamente difficile comprendere se questa ha segnato un punto o ha fatto un grande gioco difensivo.*

*Inoltre, sarebbe sicuramente impossibile sentire cosa dice ogni singolo individuo a proposito della partita.*

*Lo stesso vale per la registrazione dell'attività cerebrale: registrazioni fatte a distanza forniscono alcune informazioni utili e ad alto livello, ma per accedere ad informazioni più dettagliate bisogna essere vicini alla sorgente. Ciò significa registrare il potenziale d'azione, o picchi di voltaggio, dei singoli neuroni.*

*Attualmente ciò può essere fatto soltanto inserendo degli elettrodi all'interno del cervello.”<sup>vii</sup>*

## **BCIs invasive**

Questo tipo di interfaccia basa il suo funzionamento sull'inserimento di micro-elettrodi direttamente nella corteccia cerebrale.

Nonostante il grandissimo vantaggio di poter leggere l'attività di piccoli cluster di neuroni o addirittura di neuroni singoli, questo secondo tipo di interfaccia ha due grandi svantaggi:

- richiede un'operazione neurochirurgica, con tutte le possibili complicazioni del caso;
- limita l'acquisizione di segnali neuronali alla sola zona in cui viene fatto l'impianto e ai singoli cluster di neuroni vicino ai quali viene posizionato il micro-elettrodo.

Il fatto che si riesca a misurare con così grande dettaglio l'attività cerebrale del paziente, può rendere possibile l'implementazione di tecnologie altrimenti difficilmente realizzabili con le metodologie attuali.

Prendiamo l'esempio di un paziente paralizzato agli arti inferiori a causa di lesioni al midollo spinale (e conseguente interruzione della comunicazione neuronale tra il cervello e le parti periferiche del corpo): andando a misurare con elevatissima definizione spaziale l'attività elettrica dei neuroni deputati al controllo dei muscoli delle gambe, è possibile comprimere e inviare le informazioni relative all'intenzione di movimento ad un trasduttore posto a valle dell'interruzione neuronale con il compito di stimolare i motoneuroni in modo analogo a quanto sarebbe successo se l'interruzione non ci fosse stata. Così facendo anche la minima intenzione di movimento si tradurrebbe in movimento effettivo dell'arto interessato, permettendo al paziente di tornare ad utilizzare le proprie gambe.

Nella seguente immagine (Figura 6) è possibile vedere con che accuratezza una BCI invasiva riesca a prevedere il movimento dell'arto:

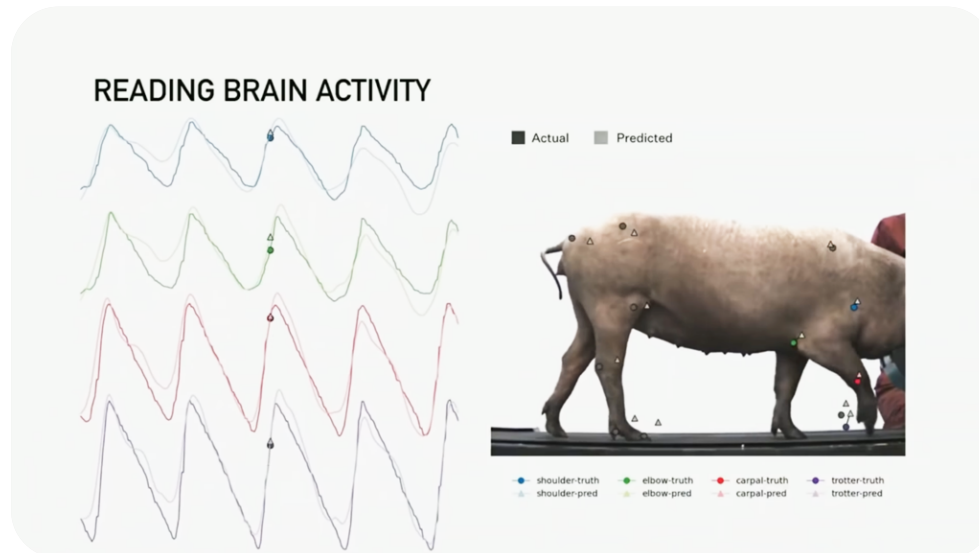


Figura 6: Gertrude, un maiale con un impianto Neuralink cammina su un tapis roulant. I cerchi raffigurano la posizione effettiva dell'arto, i triangoli rappresentano la posizione stimata in seguito alla misurazione ed interpretazione dei segnali neurali provenienti dalla corteccia motoria.

### 3.2 Perché usare BCIs invasive?

Il tipo di applicazione descritta nel paragrafo precedente, in cui si vuole proiettare con precisione la posizione desiderata dell'arto, è semplicemente impossibile utilizzando un BCI non invasiva, in quanto la risoluzione spaziale è troppo grossolana.

Sarebbe come voler rappresentare l'informazione contenuta in un intero libro con un'immagine grigia il cui colore è la media tra il colore della superficie bianca e quello della superficie coperta dall'inchiostro, perdendo quindi qualsiasi informazione relativa a posizione e quantità di ciascun carattere.

Un'altra possibilità che si apre quando si considerano elettrodi direttamente impiantati nella corteccia, è quella di poter utilizzare attivamente questi elettrodi per stimolare il neurone o i neuroni ai quali sono vicini, permettendo così un meccanismo di input cerebrale alternativo a quelli già esistenti, altresì impossibile.

In questo modo si può simulare degli stimoli sensoriali in pazienti in cui il meccanismo di acquisizione e/o trasporto di questi stimoli è compromesso (vedi paragrafo 4.1.3).

Opportunità così rivoluzionarie giustificano quindi, all'occorrenza, l'invasività della tecnologia.

## 4 A QUALE SCOPO SERVONO LE BCIs?

### 4.1 Impieghi clinici

#### 4.1.1 Comunicazione alternativa aumentativa

Quando si parla di comunicazione tra esseri umani, un importantissimo parametro a cui bisogna fare riferimento è la quantità di informazione nell'unità di tempo (baud-rate), la quale misura la velocità a cui si possono inviare unità di informazioni.

Per la comunicazione verbale questa unità informativa è la parola, quindi la baud-rate di una normale conversazione orale è mediamente di 130-140 parole al minuto (WPM, dall'inglese *Words Per Minute*), mentre quando scriviamo questo valore scende a circa 50 WPM.

Quando una persona non è più in grado di parlare o di scrivere, comunicare diventa estremamente difficile a causa del drastico abbassamento della baud-rate.

Nell'esempio di pazienti con diagnosi di SLA, lo stato di Locked-In State (LIS) indica una totale incapacità di muovere i muscoli volontari eccezion fatta per alcuni muscoli facciali e quelli oculomotori. Per tali pazienti la comunicazione può avvenire tramite segnali binari (sì – no, dipendentemente dal movimento delle palpebre) o attraverso sistemi di tracciamento oculare in cui il paziente deve spostare lo sguardo su zone di interesse (Figura 7). Questi metodi possono essere accoppiati con delle speciali tabelle che permettono di selezionare un carattere per volta e quindi comporre parole e frasi.



Figura 7: Un bambino utilizza una tabella E-Tran per comunicare con i suoi interlocutori.

Con questo metodo la *baud-rate* si aggira sulle 2-4 WPM, certamente preferibile al non poter comunicare affatto, ma ben lontano dai comuni standard di comunicazione.

Tramite l'implementazione di una BCI basata sull'EEG, questo processo può diventare molto più efficiente, in quanto anziché aspettare il movimento oculare del paziente, è sufficiente registrare la P300, un segnale elettroencefalografico che si registra 300ms dopo uno stimolo al quale è stato attribuito uno specifico significato (per esempio in seguito all'enfasi sulla lettera che si vuole selezionare).

Purtroppo, non è sempre possibile registrare affidabilmente questo segnale, in quanto il segnale EEG in alcune condizioni patologiche presenta alterazioni che lo differenziano sostanzialmente dalle condizioni normali.

In un articolo di WIRED viene intervistato uno dei membri del team che si occupò di aggiornare il sistema di comunicazione di Stephen Hawking, di seguito un estratto:

*“Il team di Intel immaginò uno stravolgimento dell’arcaico sistema utilizzato da Hawking, il che richiedeva di implementare nuovo hardware. ‘Justin pensava di utilizzare tecnologie come il riconoscimento di movimenti facciali, un inseguitore oculare e una brain computer interface’ dice Nachman. ‘Inizialmente gli sottoponemmo molte di queste idee innovative e provammo molte attrezzature già disponibili sul mercato.’ Questi tentativi fallirono sistematicamente. L’inseguitore oculare non riusciva ad agganciarsi allo sguardo di Hawking, a causa dell’abbassamento delle sue palpebre. Prima del progetto di Intel, Hawking testò anche delle cuffie EEG allo scopo di rilevare la sua attività cerebrale e trasmettere comandi al suo computer. Per qualche motivo, non riuscivano a misurare un segnale sufficientemente potente. ‘Facevamo comparire delle lettere nello schermo e l’interfaccia provava a selezionare quella corretta solo registrando la sua attività cerebrale,’ dice Wood. ‘Funzionavano benissimo con me, poi Stephen le provò ma non riuscivano ad estrapolare il segnale. Il rapporto segnale rumore era troppo basso.’”<sup>viii</sup>*

Tuttavia, nuove implementazioni di BCIs invasive dimostrano chiaramente, anche per un paziente in Completely Locked-In State (CLIS), la possibilità di comunicare efficacemente:

*“L’attività cellulare registrata da dei microelettrodi posizionati nella corteccia motoria e sensomotori, come picchi di potenziale o potenziali di campo locali (LFP), ha un alto grado di specificità. All’interno di una specifica mappa corticale motoria o sensoriale, la probabilità di rumore sovrapposto sembra essere molto minore rispetto a misure globali come può essere l’EEG. Per questo motivo, le BCIs invasive che utilizzano registrazioni provenienti da microelettrodi come quelle utilizzate con successo su pazienti in LIS (Hochberg et al. 2006, 2012; Milekovic et al. 2018) possono permettere a pazienti in CLIS la comunicazione volontaria attraverso stimoli uditivi.”<sup>ix</sup>*



#### 4.1.2 Recupero delle funzionalità motorie

Mentre l'utilizzo di un computer o di uno smartphone è generalmente un'azione resa sempre più semplice dalle interfacce ergonomiche di cui disponiamo, per un paziente incapace di muovere i propri arti è un compito, se non impossibile, estremamente difficile. Ci sono persone tetraplegiche in grado di usare il proprio smartphone coadiuvate da un pennino posto tra i denti che possono muovere sullo schermo (Figura 8).

Come si può immaginare questa soluzione è subottimale in quanto provoca affaticamento dei muscoli del collo e della bocca, oltre a non permettere una veloce interazione con il dispositivo.



*Figura 8: Soggetto tetraplegico che utilizza un pennino per interagire con il proprio smartphone.*

Ci sono molti esempi di BCIs non invasive EEG utilizzate per controllare dei cursori su uno schermo. In queste implementazioni è necessario che l'interfaccia sia in grado di gestire due gradi di libertà codificati in modo binario (corrispondenti a 4 classi) in modo da controllare i movimenti su, giù, destra e sinistra.

Perché ciò sia possibile, sono necessarie differenze sufficientemente marcate tra gli stati cerebrali di interesse affinché questi siano rilevabili con accuratezza dall'EEG.

La bassa risoluzione spaziale di questa interfaccia rende impossibile la misurazione, come segnali separati, di potenziali associati ai soli movimenti della mano; ad esempio, è impossibile mappare i quattro movimenti della mano destra come quelli che normalmente si farebbero utilizzando un mouse, ai quattro possibili versi del cursore.

Questo perché le quattro attività neuronali associate ai rispettivi movimenti, essendo spazialmente vicine tra loro, se misurate con un EEG verrebbero identificate come un unico segnale corrispondente al generico movimento della mano destra con due possibili stati: la mano destra si muove/la mano destra non si muove.

L'immagine a pagina seguente (Figura 9) permette di visualizzare efficacemente questo concetto.

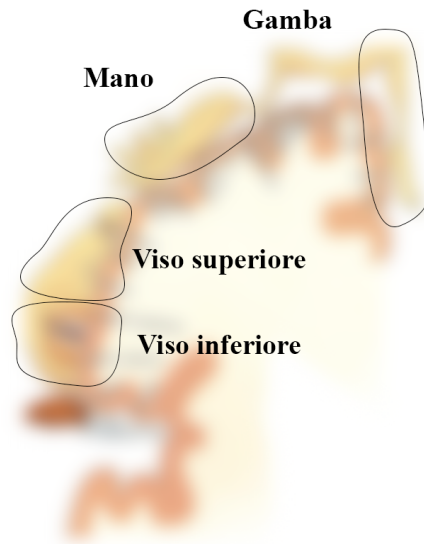


Figura 9: Rappresentazione ideale dell'effetto di sfuocatura operato dagli strati frapposti tra lo scalpo e la corteccia cerebrale; l'immagine mostra l'Homunculus motorio di figura 5 con sfuocatura gaussiana. È evidente come i dettagli non siano più distinguibili.

Per questo motivo, per poter controllare un cursore su uno schermo, i quattro movimenti su, giù, destra e sinistra devono essere associati a dei segnali distinti distribuiti su tutta la corteccia motoria in modo da non presentare sovrapposizioni spaziali all'atto della misurazione tramite EEG.

Nell'esperimento di Audrey S. Royer et al. descritto nell'articolo *EEG Control of a Virtual Helicopter in 3-Dimensional Space Using Intelligent Control Strategies*<sup>x</sup>, si è utilizzato un sistema EEG per controllare un elicottero virtuale.

Per poter comunicare le proprie intenzioni al sistema è necessario utilizzare degli schemi di movimento creati ad hoc, rinunciando quindi alla naturalità dei movimenti in favore della rilevabilità del segnale, sfruttando il fenomeno della lateralizzazione dell'attività neuronale (l'emisfero destro controlla i movimenti della metà sinistra del corpo, l'emisfero sinistro controlla i movimenti della metà di destra).

*“Il segnale di controllo sinistra/destra si otteneva facendo la sottrazione di potenziali e frequenze dell'emisfero sinistro a potenziali e frequenze dell'emisfero destro.*

*Il segnale di controllo su/giù si otteneva facendo l'addizione del segnale sinistra/destra.*

*Usando questo schema, i soggetti del test immaginavano di muovere la loro mano destra per girare a destra, la mano sinistra per andare a sinistra, entrambe le mani per andare in su e nessun movimento per andare in giù, così da creare un sistema a due gradi di libertà con codifica binaria.”<sup>xi</sup>*

Nonostante la semplicità di implementazione di questa tecnologia, sono chiare le limitazioni che ne derivano. Se il solo controllo di un sistema a quattro classi risulta così innaturale, è facile capire come la difficoltà di gestire più gradi di libertà cresca esponenzialmente (una volta esauriti i movimenti macroscopici di parti del corpo corrispondenti a segnali EEG non sovrapposti, si esauriscono anche i gradi di libertà).

Le limitazioni spaziali delle BCIs invasive soffrono invece del problema opposto. L'impianto di elettrodi direttamente nella corteccia offre un'altissima risoluzione spaziale, ma permette di misurare soltanto l'attività cerebrale della zona in esame. L'area di interesse dev'essere quindi decisa preventivamente ed in modo oculato, tenendo conto di quali movimenti corporei utilizzare per il controllo del dispositivo finale.

La superficie che è possibile analizzare va da 16mm<sup>2</sup> per uno Utah Array<sup>xii</sup> di 100 microelettrodi (diametro alla base 80 µm per elettrodo) a circa 4cm<sup>2</sup> per gli impianti state-of-the-art prodotti da Neuralink contenente 1024 microelettrodi (diametro alla base 4-6µm per un filo contenente 32 elettrodi).

Ne consegue che nell'eventualità in cui si volessero monitorare segnali corrispondenti a più aree di interesse, è necessario impiantare più dispositivi.

Nel video dimostrativo fornito dall'azienda Neuralink si può vedere come Pager, un macaco con due impianti cerebrali (chiamati *Link*) da 1024 canali ciascuno, controlli con un joystick un cursore su uno schermo, ricevendo del cibo quando il cursore viene posizionato sopra ad un target di forma quadrata e colore arancione. Dopo una fase iniziale di calibrazione, il joystick viene scollegato e le intenzioni di movimento della sola mano destra vengono registrate direttamente dal cervello di Pager.

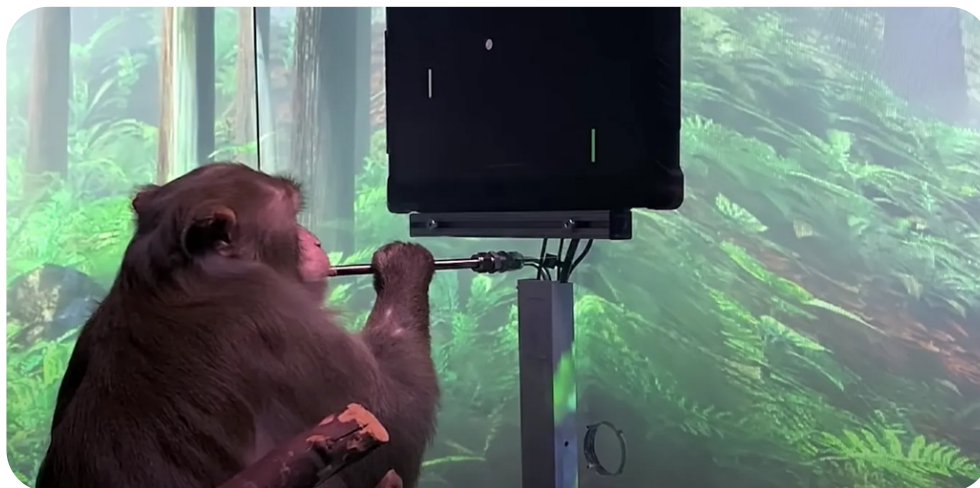
Si può subito vedere come non ci sia più la necessità di creare degli schemi di movimento come nel caso dell'EEG, ma si possano usare dei movimenti naturali ed intuitivi più raffinati (Figura 10).

In questo caso ci sono cinque comandi di input: su, giù, destra, sinistra e il comando di scelta (comando di cui non vengono fornite informazioni. È tuttavia possibile intuirne la presenza nel momento in cui si vede illuminarsi di rosso una cella adiacente a quella arancione prima che il cursore arrivi su quest'ultima, indicando una scelta errata da parte di Pager, quindi la presenza di un segnale di scelta).



Figura 10: Pager sposta il cursore sullo schermo muovendo un joystick, ma questo è scollegato e i movimenti vengono registrati unicamente dall'impianto Neuralink.

È importante sottolineare che sono le intenzioni di movimento ad essere misurate, non il segnale neuronale che provoca il movimento. Quest'ultimo infatti non è necessario: le reti neuronali in cui si manifestano le intenzioni di movimento si attivano in modo molto simile sia che si decida di compiere il movimento sia che si decida di limitarsi ad immaginarlo; questi segnali si chiamano segnali premotori<sup>xiii</sup>. Per questo motivo in un successivo esperimento, lo stesso Pager è in grado di giocare al videogioco Pong (rinominato MindPong) senza muovere un muscolo (Figura 11).



*Figura 11: Sempre Pager gioca a MindPong senza muovere un muscolo.*

In un altro esempio, si può vedere una donna tetraplegica che tramite l'impianto di due Utah Arrays (100 canali ciascuno) ed il sistema di interfaccia neurale BrainGate, è in grado di muovere un braccio robotico per afferrare una bottiglia, portarla alla propria bocca e bere (Figura 12). Per fare ciò sono necessarie 7 classi di movimento, sei per i movimenti nello spazio tridimensionale e la settima necessaria per aprire e chiudere la mano.

Anche in questo caso la donna riesce a muovere il braccio robotico semplicemente pensando di muovere il suo braccio e la sua mano reali.



*Figura 12: La donna tetraplegica in foto porta a sé una bottiglia muovendo un braccio robotico con il suo solo pensiero grazie all'impianto di due Utah Arrays.*

Vale la pena menzionare un approccio simile al precedente nella parte di lettura ma molto diverso nella parte di realizzazione del movimento: Ian Burkhart, un paziente tetraplegico con un impianto Utah Array, è riuscito a riprendere il controllo funzionale della propria mano grazie all'elettrostimolazione dei muscoli flessori ed estensori dell'avambraccio. Di seguito un fotogramma (Figura 13) del video che lo riprende mentre gioca con successo a Guitar Hero, un videogioco in cui il controllo preciso delle dita è essenziale. Nel video Ian svolge anche altre azioni per lui prima impossibili come utilizzare una carta di credito o versare del liquido da una bottiglia in una tazza per poi prendere un cucchiaino e mescolare.



Figura 13: Ian Burkhart, paziente tetraplegico, gioca a Guitar Hero. La sua mano è controllata da degli elettrodi esterni comandati a loro volta dal cervello di Ian tramite l'utilizzo di uno Utah Array.

### 4.1.3 Recupero delle funzionalità sensoriali

Noi esseri umani navighiamo il mondo grazie ad un complesso sistema di organi sensoriali, i quali sono composti da strutture, più o meno complesse, specializzate nella ricezione di stimoli esterni o interni e nella conversione di questi stimoli in impulsi nervosi.<sup>xiv</sup>

Questi impulsi nervosi vengono convogliati nel cervello in aree dedicate alla loro ricezione:

gli stimoli provenienti dagli occhi conferiscono al lobo occipitale dove ha sede la corteccia visiva; quelli uditivi arrivano al lobo temporale nella corteccia uditiva; gli stimoli tattili come calore, dolore, tatto, arrivano al lobo parietale nella corteccia somatosensoriale, e così via.

Essendo gli elettrodi di una BCI invasiva capaci non solo di funzionare passivamente come ricettori, ma anche di stimolare attivamente i neuroni con segnali di intensità e frequenze compatibili con quelle neuronali, è possibile utilizzarli per imitare gli stimoli provenienti dagli organi di senso.

Ciò rende fattibile, in persone con deficit sensoriali non imputabili a problemi cerebrali, ristabilire con tecniche artificiali alcune funzionalità dei sensi compromessi.

Nell'esempio di un paziente affetto da cecità, è possibile, tramite degli impianti nella corteccia visiva, registrare le immagini esterne con una fotocamera, tradurre il segnale

digitale in impulsi compatibili con quelli neuronali e con questi stimolare i neuroni deputati alla decodifica dei segnali visivi (Figura 14).<sup>xv</sup>

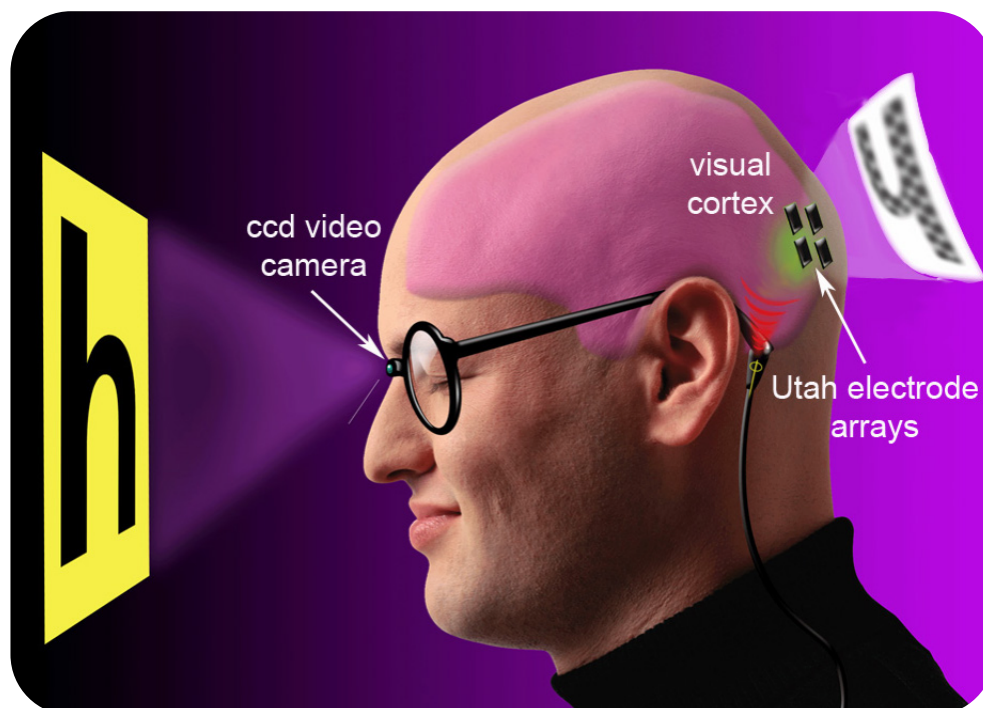


Figura 14: Principio di posizionamento degli elettrodi per il ripristino della vista.

La parte più complessa è quella di traduzione, in quanto non ci sono degli schemi predeterminati per passare da un segnale digitale e quindi deterministico ad un segnale biologico. Perché questa conversione garantisca delle risoluzioni spaziali e temporali accettabili, non è sufficiente un modello matematico “statico”, ma si rendono necessari complessi algoritmi di intelligenza artificiale capaci di adattarsi al singolo paziente e allo specifico posizionamento degli elettrodi.

In uno studio, si è visto come un paziente tetraplegico di 28 anni con quattro impianti cerebrali (due nella corteccia motoria per un totale di 88 elettrodi e due nella corteccia somatosensoriale per un totale di 32 elettrodi), sia riuscito a muovere un braccio robotico con maggiore precisione quando veniva attivato il feedback tattile nella mano robotica, seppur con una definizione molto limitata.<sup>xvi</sup>

Questo studio dimostra quanto sia importante ripristinare alcune capacità somatosensoriali in persone con gravi deficit sensoriali.

#### 4.1.4 Differenze tra Utah Array e Link

Le maggiori differenze tra le due tecnologie sopra descritte (*Link* di Neuralink e Utah Array) sono da ricercare nell'invasività, nella portabilità e nella definizione spaziale. È da notare che la tecnologia Utah Array, essendo l'unica approvata per sperimentazione sull'essere umano, è utilizzata da moltissime aziende, tra cui la sopracitata BrainGate la quale non fornisce pubblicamente informazioni tecniche sull'impianto.

Per questo motivo i dati che seguono derivano dal manuale di chirurgia per Utah Array stilato dall'azienda Blackrock.<sup>xvii</sup>

### **Invasività:**

Il sistema *Link* di Neuralink è progettato per essere impiantato da un robot, il quale si occupa dell'intera procedura chirurgica, forando il cranio del diametro necessario all'inserimento del dispositivo *Link* (23mm), inserendo con un micro ago ciascun singolo elettrodo così da evitare, grazie ad una telecamera ad alta definizione, il danneggiamento di qualsiasi vaso sanguigno e quindi qualsiasi versamento emorragico, per poi chiudere il foro con il dispositivo circolare e ricucire la cute. In questo modo una volta ricresciuti i capelli non si noterà nulla ed il sistema potrà comunicare con un computer o con uno smartphone tramite tecnologia wireless, alimentato da una batteria (integrata nel dispositivo) ricaricabile induttivamente attraverso il cuoio capelluto. Questo permetterebbe al paziente di avere un impianto funzionante nel giro di poche ore, grazie ad una procedura completamente automatizzata, eseguibile in day-hospital, che nel giro di poche settimane non lascerebbe alcuna traccia.

L'impianto di uno Utah Array richiede un intervento chirurgico ad opera di un'equipe di medici e tecnici specializzati.

Viene eseguita una craniotomia su una porzione di cranio molto più vasta delle dimensioni dell'impianto ed essendo gli elettrodi costruiti su un unico wafer di silicio 4x4mm è facile che qualcuno di questi entri in contatto con qualche vaso sanguigno, con conseguenti versamenti emorragici. Ciò allunga il tempo dell'intervento perché è necessario il continuo monitoraggio delle aree cerebrali interessate durante il posizionamento.

Inoltre, l'impianto necessita di un collegamento cablato; al termine dell'operazione resta infatti sullo scalpo del paziente un connettore transcutaneo, necessario per trasportare i segnali degli elettrodi. Questo espone il paziente ad un alto rischio infettivo.

### **Portabilità:**

Il sistema *Link* è dotato di una batteria interna ricaricabile induttivamente attraverso il cuoio capelluto, oltre a poter comunicare via wireless con uno smartphone. Ciò lo rende estremamente portatile e semplice da utilizzare.

In contrasto, il sistema di Utah Array necessita di una connessione cablata ed un computer con software dedicato, il quale necessita di un certo grado di preparazione per essere operato.

### **Definizione spaziale:**

Il sistema *Link* utilizza 64 micro-fili da 16 elettrodi ciascuno (o 32 micro-fili da 32 elettrodi ciascuno), per un totale di 1024 elettrodi, maggiore di un ordine di grandezza rispetto ai 100 elettrodi dello Utah Array.

Ciò si traduce in una definizione spaziale dieci volte maggiore.

## 4.2 Altri campi d'impiego

La versatilità delle BCIs fa sì che il loro impiego non debba essere limitato al trattamento di problemi clinici, ma possa essere esteso anche all'abbattimento di limitazioni tecnologiche.

Una di queste limitazioni è il problema della larghezza di banda nella comunicazione tra utente e macchina.

Questo problema è spesso mascherato dall'interfaccia utente (in inglese User Interface, UI), un insieme di software e periferiche input-output che ci permettono di comunicare ad alto livello con il computer.

Fatichiamo ad accorgerci dell'esistenza di questa limitazione in quanto l'unico confronto possibile è quello retrospettivo: osservando vecchie tecnologie viene naturale pensare a quanto quelle nuove funzionino meglio.

Le UIs sono infatti in continua evoluzione: i primi computer utilizzavano schede perforate sia come input che come output, rendendo la programmazione di anche una semplice somma tra interi un lavoro molto specializzato; la successiva UI a linea di comando ha permesso di poter interagire con un computer scrivendo su una tastiera dei comandi in modo più naturale, consentendo maggiore accesso alla tecnologia; le nuove Interfacce Utente Grafiche (GUI) ne hanno permesso ancora maggior diffusione ed oggi interagiamo con i nostri smartphone toccando direttamente delle icone sullo schermo o dettando ciò che vogliamo fare ad un'assistente vocale.

Ognuno di questi avanzamenti ha richiesto la potenza computazionale necessaria a tradurre l'interazione ad alto livello (ad esempio il click del mouse sopra ad una cartella o la richiesta ad un assistente vocale di abbassare il volume della musica) in una sequenza di bit che il processore possa elaborare, nascondendo ai nostri occhi l'enorme insieme di istruzioni elementari con cui la macchina "ragiona".

Per quanto si possa restare meravigliati dal livello tecnologico raggiunto osservando retrospettivamente il percorso dell'informatica, l'interazione con il computer è tutt'altro che naturale; questo concetto è facilmente esprimibile con un esempio: nel momento in cui si decide di aprire un file all'interno di una cartella presente sulla scrivania del pc, bisogna muovere il mouse per cliccare sulla cartella e successivamente cliccare sul file. Per eseguire questo semplice compito sono necessari alcuni secondi, ma il pensiero che ha generato questa azione è stato quasi istantaneo. Anche per il computer l'insieme delle istruzioni ricevute richiede al più qualche millisecondo per poter essere eseguito: per la maggior parte del tempo la *cpu* resta semplicemente in attesa di un comando. Ciò avviene perché la comunicazione tra il cervello ed il computer passa attraverso il movimento, un canale estremamente inefficiente e lento per il trasferimento di informazioni.

Se la comunicazione cervello-computer avvenisse per via "diretta", sarebbe sufficiente pensare al nome del file per farlo apparire su uno schermo (sempre che vi sia la necessità di quest'ultimo).<sup>xviii</sup>

In generale, nel momento in cui un'informazione presente nel cervello si manifesta sotto forma di suono o movimento, avviene una pesante compressione.



Riuscendo a stabilire un canale di comunicazione diretto (input e output) tra cervello e computer senza passare attraverso il movimento, ecco che si ha la connessione più veloce possibile tra intenzione umana e l'input di qualsiasi programma, e tra l'output di quest'ultimo e la percezione umana.

Ciò apre la strada a moltissime applicazioni anche in soggetti sani<sup>xix</sup>, tra cui:

- *Gaming* — L'impiego di BCIs nel mondo del *gaming* è studiato da anni; esistono infatti molti videogiochi controllabili tramite una cuffia EEG. La precisione e velocità di questo tipo di interfaccia permettono tuttavia un controllo impreciso come già descritto in precedenza.<sup>xx</sup>  
L'utilizzo di BCIs invasive permetterebbe un'esperienza estremamente più fluida e precisa, con l'aggiunta della possibilità di stimolare le cortecce visiva, olfattiva, uditiva e somatosensoriale con stimoli che rendano il gioco estremamente avvincente.  
Ciò introduce il prossimo punto:
- Realtà aumentata e realtà virtuale — La possibilità di stimolare con precisione delle specifiche aree corticali permette di ingannare il cervello con sensazioni, suoni, immagini e odori non realmente presenti nel mondo circostante, sia in sovrapposizione (realtà aumentata) sia in sostituzione dell'ambiente reale (realtà virtuale).  
Ciò permette quindi uno spettro di applicazioni estremamente ampio che può andare dal settore dell'intrattenimento a quello dell'addestramento per compiti per i quali non è possibile un training diretto (ad es. astronauti);
- Controllo di sistemi complessi — Operatori specializzati di macchinari complessi potrebbero manovrare gli stessi direttamente con il pensiero ricevendo dei feedback per capire se tutto sta procedendo correttamente o se c'è qualcosa che non va, allo stesso modo in cui se dando un calcio ad un pallone ci viene male al ginocchio ci fermiamo subito per evitare di stressarlo ulteriormente; rendendo quindi l'interazione uomo-macchina molto più "naturale";
- Comunicazione non compressa (telepatia sintetica) — Qualora le BCIs dovessero raggiungere uno stato di avanzamento tale da permettere di decodificare un pensiero e le emozioni che lo accompagnano, sarebbe possibile, in gruppi di individui arbitrariamente numerosi, inviare l'informazione non compressa dall'interfaccia di un individuo all'interfaccia di tutti gli individui riceventi. Ciò permetterebbe a chi "sta in ascolto" di comprendere il pensiero originale che normalmente avrebbe dovuto subire almeno due traduzioni (da pensiero a parole nel mittente e da parole a pensiero nel destinatario). Spessissimo il risultato di queste due traduzioni genera nel destinatario un pensiero estremamente diverso da quello originale, distorcendone fortemente l'informazione;

- **Apprendimento rapido** — L'apprendimento avviene grazie alla ripetuta stimolazione di reti neurali deputate alla gestione di compiti specifici. Per sviluppare delle capacità, siano esse scientifiche, artistiche, sportive, ecc., è necessaria la ripetizione<sup>1</sup>. Quest'ultima provoca una stimolazione continua delle reti neurali coinvolte e quindi un aumento di connessioni ed una maggior robustezza, velocità ed efficienza. Attraverso l'intercettazione di questi pattern sarebbe possibile emularli e stimolare queste reti neurali anche durante periodi di riposo, aumentando così il numero di ripetizioni e quindi velocizzando l'apprendimento.

## 4.3 Considerazioni etiche

### 4.3.1 Siamo già dei “cyborg”

Sorge spontaneo il dubbio: chi sarebbe disposto ad affrontare uno o più interventi chirurgici al cervello pur di poter ottenere i benefici sopra descritti?

Osservando da una prospettiva esterna il nostro rapporto con lo smartphone, è evidente che quest'ultimo è diventato un'estensione del nostro corpo e della nostra mente (tant'è che se un estraneo lo utilizza ci sentiamo violati, spesso intimamente).

Deleghiamo al cellulare molte nostre memorie, con foto o video ordinatamente raggruppati in ordine cronologico, a cui possiamo accedere in qualsiasi momento senza la distorsione tipica dei ricordi; è il nostro mezzo di comunicazione, che ci permette di contattare in qualsiasi momento i nostri conoscenti, dovunque essi siano; è una fonte di informazioni inesauribile e pronta, ad ogni minimo dubbio, ad aiutarci nella nostra vita quotidiana e lo usiamo per un'infinità di altre applicazioni.

È quindi naturale che qualsiasi miglioramento nell'interfaccia prima o poi venga adottato su larga scala, in quanto è un miglioramento diretto a qualcosa che ormai fa parte di noi e della nostra intimità.

### 4.3.2 Problemi etici

Una tecnologia come le BCIs, nel momento in cui arriva in uno stadio di sviluppo avanzato, avrà inevitabilmente una profonda influenza sulla specie umana. Questa influenza porta con sé molti problemi etici, alcuni che già conosciamo ed altri ancora difficilmente immaginabili.

L'alto grado di controversia è una caratteristica intrinseca di ogni tecnologia rivoluzionaria, in quanto se rivoluziona il mondo in positivo, lo può fare anche in negativo.

È stato così per l'invenzione dell'automobile, la quale ha richiesto la creazione di uno specifico insieme di regole da rispettare per ridurre il rischio per sé e per gli altri; è stato così per internet, senza il quale oggi ci sentiamo isolati, ma grazie al quale è anche molto più semplice commettere abusi e manipolazioni, anche su larga scala.

---

<sup>1</sup> non è tuttavia sufficiente; per un apprendimento efficace concorrono numerosissimi fattori. Questo paragrafo ha il solo scopo di illustrare un possibile risvolto futuro della tecnologia, la quale, per funzionare, dovrà necessariamente essere coadiuvata da altri sistemi di supporto.

È così anche per le BCIs: permetteranno di “ingegnerizzare dei miracoli”, ma metteranno a dura prova molti aspetti che oggi diamo per scontati, di seguito alcuni di questi:

- Privacy — La privacy dell’individuo è un diritto che sempre più persone si rendono conto di avere e che quindi, fortunatamente, proclamano. Già con l’informatica per come la conosciamo oggi la privacy è un tema centrale e di fondamentale importanza, ma lo diverrà ancora di più quando la nostra più profonda intimità<sup>xxi</sup>, di cui fanno parte il nostro pensiero ed i nostri sentimenti, sarà direttamente connessa ad un sistema informatico. Se già oggi cerchiamo con impegno di eludere il costante monitoraggio delle nostre ricerche su internet e quindi la mappatura dei nostri interessi, quando le BCIs saranno una tecnologia matura ci sarà la necessità di impedire il monitoraggio dei nostri pensieri da parte di terzi per scopi che esulano dall’interesse dell’individuo;
- Sicurezza — Oggi un furto informatico può esporre dati sensibili di alcuni utenti: un attacco informatico può bloccare interi sistemi di gestione mettendo in difficoltà molte persone; ma se questi attacchi potessero avere diretto accesso al nostro cervello si presenterebbe un problema ben più grave. Per questo motivo prima che sia possibile creare degli impianti in grado di analizzare i pensieri per connetterli in rete sarà fondamentale stabilire nuovi standard di sicurezza informatica;
- Diritto di scelta — Qualora le prospettive sopraelencate dovessero diventare realtà, ci sarà una parte di popolazione (persone con una BCI) che avrà a tutti gli effetti dei superpoteri. Questa condizione può, a lungo andare, favorire talmente tanto i possessori di BCI rispetto ai non possessori, che l’impianto di una BCI non sarebbe più una scelta soggettiva, ma diventerebbe un’imposizione sociale. Questo è forse il rischio etico più difficile da affrontare in quanto ha a che fare non tanto con la tecnologia in sé ma con delle dinamiche sociali difficilmente modificabili perché facenti parte del nostro retaggio evolutivo.

Questi problemi etici sembrerebbero insormontabili, ma è attraverso lo sviluppo in ambienti controllati e lo studio approfondito di questa tecnologia che sarà possibile conoscerne veramente tutti i risvolti e quindi realizzare le varie regolamentazioni da mettere in atto per limitare gli sviluppi negativi.

## 5 MISURAZIONE ED ELABORAZIONE DEI SEGNALI CEREBRALI

Una parte fondamentale dell'hardware di una BCI sono i sensori che permettono la lettura del segnale cerebrale.

Un sensore è costituito da una coppia di elettrodi. Un sensore bioelettrico trasforma un segnale elettrico da un mezzo a conduzione ionica ad uno a conduzione elettronica.

Gli elettrodi devono garantire il requisito minimo di biocompatibilità, ossia la capacità di interagire in modo non dannoso con l'organismo.

Inoltre, il materiale di cui questi elettrodi sono composti deve presentare un compromesso tra bassa impedenza, impedenza costante per elettrodi diversi, basso costo e alta stabilità nel tempo.

In questo ambito, gli elettrodi di misura si distinguono in:

- elettrodi superficiali (per BCIs non invasive);
- elettrodi intra-cellulari (microelettrodi - per BCIs invasive).

### 5.1 Elettrodi superficiali

Per BCIs basate su EEG gli elettrodi devono essere biocompatibili con la pelle. Essendo questo un requisito piuttosto facile da soddisfare, sono molte le opzioni disponibili sul mercato.

Si possono identificare due categorie principali: Elettrodi passivi ed elettrodi attivi.

Gli elettrodi passivi sono solitamente fatti di oro, argento o argento clorurato, possono assumere varie forme (coppetta, anello, disco, ...) e molti sistemi li utilizzano solitamente attaccati a fili individuali. Questi elettrodi si applicano sullo scalpo usando un gel conduttivo (per questo motivo vengono definiti *wet electrodes* – elettrodi bagnati) solitamente in seguito ad una leggera abrasione dello scalpo per ridurre l'impedenza elettrodo-scalpo.

Un altro esempio di elettrodi passivi sono gli elettrodi a spugna; utilizzano cioè una spugna come interfaccia tra l'elettrodo e lo scalpo senza richiedere l'applicazione di gel conduttivo (per questo motivo sono detti *dry electrodes* – elettrodi asciutti). Questi consentono un'applicazione molto più rapida seppur presentando un'impedenza più alta. Vale la pena menzionare anche gli elettrodi ad ago ipodermici, utilizzati in situazioni di emergenza per assicurare una bassa impedenza ed un corretto posizionamento in tempo rapido.

Gli elettrodi attivi si dividono anch'essi in *dry electrodes* e *wet electrodes* utilizzando gli stessi materiali, ma hanno la caratteristica di avere un circuito preamplificatore adiacente all'elettrodo. Questo sistema fa sì che l'impedenza possa essere misurata direttamente dal preamplificatore, il quale può indicare in tempo reale tramite un LED colorato la qualità dell'accoppiamento elettrodo-scalpo (verde, giallo e rosso con i significati solitamente attribuiti a questi colori). Ciò permette un posizionamento molto più rapido riducendo drasticamente i tempi di preparazione della cuffia EEG, a discapito di un costo molto più elevato.

Il circuito preamplificatore permette anche di minimizzare rumore ambientale ed interferenze dovuti ad effetti elettrici nel cavo di trasmissione. In quest'ultimo infatti

saranno presenti segnali di intensità molto maggiori rispetto ai segnali provenienti da elettrodi passivi, perciò, il rapporto segnale-rumore migliorerà.<sup>xxii</sup>

## 5.2 Biomateriali compatibili con il cervello per elettrodi intracellulari

Gli elettrodi per BCIs invasive devono possedere la caratteristica fondamentale di biocompatibilità con il tessuto cerebrale e gli strati protettivi superiori del cervello. Rispetto agli elettrodi superficiali, caratterizzati da un impiego per periodi di tempo limitati, questi elettrodi devono essere estremamente stabili a lungo termine in quanto a contatto diretto con la corteccia cerebrale per tutta la vita dell'individuo (al netto di sporadici interventi di espianto).

Tuttavia, queste condizioni ideali sono ben lontane dall'essere raggiunte: in uno studio di dicembre 2021<sup>xxiii</sup>, un team di ricercatori ha espantato sei Utah Array (UA) da due pazienti diversi; due UA al platino (Pt) impiantati per 980 giorni nel partecipante P1 e due UA al platino più due UA all'ossido di iridio (IrOx) impiantati per 182 giorni nel partecipante P2.

Dalle analisi effettuate si è evinto che:

- È presente tessuto incapsulato su più livelli;
- La deteriorazione dei materiali e la quantità di incapsulamenti fibrosi dipendono positivamente dalla durata della permanenza dell'impianto;
- L'ampiezza del segnale e l'impedenza diminuiscono nel tempo.

Lo studio conclude che *“È necessario lo sviluppo di nuove strategie per la produzione di biomateriali che minimizzino l'insorgenza di capsule fibrotiche e che migliorino la stabilità del materiale per ottenere un'alta qualità sia in lettura sia in scrittura per maggiori periodi di permanenza dell'impianto”*.

Un altro approccio è presentato nell'articolo introduttivo di Neuralink<sup>xxiv</sup>, il quale spiega che il rivestimento dielettrico usato nei suoi array di elettrodi è costituito di poliimmide che incapsula una sottile traccia di oro come conduttore. Essendo che ogni singolo filo contiene 16 o 32 elettrodi, questi ultimi hanno un'area superficiale ridotta ed è per questo motivo importante modificarne la superficie di contatto per abbassarne l'impedenza ed aumentarne l'effettiva capacità di trasporto di cariche.

I trattamenti usati sono:

- rivestimento della superficie dell'elettrodo con poli(3,4-etilendioossitiofene) polistirene solfonato (PEDOT:PSS), un polimero conduttivo;
- rivestimento della superficie dell'elettrodo con ossido di iridio (lo stesso materiale utilizzato da alcuni Utah Array, vedi sopra)

Nell'articolo si afferma che *“la minore impedenza che caratterizza il PEDOT:PSS è promettente; tuttavia la sua stabilità a lungo termine e la sua biocompatibilità sono meno studiate di quelle del IrOx”* anche se *“i polimeri conduttivi [tra cui il PEDOT:PSS] possono essere arricchiti di agenti promotori di crescita neurale nella zona di registrazione [coincidente con la zona d'impianto] minimizzando la risposta immunitaria.”*<sup>xxv</sup>

Sempre Neuralink conclude: *“Questi tecniche e processi possono essere migliorati ed ulteriormente estesi ad altri tipi di materiali conduttivi e rivestimenti”*.

### 5.3 Interpretazione dei segnali - Segnali deterministici e segnali stocastici

Come visto più volte nei precedenti capitoli, in seguito alla misurazione dei segnali cerebrali c'è la necessità di interpretarli. A questo scopo è fondamentale conoscerne la classe di appartenenza, in quanto segnali di natura diversa vanno interpretati in modo diverso.

Esistono due tipologie fondamentali di segnali: i segnali deterministici e quelli stocastici.

Nei segnali deterministici (o determinati) è possibile predire il valore in un qualunque istante a piacere, mentre nei segnali stocastici (o aleatori) il valore non è prevedibile, ma è possibile estrarne delle proprietà statistiche che rientrano nella più vasta tematica dei processi aleatori o stocastici.

Stando alla definizione di segnale deterministico appena proposta, questo non può essere presente in natura in quanto ogni piccola variazione casuale anche sporadica renderebbe impossibile predirne lo stato in qualsiasi momento successivo alla prima variazione; tuttavia è possibile, in prima approssimazione, trattare come segnale deterministico un segnale che, sulla base di misurazioni effettuate in un breve lasso di tempo, è prevedibile con un certo grado di accuratezza per un altro lasso di tempo finito. Un esempio di questo tipo di segnale è l'elettrocardiogramma (ECG) (Figura 15). Grazie a questa proprietà, questi segnali possono essere studiati con strumenti matematici relativamente semplici o è addirittura possibile osservarne una rappresentazione grafica ampiezza-tempo per ricavarne molte utili informazioni.

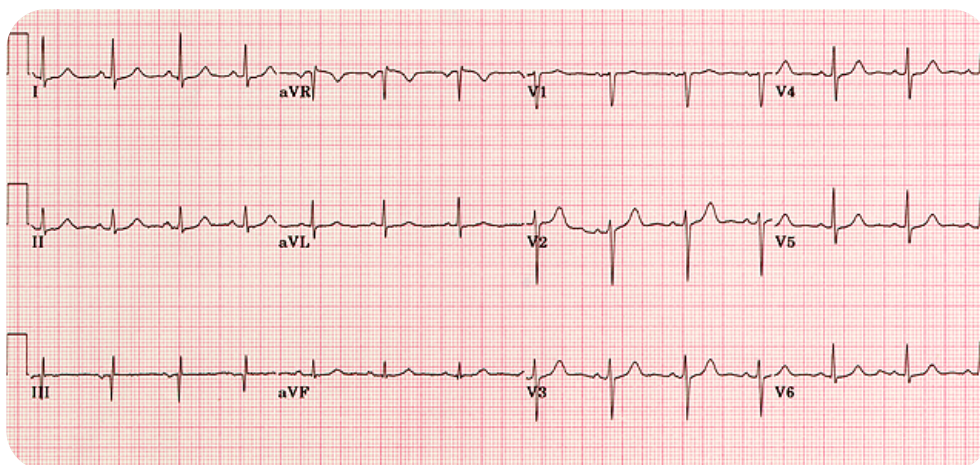


Figura 15: Esempio di ECG. Si può osservare come la frequenza resti invariata nell'intervallo osservato.

In contrasto, i segnali stocastici sono quasi totalmente privi di ripetitività e gli strumenti matematici utilizzati per l'elaborazione dei segnali deterministici forniscono solo alcune informazioni ad alto livello: per esempio, l'osservazione di un grafico ECG permette di stabilire con esattezza il momento di contrazione di ogni parte del cuore, mentre l'osservazione di un EEG, segnale notoriamente stocastico, permette di conoscere lo stato generale del soggetto (Figura 16): se esso sta dormendo, se è in stato di allerta o rilassato, ecc., senza però offrire informazioni relative ai pensieri.

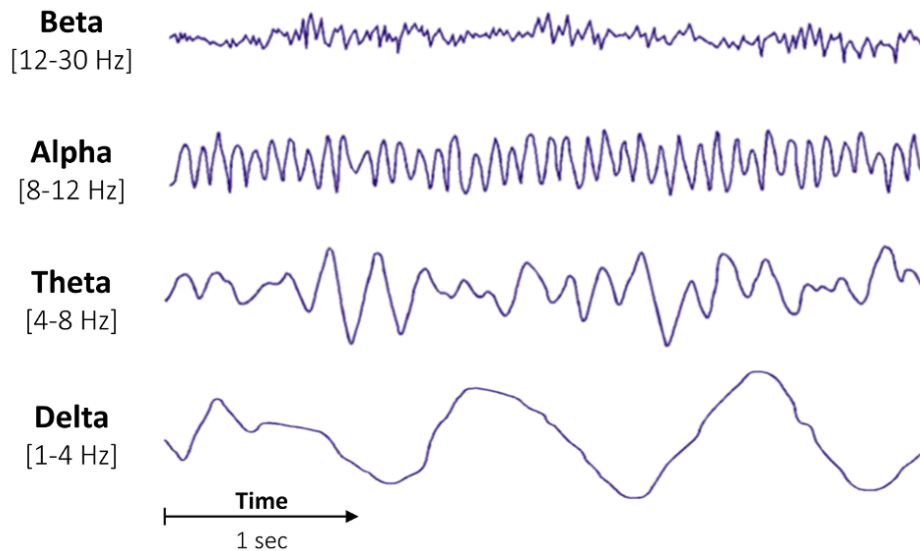


Figura 16: Esempio di onde cerebrali misurate con EEG; segnali stocastici dai quali, studiandone lo spettro, è possibile determinare lo stato del soggetto: onde Beta: stato di veglia; onde Alpha: stato di rilassamento e sonno leggero; onde Theta e Delta: sonno profondo.

Per elaborare i segnali stocastici, siano essi provenienti da un apparato elettroencefalografico o da degli elettrodi corticali, sono quindi necessari strumenti matematici più avanzati e dinamici.

## 5.4 Ruolo dell'intelligenza artificiale nell'elaborazione dei segnali

Per i motivi sopracitati, molti studi sulle BCIs utilizzano come strumento fondamentale<sup>xxvi</sup> nell'elaborazione dei segnali neuronali algoritmi di *machine-learning*<sup>xxvii</sup>; è infatti grazie a programmi in grado di evolvere in autonomia sulla base degli input forniti che è possibile estrapolare molte più informazioni a basso livello dai segnali neuronali.

Un algoritmo di intelligenza artificiale (*artificial intelligence* - AI) può quindi imparare come interpretare determinati pattern estrapolandone il significato, in seguito ad un periodo di *training* (o addestramento, durante il quale si forniscono all'algoritmo dei segnali con il corrispettivo significato per permettere all'algoritmo di costruire concetti generalizzati partendo da dei particolari) e senza conoscere preventivamente le sequenze, intensità, e tipologie di segnali neuronali.

A *training* completato, con questo approccio non è più necessario studiare attivamente il segnale neuronale eseguendo una pre-categorizzazione, ma è sufficiente darlo in pasto all'algoritmo di *machine-learning* e quest'ultimo ne estrapolerà in autonomia quante più informazioni possibili (compatibilmente alla qualità e complessità della progettazione dell'algoritmo; più avvanzerà lo stato dell'arte dell'AI più informazioni riusciremo ad estrapolare dai segnali cerebrali).

## 6 CONCLUSIONI

È facile pensare ad una moltitudine di altri impieghi clinici, per queste tecnologie, non riportati in questo elaborato.

È tuttavia altrettanto facile lasciar divagare la mente immaginando scenari fantascientifici in cui uomo e computer vivono in simbiosi.

Purtroppo o per fortuna, la rapidità di avanzamento della tecnologia renderà queste fantasie spesso distopiche sempre meno distanti.

Per quanto spaventoso possa essere un futuro in cui alcune o molte persone decidono di vivere costantemente connesse ad un computer, è bene non etichettare la tecnologia come pericolosa per relegarla in un angolo sperando che venga dimenticata; la storia insegna che la tecnologia avanza a prescindere dalla volontà degli uomini, spesso a prescindere dalla stessa volontà dei suoi creatori.

È quindi solo attraverso la previsione delle potenzialità sia costruttive che distruttive di una certa tecnologia che è possibile regolamentarla e quindi arginarne gli impatti esiziali, amplificandone invece quelli benefici.



## Sitografia e Bibliografia

- 
- <sup>i</sup> [it.wikipedia.org/wiki/Cervello](https://it.wikipedia.org/wiki/Cervello)
- <sup>ii</sup> [it.wikipedia.org/wiki/Corteccia\\_cerebrale](https://it.wikipedia.org/wiki/Corteccia_cerebrale)
- <sup>iii</sup> [www.treccani.it/enciclopedia/corteccia-cerebrale\\_%28Dizionario-di-Medicina%29/](http://www.treccani.it/enciclopedia/corteccia-cerebrale_%28Dizionario-di-Medicina%29/)
- <sup>iv</sup> [www.my-personaltrainer.it/salute-benessere/corteccia-cerebrale.html](http://www.my-personaltrainer.it/salute-benessere/corteccia-cerebrale.html)
- <sup>v</sup> [www.angelinipharma.it/aree-terapeutiche/brain-health/il-cervello/](http://www.angelinipharma.it/aree-terapeutiche/brain-health/il-cervello/)
- <sup>vi</sup> Shin J, Im CH. Performance Prediction for a Near-Infrared Spectroscopy-Brain-Computer Interface Using Resting-State Functional Connectivity of the Prefrontal Cortex. *Int J Neural Syst.* 2018; 28(10): 1850023.
- <sup>vii</sup> [neuralink.com/science](https://neuralink.com/science)
- <sup>viii</sup> [www.wired.com/2015/01/intel-gave-stephen-hawking-voice/](http://www.wired.com/2015/01/intel-gave-stephen-hawking-voice/)
- <sup>ix</sup> Chaudhary, U., Mrachacz-Kersting, N., & Birbaumer, N. (2021). Neuropsychological and neurophysiological aspects of brain-computer-interface (BCI) control in paralysis. *The Journal of physiology*, 599(9), 2351-2359.
- <sup>x</sup> Royer, Audrey S., et al. "EEG control of a virtual helicopter in 3-dimensional space using intelligent control strategies." *IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering* 18.6 (2010): 581-589.
- <sup>xi</sup> A. S. Royer, A. J. Doud, M. L. Rose and B. He, "EEG Control of a Virtual Helicopter in 3-Dimensional Space Using Intelligent Control Strategies," in *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 18, no. 6, pp. 581-589, Dec. 2010, doi: 10.1109/TNSRE.2010.2077654.
- <sup>xii</sup> Kim, Seung-Jae & Manyam, Sandeep & Warren, David & Normann, Richard. (2006). Electrophysiological Mapping of Cat Primary Auditory Cortex with Multielectrode Arrays. *Annals of biomedical engineering*. 34. 300-9. 10.1007/s10439-005-9037-9.
- <sup>xiii</sup> Shafiul Hasan, S.M., Siddiquee, M.R., Atri, R. et al. Prediction of gait intention from pre-movement EEG signals: a feasibility study. *J NeuroEngineering Rehabil* 17, 50 (2020). doi.org/10.1186/s12984-020-00675-5
- <sup>xiv</sup> [it.wikipedia.org/wiki/Organi\\_di senso](https://it.wikipedia.org/wiki/Organi_di senso)
- <sup>xv</sup> Niketeghad, S., Pouratian, N. Brain Machine Interfaces for Vision Restoration: The Current State of Cortical Visual Prosthetics. *Neurotherapeutics* 16, 134–143 (2019). <https://doi.org/10.1007/s13311-018-0660-1>
- <sup>xvi</sup> S. N. Flesher, J. E. Downey, J. M. Weiss, C. L. Hughes, A. J. Herrera, E. C. Tyler-Kabara, M. L. Boninger, J. L. Collinger, R. A. Gaunt, A brain-computer interface that evokes tactile sensations improves robotic arm control. *Science* 372, 831–836 (2021).
- <sup>xvii</sup> [blackrockneurotech.com/research/wp-content/ifu/Utah\\_Array\\_Surgical\\_Manual\\_Research.pdf](https://blackrockneurotech.com/research/wp-content/ifu/Utah_Array_Surgical_Manual_Research.pdf)
- <sup>xviii</sup> Mirabella, Giovanni, and Mikhail A. Lebedev. "Interfacing to the brain's motor decisions." *Journal of neurophysiology* 117.3 (2017): 1305-1319.
- <sup>xix</sup> Shishkin, Sergei L. "Active Brain-Computer Interfacing for Healthy Users." *Frontiers in Neuroscience* 16 (2022).
- <sup>xx</sup> Vasiljevic, Gabriel Alves Mendes, and Leonardo Cunha de Miranda. "Brain-computer interface games based on consumer-grade EEG Devices: A systematic literature review." *International Journal of Human-Computer Interaction* 36.2 (2020): 105-142.
- <sup>xxi</sup> Drew, Liam. "The ethics of brain-computer interfaces." *Nature* 571.7766 (2019): S19-S19.
- <sup>xxii</sup> <https://www.brainlatam.com/blog/a-brief-introduction-to-ceg-and-the-types-of-electrodes-75>
- <sup>xxiii</sup> Woeppel, Kevin, et al. "Explant analysis of Utah electrode arrays implanted in human cortex for brain-computer-interfaces." *Frontiers in bioengineering and biotechnology* (2021): 1137.
- <sup>xxiv</sup> Musk, Elon. "An integrated brain-machine interface platform with thousands of channels." *Journal of medical Internet research* 21.10 (2019): e16194.
- <sup>xxv</sup> Ludwig, Kip A., et al. "Chronic neural recordings using silicon microelectrode arrays electrochemically deposited with a poly (3, 4-ethylenedioxythiophene)(PEDOT) film." *Journal of neural engineering* 3.1 (2006): 59.
- <sup>xxvi</sup> Cao, Zehong. "A review of artificial intelligence for EEG-based brain-computer interfaces and applications." *Brain Science Advances* 6.3 (2020): 162-170.
- <sup>xxvii</sup> Zhang, Xiayin, et al. "The combination of brain-computer interfaces and artificial intelligence: applications and challenges." *Annals of Translational Medicine* 8.11 (2020).