



*Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto di Calcolo e Reti ad Alte Prestazioni*

Brain Function and Electroencephalographic- Based Brain-Computer Interfaces: A Technical Overview

Luigi Rizzo, Massimo Miceli

RT- ICAR-CS-25-07

Maggio 2025



Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Calcolo e Reti ad Alte Prestazioni (ICAR)
– Sede di Cosenza, Via P. Bucci 8-9C, 87036 Rende, Italy, URL: www.icar.cnr.it
– Sezione di Napoli, Via P. Castellino 111, 80131 Napoli, URL: www.icar.cnr.it
– Sezione di Palermo, Via Ugo La Malfa, 153, 90146 Palermo, URL: www.icar.cnr.it

Sommario

Premessa	3
1. Introduzione ai sistemi BCI	4
2. Struttura e Funzioni del Cervello	5
2.1. Le Regioni Subcorticali	6
2.2. La Corteccia Cerebrale	6
3. Segnali cerebrali	7
3.1. Caratteristiche dei Segnali Cerebrali Rilevati Tramite EEG	7
3.1.1. Bande di Frequenza dei Segnali EEG	7
3.1.1.1. Onde Delta (0.5 – 4 Hz)	9
3.1.1.2. Onde Theta (4 – 7 Hz)	9
3.1.1.3. Onde Alpha (7 – 13 Hz)	9
3.1.1.4. Onde Beta (13 – 30 Hz)	10
3.1.1.5. Onde Gamma (30 – 100 Hz)	10
3.1.2. Modulazione Temporale	11
3.1.3. Localizzazione Spaziale	11
3.1.4. Artefatti e Rumore nel Segnale EEG	12
3.2. Sistemi Standard di Posizionamento degli Elettrodi EEG	12
3.2.1. Il sistema 10-20	13
3.2.2. Il sistema 10-10	13
3.2.3. Principi di posizionamento e convenzioni di nomenclatura	13
4. Classificazione dei segnali di controllo per sistemi BCI	15
4.1. Segnali ERP	15
4.1.1. Potenziali Evocati di stato-stazionario (SSEP)	15
4.1.1.1. SSVEP	16
4.1.2. P300	17
4.2. Segnali spontanei	17
4.2.1. Potenziali corticali lenti (SCP)	18
4.2.2. Desincronizzazione/Sincronizzazione Evento-Correlata (ERD/ERS)	18
4.2.2.1. Segnali motori e sensomotori	19
4.2.2.2. Segnali cognitivi mentali	19
4.2.2.3. Altro segnale di controllo	20
5. Tool Software e Dataset	20
Conclusioni	22
Bibliografia	24

Premessa

Le interfacce cervello-computer (Brain-Computer Interface, BCI) rappresentano una tecnologia rivoluzionaria, che consente la comunicazione diretta tra il cervello umano e i dispositivi esterni, con possibili applicazioni in molti settori sia in ambito medicale che per attività legate alla vita quotidiana delle persone. L'importanza delle BCI è testimoniata dal crescente numero di studi e innovazioni in questo campo. In tale contesto, è importante conoscere come funziona il cervello e come rilevare ed interpretare i segnali in esso generati, al fine di poterli poi convertire in segnali di controllo per varie tipologie di dispositivi.

Il presente rapporto tecnico fornisce una descrizione generale dei sistemi BCI, con i vari campi applicativi principali, ed analizza in dettaglio le caratteristiche e funzionalità del cervello, con particolare riferimento alle peculiarità dei segnali cerebrali ed alla rilevazione degli stessi tramite elettroencefalografia, di particolare interesse data la crescente disponibilità di dispositivi indossabili (caschetti), dotati di elettrodi per la rilevazione dei segnali in varie aree del cervello. Tale documento, inoltre, illustra i meccanismi su cui si fondano le interfacce cervello-computer basate su segnali elettroencefalografici, approfondendo i vari segnali di controllo adottati in tali sistemi, a seconda dei diversi casi applicativi.

A tale documento ne seguiranno altri, focalizzati sulle varie applicazioni presenti in letteratura dei sistemi BCI e sulla realizzazione pratica di tali sistemi, con la descrizione dell'implementazione e dell'accuratezza ottenuta con diverse tecniche di analisi dei segnali cerebrali.

Questo lavoro è stato reso possibile grazie alle attività realizzate nell'ambito dei progetti:

- “SoBigData.it – Strengthening the Italian RI for Social Mining and Big Data Analytics”, finanziato dall'Unione Europea – NextGenerationEU – National Recovery and Resilience Plan (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, PNRR) – Prot. IR0000013 – Avviso n. 3264 del 28/12/2021;
- “COCOWEARS - A framework for Continuum COmputing WEARable Systems”, finanziato dall'Unione Europea – Next Generation EU, Missione 4 Componente 1 – the Italian Ministry of University and Research, PRIN 2022, grant n. 2022T2XNJE, CUP B53D23013190006.

1. Introduzione ai sistemi BCI

Le interfacce cervello-computer possono essere definite come sistemi che creano un collegamento diretto tra l'attività elettrica del cervello e dispositivi esterni. Tali sistemi sono cruciali non solo per migliorare la qualità della vita di persone affette da disabilità motorie, sensoriali o cognitive, ma anche per favorire lo sviluppo di applicazioni avanzate in settori come l'intrattenimento, l'educazione, la riabilitazione neuro-motoria, il controllo di dispositivi domestici intelligenti e persino la sicurezza.

L'evoluzione tecnologica, unita all'interesse per l'Internet delle Cose (Internet of Things, IoT), ha aperto nuove strade per l'utilizzo dei sistemi BCI. In particolare, i dispositivi indossabili dotati di elettrodi per elettroencefalogramma stanno diventando strumenti sempre più accessibili e funzionali, permettendo l'integrazione dei segnali cerebrali con dispositivi quotidiani, come smartphone, elettrodomestici e veicoli.

Questi dispositivi consentono un'interazione uomo-macchina senza precedenti, in cui i segnali cerebrali non sono solo interpretabili, ma anche utilizzabili per il controllo in tempo reale. Ciò apre scenari futuristici, come la possibilità di controllare robot assistivi, droni e sistemi domotici, o di utilizzare il cervello come "interfaccia universale" per la gestione di ambienti complessi.

Le tecnologie BCI possono essere classificate in base alla vicinanza fisica degli elettrodi al tessuto cerebrale:

- **non invasive:** sistemi che non richiedono interventi chirurgici e si basano su dispositivi posizionati esternamente al cuoio capelluto. Tecnologie come l'elettroencefalografia (EEG), la magnetoencefalografia (MEG) e l'imaging a risonanza magnetica (MRI) sono i principali esempi. Le BCI non invasive sono le più sicure e accessibili, ma possono soffrire di una ridotta risoluzione spaziale a causa della dispersione del segnale attraverso il cranio;
- **parzialmente invasive:** in questi sistemi, gli elettrodi vengono impiantati all'interno del cranio, ma restano al di fuori del cervello. Tecniche come l'elettrocorticografia (ECoG) e i metodi endovascolari offrono una migliore risoluzione spaziale rispetto ai sistemi non invasivi, pur mantenendo un rischio relativamente basso rispetto ai sistemi completamente invasivi;
- **invasive:** questi sistemi richiedono interventi chirurgici per impiantare elettrodi direttamente nel cervello o sotto il cuoio capelluto. La risoluzione spaziale e temporale è significativamente migliore, consentendo un accesso preciso ai segnali cerebrali. Tecnologie come gli array di microelettrodi vengono utilizzate per applicazioni avanzate, come la neuroprotesica e la ricerca neuroscientifica. Tuttavia, l'elevato rischio chirurgico e le problematiche legate alla biocompatibilità rappresentano ancora importanti sfide.

Il funzionamento delle BCI si basa sull'acquisizione, l'elaborazione e l'interpretazione dei segnali cerebrali, che vengono successivamente tradotti in comandi per il controllo di dispositivi esterni (Figura 1). I principali passaggi includono:

1. **Rilevamento dei segnali cerebrali:** i segnali, come le oscillazioni elettriche cerebrali (es. onde EEG), vengono raccolti tramite elettrodi posizionati sul cuoio capelluto o impiantati chirurgicamente, come sopra descritto;

2. **Elaborazione dei segnali:** i dati grezzi vengono filtrati per rimuovere il rumore ed altri disturbi ed elaborati per identificare le caratteristiche rilevanti per l'applicazione;
3. **Decodifica:** utilizzando algoritmi avanzati, spesso basati su machine learning, i segnali vengono interpretati per estrarre informazioni utili;
4. **Esecuzione del comando:** i segnali decodificati vengono trasformati in comandi che controllano dispositivi esterni, come computer, robot o applicazioni domotiche.

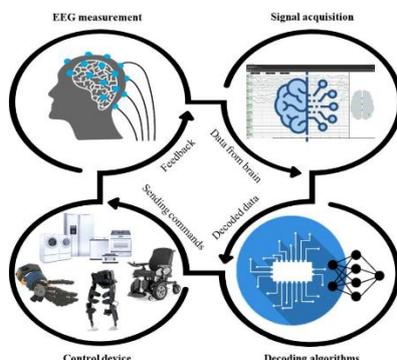


Figura 1 – Esempio di tipica applicazione BCI

Questo rapporto tecnico si concentra sui sistemi BCI basati sull'elettroencefalografia (EEG-based BCI), che sono tra i più studiati e utilizzati grazie alla loro natura non invasiva e alla relativa economicità. I sistemi EEG misurano l'attività elettrica del cervello tramite elettrodi posizionati sul cuoio capelluto, fornendo dati ad alta risoluzione temporale utili per numerose applicazioni, come ad esempio:

1. **Ambito medico e riabilitativo:** gli EEG-based BCI sono utilizzati per il controllo di neuroprotesi, per la riabilitazione di pazienti con ictus e per diagnosticare disturbi neurologici come l'epilessia;
2. **Gaming e intrattenimento:** la capacità di controllare giochi e simulatori con il pensiero offre esperienze immersive e personalizzate;
3. **Istruzione e formazione:** i sistemi EEG possono essere usati per monitorare lo stato cognitivo degli studenti, migliorando l'efficacia della formazione attraverso il biofeedback;
4. **Controllo ambientale e IoT:** l'integrazione con dispositivi intelligenti consente agli utenti di controllare luci, temperatura e altri elementi domestici attraverso comandi mentali;
5. **Ricerca neuroscientifica:** gli EEG-based BCI forniscono dati preziosi per lo studio delle funzioni cerebrali e dei processi cognitivi.

2. Struttura e Funzioni del Cervello

Il cervello umano può essere suddiviso in due parti principali: la corteccia cerebrale e le regioni subcorticali. Ognuna di queste aree svolge un ruolo fondamentale nel mantenimento delle funzioni essenziali per la sopravvivenza e per l'elaborazione cognitiva di ordine superiore. Sebbene la corteccia cerebrale e le regioni subcorticali abbiano funzioni distinte, lavorano in stretta

collaborazione per garantire il funzionamento armonioso del cervello. Questa complessa interazione tra le diverse parti del cervello non solo sostiene la vita quotidiana, ma permette anche l'adattamento a nuove esperienze, sottolineando l'incredibile plasticità e versatilità del sistema nervoso umano.

2.1. Le Regioni Subcorticali

Le regioni subcorticali si trovano al di sotto della corteccia cerebrale e sono responsabili del controllo delle funzioni di base e vitali del cervello, tra cui la regolazione del battito cardiaco, il mantenimento della temperatura corporea, la gestione della respirazione.

Oltre a queste funzioni fondamentali, le regioni subcorticali giocano un ruolo cruciale nell'elaborazione delle risposte emotive, come la paura e le azioni riflesse, che sono essenziali per la sopravvivenza. Ad esempio, la capacità di reagire rapidamente a una situazione di pericolo dipende da meccanismi situati in queste aree. Inoltre, le regioni subcorticali sono fondamentali per i processi di apprendimento e memoria, fornendo le basi neurofisiologiche che sostengono queste capacità cognitive.

Tra le principali strutture delle regioni subcorticali troviamo:

- **il talamo:** agisce come una stazione di smistamento per i segnali sensoriali e motori diretti alla corteccia cerebrale, filtrando e organizzando le informazioni;
- **l'ipotalamo:** regola l'omeostasi del corpo, inclusi il bilancio idrico, la temperatura e le funzioni endocrine, ed è fondamentale per la risposta allo stress e la regolazione del ciclo sonno-veglia;
- **l'amigdala:** è coinvolta nella gestione delle emozioni, in particolare nella paura e nell'aggressività, e nel riconoscimento delle emozioni negli altri;
- **l'ippocampo:** gioca un ruolo centrale nella formazione della memoria a lungo termine e nella navigazione spaziale, ed è spesso associato alla memoria episodica, cioè il ricordo di eventi personali.

2.2. La Corteccia Cerebrale

In contrasto con le regioni subcorticali, la corteccia cerebrale è considerata una struttura evolutivamente più recente e rappresenta la parte più esterna e più grande del cervello, caratterizzata da un'elevata complessità e da un'ampia gamma di funzioni. Risulta fondamentale per le capacità cognitive avanzate, come la risoluzione dei problemi, il pensiero astratto e la pianificazione, configurandosi quindi una componente chiave delle attività mentali di ordine superiore. Inoltre, è la sede della coscienza e della consapevolezza, consentendo all'essere umano di interpretare e interagire con l'ambiente in modo complesso e adattativo.

Questa regione è suddivisa in quattro lobi principali, ognuno dei quali è specializzato nell'elaborazione di specifiche informazioni cognitive e sensoriali:

- **lobo frontale:** è coinvolto nelle funzioni esecutive, come la pianificazione, il ragionamento, la risoluzione dei problemi e il controllo motorio volontario. È anche responsabile della regolazione delle emozioni e della presa di decisioni;

- **lobo parietale:** elabora le informazioni sensoriali provenienti dal corpo e svolge un ruolo chiave nell'orientamento spaziale, nella percezione tattile e nella navigazione;
- **lobo temporale:** è essenziale per l'elaborazione uditiva e la comprensione del linguaggio. Inoltre, è coinvolto nei processi di memoria e riconoscimento di pattern visivi e sonori;
- **lobo occipitale:** è principalmente responsabile dell'elaborazione delle informazioni visive, consentendo il riconoscimento di forme, colori e movimenti.

Grazie alla sua complessità e alla sua importanza nelle funzioni cognitive di alto livello, la corteccia cerebrale è il principale obiettivo della ricerca sulle interfacce cervello-computer. In particolare, le ricerche nel campo delle BCI si concentrano principalmente su come la corteccia cerebrale regola l'elaborazione sensoriale e motoria, oltre alle funzioni cognitive complesse. Tra i principali ambiti di studio troviamo:

- **elaborazione del linguaggio:** studio dei meccanismi attraverso cui il cervello interpreta e genera il linguaggio parlato e scritto;
- **riconoscimento di pattern:** analisi di come il cervello identifica e processa schemi visivi e uditivi;
- **pianificazione e organizzazione:** approfondimento dei processi cognitivi necessari per stabilire obiettivi e strategie per raggiungerli;
- **ragionamento e problem-solving:** studio della logica e dei meccanismi che il cervello utilizza per risolvere problemi complessi e prendere decisioni.

L'abilità della corteccia cerebrale di integrare e processare una vasta quantità di informazioni la rende una regione chiave per la comprensione della cognizione umana e per lo sviluppo di tecnologie avanzate che possano interfacciarsi con il cervello. La sua straordinaria complessità e la sua rilevanza nelle funzioni cerebrali superiori spiegano perché sia un elemento centrale nelle neuroscienze e nella ricerca sulle BCI.

3. Segnali cerebrali

Nella presente sezione, verranno illustrate le caratteristiche dei segnali cerebrali rilevati tramite elettroencefalografia, insieme agli standard internazionali di posizionamento degli elettrodi.

3.1. Caratteristiche dei Segnali Cerebrali Rilevati Tramite EEG

I segnali EEG rappresentano le oscillazioni dell'attività neuronale e sono caratterizzati da diverse proprietà, tra cui frequenza, ampiezza, localizzazione spaziale e variazione nel tempo.

3.1.1. Bande di Frequenza dei Segnali EEG

Tali segnali cerebrali possono essere suddivisi in diverse bande di frequenza (Figura 2), ognuna delle quali è correlata a specifiche attività cerebrali e stati mentali. Questa suddivisione permette di

comprendere meglio il funzionamento del cervello in condizioni differenti, dalla veglia all'attenzione focalizzata, fino agli stati di rilassamento e sonno profondo.

Nella Tabella 1 viene riportata una classificazione dettagliata delle bande EEG in base alla frequenza e alle attività mentali a cui sono associate. Analizzando questa classificazione, si può osservare che il passaggio da frequenze più basse a frequenze più alte corrisponde a una transizione negli stati di coscienza, che spaziano da condizioni di sonno profondo e rilassamento (associate alle onde Delta e Theta) fino a stati di attenzione, elaborazione cognitiva e consapevolezza intensa (associati alle onde Alpha, Beta e Gamma).

Ogni banda di frequenza gioca un ruolo essenziale nella regolazione delle funzioni cerebrali, contribuendo a determinare la nostra capacità di concentrarci, apprendere, risolvere problemi e persino percepire il mondo circostante. Questa suddivisione fornisce una base solida per numerosi studi neuroscientifici, oltre a costituire un pilastro fondamentale per lo sviluppo di tecnologie BCI e applicazioni nel campo della neurologia e della psicologia cognitiva.

Band	Frequency Range (Hz)	Associated Functions
Delta (δ)	0.5 - 4 Hz	Deep sleep, unconscious states, brain regeneration activity. Dominant in infants and during deep sleep.
Theta (θ)	4 - 7 Hz	Light sleep, dreams, deep relaxation, meditation, drowsiness states. Also associated with creative processes and problem-solving.
Alpha (α)	7 - 13 Hz	Relaxed awake state with eyes closed, light meditation, relaxed wakefulness. Predominant in occipital and parietal regions when a person is relaxed but awake with eyes closed.
Mu (μ)	7 - 13 Hz	Similar to Alpha band in the frequency range, but specific to sensorimotor cortex (C3, Cz, C4 electrodes). "Suppressed" or "desynchronized" during movement or intention to move.
Beta (β)	13 - 30 Hz	Active wakeful state, concentration, intense mental activity, anxiety, tension. Often divided into three sub-bands: Low Beta (13-15 Hz), Mid Beta (15-20 Hz), and High Beta (20-30 Hz). Found in frontal and parietal lobes.
Gamma (γ)	30 - 100 Hz	Higher cognitive functions, integrated sensory perception, focused attention, learning and memory. Binds diverse neurons during simultaneous brain information processing. Optimal levels associated with good memory. Deficiencies linked to learning disabilities.

Tabella 1 – Classificazione delle bande di frequenza dei segnali EEG

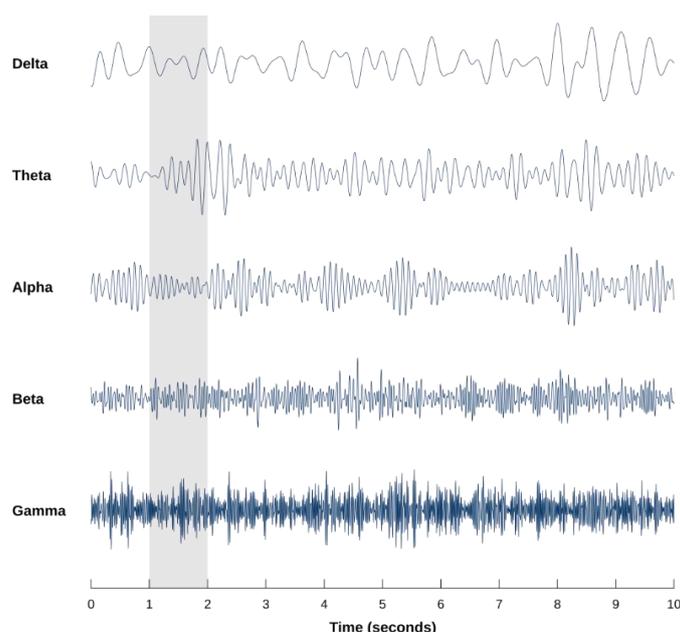


Figura 2 – Segnali EEG nelle diverse bande di frequenza

Di seguito sono descritte in maggiore dettaglio le principali bande di frequenza, il loro significato e i contesti in cui vengono utilizzate.

3.1.1.1. *Onde Delta (0.5 – 4 Hz)*

- **Caratteristiche:**
 - sono le onde EEG a frequenza più bassa e ad ampiezza più elevata;
 - predominano nelle fasi di sonno profondo (NREM3-NREM4) e durante stati di coma o anestesia profonda;
 - sono più evidenti nelle regioni frontali del cervello.
- **Significato funzionale:**
 - indicano uno stato di riposo e rigenerazione cerebrale;
 - sono coinvolte nei processi di riparazione cellulare e consolidamento della memoria;
 - un aumento anomalo delle onde delta in soggetti svegli può essere correlato a danni cerebrali, traumi cranici o disturbi neurodegenerativi.
- **Applicazioni:**
 - monitoraggio della qualità del sonno e dei disturbi come l'insonnia e la narcolessia;
 - utilizzate nella diagnosi di disturbi neurologici (Alzheimer, Parkinson, epilessia).

3.1.1.2. *Onde Theta (4 – 7 Hz)*

- **Caratteristiche:**
 - frequenza medio-bassa con ampiezza moderata;
 - più evidenti nelle aree temporali, frontali;
 - presenti durante stati di sonnolenza, meditazione, ipnosi e creatività.
- **Significato funzionale:**
 - associate ai processi di memoria ed apprendimento, in particolare nel consolidamento dei ricordi;
 - favoriscono la creatività e gli stati di introspezione;
 - presenti negli stati pre-onirici (fase 1 del sonno).
- **Applicazioni:**
 - studi sull'apprendimento accelerato e sulla memoria;
 - tecniche di biofeedback per migliorare la concentrazione e ridurre l'ansia;
 - utilizzate in BCI per rilevare stati cognitivi di rilassamento e attenzione profonda.

3.1.1.3. *Onde Alpha (7 – 13 Hz)*

- **Caratteristiche:**
 - presenti in stati di rilassamento vigile, con occhi chiusi e senza stimoli cognitivi intensi;
 - predominano nella corteccia occipitale e parietale;
 - bloccate quando una persona apre gli occhi o inizia un'attività mentale intensa.
- **Significato funzionale:**

- indicano uno stato di equilibrio tra eccitazione e rilassamento;
- importanti per la regolazione dell'attenzione e della consapevolezza interna;
- associate alla capacità di ridurre lo stress e migliorare la concentrazione.
- Applicazioni:
 - utilizzate per valutare livelli di stress, ansia e disturbi dell'attenzione (ADHD);
 - tecniche di neurofeedback per migliorare rilassamento e gestione dello stress;
 - BCI basate su ERD (Event-Related Desynchronization): la diminuzione dell'ampiezza alpha può indicare attenzione o intenzione di movimento.

3.1.1.4. Onde Beta (13 – 30 Hz)

- Caratteristiche:
 - frequenza medio-alta, con ampiezza più bassa rispetto alle onde lente;
 - prevalenti nelle aree frontali e motorie;
 - aumentano durante stati di concentrazione, problem-solving e attività motoria.
- Significato funzionale:
 - associate all'attività corticale attiva, come ragionamento, calcoli matematici e attenzione;
 - regolano la pianificazione e il controllo motorio;
 - una presenza eccessiva di onde beta può essere associata a stress, ansia o insonnia.
- Applicazioni:
 - monitoraggio di stati di attenzione e carico cognitivo;
 - utilizzate in BCI motorie basate su ERD/ERS: la diminuzione dell'attività beta nella corteccia motoria è correlata all'intenzione di movimento;
 - tecniche di neurofeedback per il trattamento dell'ansia.

3.1.1.5. Onde Gamma (30 – 100 Hz)

- Caratteristiche:
 - frequenza più elevata e ampiezza molto ridotta;
 - generate dall'attività sincrona di reti neuronali distribuite;
 - difficili da rilevare con EEG convenzionale a causa della bassa ampiezza e della sensibilità agli artefatti muscolari.
- Significato funzionale:
 - coinvolte nella percezione sensoriale, coscienza e integrazione delle informazioni;
 - regolano i processi di apprendimento, memoria a lungo termine e attenzione selettiva;
 - studi suggeriscono che siano cruciali per la coordinazione di informazioni tra diverse aree cerebrali.
- Applicazioni:
 - analisi della consapevolezza e del processamento multisensoriale;
 - studi sul ruolo delle onde gamma in disturbi neurologici come il morbo di Alzheimer;
 - utilizzate in BCI avanzate per analizzare l'integrazione cognitiva e percettiva.

Oltre alle classiche bande di frequenza EEG sopra descritte (Delta, Theta, Alpha, Beta e Gamma), un ruolo particolarmente rilevante nelle interfacce cervello-computer e nelle neuroscienze cognitive è svolto dalla *Banda Mu*, una particolare oscillazione cerebrale che si colloca nella gamma delle onde Alpha (7-13 Hz) ma ha caratteristiche funzionali distinte:

- localizzazione: prevalente nelle aree sensorimotorie, in particolare nella corteccia motoria e somatosensoriale;
- stato funzionale: associata al controllo motorio e all'immaginazione motoria;
- blocco della banda Mu (Mu Suppression): si verifica una desincronizzazione della banda Mu (Mu-ERD, Event-Related Desynchronization) durante il movimento attivo o anche solo quando si immagina di muovere una parte del corpo.

La Banda Mu quindi è una componente EEG cruciale in particolare per lo studio delle funzioni motorie e cognitive. Il suo ruolo nei processi di immaginazione del movimento, controllo motorio e riconoscimento delle azioni la rende una delle bande più studiate nelle neuroscienze applicate alle BCI.

3.1.2. Modulazione Temporale

L'EEG è caratterizzato da variazioni dinamiche nel tempo, legate a cambiamenti negli stati mentali e nei processi cerebrali. Il segnale presenta:

- oscillazioni spontanee, che riflettono l'attività cerebrale di base nelle diverse bande di frequenza;
- variazioni indotte da stimoli esterni o attività interne, che possono manifestarsi come aumento (sincronizzazione) o riduzione (desincronizzazione) dell'ampiezza in determinate frequenze.

Queste variazioni temporali forniscono informazioni preziose sulle dinamiche cerebrali, permettendo di studiare processi come la regolazione dello stato di coscienza, l'attenzione e il controllo motorio.

3.1.3. Localizzazione Spaziale

I segnali EEG sono registrati tramite elettrodi posti sulla superficie del cuoio capelluto. Tali segnali sono caratterizzati da un'elevata risoluzione temporale (millisecondi), ma una bassa risoluzione spaziale rispetto ad altre tecniche come fMRI o ECoG, a causa delle proprietà conduttive del cranio e dei tessuti cerebrali.

La localizzazione spaziale dell'attività EEG dipende da vari fattori:

1. posizionamento degli elettrodi: sistemi standardizzati, come il 10-20 o il 10-10, permettono di ottenere una mappatura affidabile dell'attività cerebrale (come vedremo più avanti);
2. origine delle oscillazioni EEG: le attività elettriche registrate derivano principalmente dai potenziali postsinaptici della corteccia cerebrale, generati dai neuroni piramidali;
3. effetti di volume conduction: poiché il cranio e il liquido cerebrospinale diffondono il segnale, l'attività registrata su un elettrodo può essere influenzata da regioni cerebrali distanti, riducendo la precisione della localizzazione della sorgente.

Per migliorare l'accuratezza spaziale del segnale EEG, vengono impiegate tecniche avanzate come:

- l'aumento del numero di elettrodi, per ottenere una mappa più dettagliata dell'attività cerebrale;
- metodi di source localization, come l'algoritmo LORETA (Low-Resolution Brain Electromagnetic Tomography), che cercano di stimare la posizione delle fonti del segnale all'interno del cervello.

3.1.4. Artefatti e Rumore nel Segnale EEG

Uno dei principali ostacoli nell'analisi EEG è la presenza di artefatti, ovvero segnali non cerebrali che contaminano la registrazione. Gli artefatti possono avere diverse origini:

1. Artefatti fisiologici

- **Attività muscolare (EMG):** Movimenti involontari o tensione dei muscoli facciali e del collo possono generare segnali ad alta frequenza che sovrappongono l'EEG;
- **Movimenti oculari e battito cardiaco:** L'attività dei muscoli oculari (blinking e movimenti saccadici) e il segnale cardiaco (ECG) possono introdurre variazioni ampie e lente nel segnale EEG.

2. Artefatti ambientali

- **Interferenze elettromagnetiche:** Dispositivi elettronici, linee elettriche e strumentazione nelle vicinanze possono introdurre rumore a 50/60 Hz nella registrazione;
- **Contatto imperfetto degli elettrodi:** Un cattivo contatto elettrodo-cuoio capelluto può generare fluttuazioni imprevedibili nel segnale.

3. Artefatti tecnici

- **Movimenti del soggetto:** Spostamenti della testa o cambiamenti nella postura possono causare variazioni di impedenza e distorsioni nel segnale;
- **Drift del segnale e rumore di bassa frequenza,** dovuti alle caratteristiche del sistema di amplificazione EEG.

Per ridurre l'impatto degli artefatti, si utilizzano diversi metodi di preprocessing:

- Filtri digitali per eliminare il rumore ambientale (es. notch filter a 50/60 Hz);
- Algoritmi di rimozione degli artefatti come l'Analisi delle Componenti Indipendenti (ICA), che separa le fonti cerebrali dalle componenti di rumore;
- Metodi di interpolazione per correggere il segnale in caso di elettrodi con contatti scadenti.

3.2. Sistemi Standard di Posizionamento degli Elettrodi EEG

Per ottenere registrazioni EEG affidabili e riproducibili, è essenziale che gli elettrodi siano posizionati in maniera precisa e standardizzata. A tal fine, sono stati sviluppati diversi sistemi di posizionamento, adottati a livello internazionale sia in ambito clinico che nella ricerca neuroscientifica, tra i quali quelli più utilizzati sono:

- **Il sistema 10-20,** che prevede 21 posizioni di elettrodi e offre una copertura generale della corteccia cerebrale, spesso usato in ambito clinico e diagnostico.
- **Il sistema 10-10,** che comprende 74 posizioni di elettrodi, fornendo una maggiore risoluzione spaziale ed è più adatto per ricerche avanzate e mappature cerebrali dettagliate.

Il nome di questi sistemi si riferisce alla percentuale di distanza tra elettrodi adiacenti rispetto alla lunghezza totale del cranio nelle direzioni antero-posteriore e destra-sinistra.

3.2.1. Il sistema 10-20

Tale sistema è stato introdotto da Herbert Jasper nel 1958 come un metodo per standardizzare il posizionamento degli elettrodi EEG tra diversi laboratori e ospedali. Prevede 21 posizioni di elettrodi, distribuite in modo uniforme sulla superficie del cuoio capelluto. Il nome "10-20" deriva dal criterio secondo cui la distanza tra gli elettrodi è il 10% o il 20% della lunghezza totale del cranio nelle direzioni antero-posteriore e laterale.

Caratteristiche principali del sistema 10-20:

- Offre una copertura globale della corteccia cerebrale, permettendo di registrare segnali da aree motorie, sensoriali, occipitali e frontali.
- È ampiamente utilizzato in neurologia clinica, soprattutto per diagnosticare epilessia, disturbi del sonno e patologie neurologiche.
- È lo standard più diffuso nei protocolli medici per EEG convenzionale e polisomnografia.

Studi come quelli di Klem et al. (1999) hanno dimostrato che il sistema 10-20 garantisce un buon compromesso tra copertura spaziale e semplicità di applicazione, rendendolo ideale per il monitoraggio EEG standardizzato.

3.2.2. Il sistema 10-10

Per studi che richiedono una maggior risoluzione spaziale, è stato sviluppato il sistema 10-10, un'estensione del 10-20 che aumenta il numero di elettrodi a 74 posizioni. Questo sistema è basato sulla suddivisione ulteriore delle distanze tra gli elettrodi del 10-20, riducendo la separazione tra punti di registrazione e migliorando la capacità di localizzare attività cerebrali specifiche.

Caratteristiche principali del sistema 10-10:

- Consente una maggiore precisione nella localizzazione delle sorgenti EEG, utile per studi di connettività cerebrale, mappatura funzionale e analisi dei ritmi corticali;
- È particolarmente impiegato nella ricerca sui sistemi BCI e nella neurofisiologia sperimentale;
- L'uso di più elettrodi migliora la capacità di rilevare segnali deboli e localizzati, come le oscillazioni Gamma o le variazioni di attività nelle aree corticali profonde.

Uno studio di Koessler et al. (2009) ha evidenziato come il sistema 10-10 offra una risoluzione spaziale quasi doppia rispetto al 10-20, rendendolo ideale per studi dettagliati dell'attività cerebrale.

3.2.3. Principi di posizionamento e convenzioni di nomenclatura

Entrambi i sistemi utilizzano una nomenclatura standardizzata per indicare la posizione degli elettrodi:

- le lettere indicano la regione del cervello:
 - **F** (Frontal), **C** (Central), **P** (Parietal), **O** (Occipital), **T** (Temporal).
- i numeri differenziano gli elettrodi in base alla loro posizione:

4. Classificazione dei segnali di controllo per sistemi BCI

I sistemi BCI basati su EEG sfruttano i segnali provenienti direttamente dall'attività cerebrale per facilitare la comunicazione e il controllo di dispositivi esterni, senza bisogno di movimenti muscolari. Tuttavia, alcuni segnali EEG sono più facili da estrarre rispetto ad altri e spesso necessitano di fasi di pre-elaborazione complesse per migliorarne la qualità e la capacità di discriminazione.

In particolare, tali sistemi BCI si focalizzano sull'identificazione delle modifiche nei pattern cerebrali, prodotti in risposta ad eventi specifici (come stimoli sensoriali, movimenti motorii immaginati o compiti cognitivi) o come attività spontanea (non direttamente associati quindi a stimoli o compiti particolari, ma che possono essere modulati volontariamente dall'utente).

La Figura 4 mostra la classificazione più comune dei segnali di controllo utilizzati nei sistemi BCI basati su EEG. Come già accennato, una prima distinzione suddivide i segnali ricavati dall'attività cerebrale in potenziali evento-correlati (Event-Related Potentials, ERP) e segnali spontanei. Tuttavia, ci sono anche segnali di controllo che possono essere estratti dal segnale EEG senza derivare direttamente dall'attività neuronale, come meglio descritto nei paragrafi che seguono.

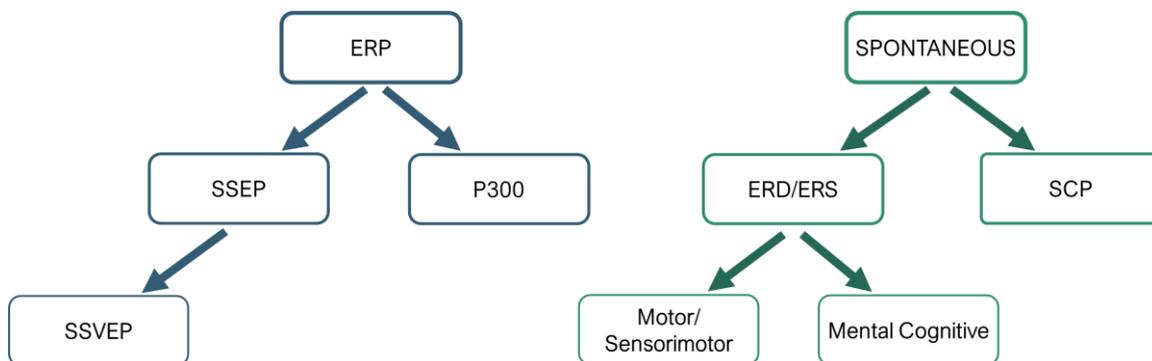


Figura 4 – Classificazione segnali di controllo BCI

4.1. Segnali ERP

I potenziali evento-correlati sono segnali cerebrali generati automaticamente e inconsciamente in risposta a uno stimolo esterno di natura sensoriale, come uno stimolo visivo, uditivo o tattile. Questi segnali EEG rappresentano la risposta del sistema nervoso centrale a eventi specifici e sono ampiamente utilizzati nei sistemi BCI per il loro carattere riproducibile e per la loro elevata affidabilità nel rilevamento di intenzioni o stati cognitivi dell'utente. All'interno di tale categoria, è possibile distinguere diverse sottoclassi di segnali, tra cui i Potenziali Evocati di stato-stazionario (Steady-State Evoked Potentials - SSEP) e il P300, entrambi ampiamente impiegati nelle interfacce neurali per il controllo di dispositivi esterni e la comunicazione assistiva.

4.1.1. Potenziali Evocati di stato-stazionario (SSEP)

Sono segnali EEG che presentano una forte correlazione con la frequenza di stimoli esterni ripetitivi e periodici. Quando un soggetto viene esposto a stimoli che si ripetono con una cadenza regolare (ad esempio immagini che lampeggiano, suoni modulati o vibrazioni tattili), il cervello risponde

generando oscillazioni elettriche con la stessa frequenza dello stimolo oppure con i suoi multipli interi (armoniche).

4.1.1.1. SSVEP

Uno dei sottotipi più studiati di SSEP è lo Steady-State Visual Evoked Potential (SSVEP), che si manifesta nella corteccia visiva quando un soggetto osserva uno stimolo visivo intermittente, come un'immagine che lampeggia a una frequenza compresa tipicamente tra 6 e 30 Hz. Questa risposta cerebrale è fortemente sincronizzata con la frequenza dello stimolo (Figura 5), rendendola identificabile attraverso tecniche di analisi spettrale dei segnali EEG.

Gli SSVEP trovano applicazione in diversi contesti di interfacce cervello-computer, in particolare nelle interfacce grafiche basate su stimoli visivi multipli. Un tipico esempio di utilizzo è la realizzazione di un'interfaccia in cui diversi pulsanti su uno schermo lampeggiano a frequenze diverse: quando un utente quindi concentra lo sguardo su un particolare pulsante lampeggiante, il suo cervello genera un segnale EEG che rispecchia la frequenza dello stimolo visivo corrispondente. Un sistema di elaborazione del segnale EEG può rilevare questa frequenza e identificare su quale pulsante l'utente sta focalizzando l'attenzione. Questa tecnica consente, ad esempio, di selezionare opzioni su uno schermo, controllare dispositivi domotici, navigare in un'interfaccia virtuale o persino scrivere testi utilizzando una tastiera visiva basata su SSVEP.

Uno dei vantaggi principali degli SSVEP nei sistemi BCI è la loro elevata robustezza e accuratezza nel riconoscimento del comando, poiché la risposta EEG generata è facilmente distinguibile dalle altre attività cerebrali spontanee. Questo fenomeno consente di distinguere tra numerosi comandi in base alle specifiche frequenze di lampeggio degli stimoli. Inoltre, a differenza di altri segnali EEG, gli SSVEP richiedono un addestramento minimo da parte dell'utente, il che li rende particolarmente utili per applicazioni pratiche e accessibili. Tuttavia, l'uso prolungato di interfacce basate su SSVEP può affaticare visivamente il soggetto e non è indicato per persone con particolari condizioni visive o epilessia fotosensibile. Per mitigare questi effetti, vengono studiate strategie per ridurre il discomfort, come l'uso di stimoli visivi meno invasivi o la combinazione degli SSVEP con altri segnali EEG per migliorare l'usabilità complessiva del sistema.

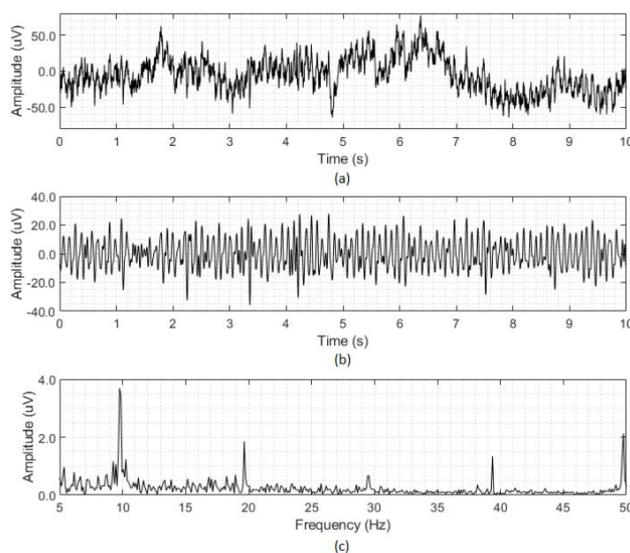


Figura 5 – Esempio di segnale SSVEP ottenuto con uno stimolo a 10 Hz

4.1.2. P300

Si tratta di un particolare tipo di potenziale evento-correlato (ERP) associato a processi neurali fondamentali come l'allocazione dell'attenzione, la memoria di lavoro e la presa di decisioni. Questo segnale riflette la capacità del cervello di distinguere e rispondere a stimoli rilevanti, rendendolo un indicatore chiave nelle ricerche sull'elaborazione cognitiva e nelle applicazioni delle interfacce cervello-computer. Si osserva principalmente nei lobi parietali, frontali e centrali lungo la linea mediana del cervello.

Il segnale P300 si manifesta tipicamente circa 300 ms dopo che un individuo è stato esposto a uno stimolo raro o inatteso. Questo segnale viene comunemente evocato attraverso il paradigma "odd-ball", in cui il soggetto deve prestare attenzione a una sequenza di stimoli in cui quelli di interesse (target) sono mescolati in modo casuale tra stimoli più frequenti e irrilevanti (non-target). Ad esempio, il soggetto potrebbe vedere ripetutamente l'immagine di un gatto (stimolo non-target), mentre a intervalli meno frequenti compare l'immagine di un albero (stimolo target). Quando il soggetto è concentrato nell'identificare lo stimolo raro (l'albero), la risposta cerebrale associata a questo evento si distingue da quella generata dagli stimoli più comuni, consentendo di misurare e analizzare queste differenze (come si può osservare nella Figura 6).

Uno dei primi esempi di applicazione pratica è stato un sistema di scrittura controllato dal cervello: su uno schermo viene mostrata una matrice di lettere, ognuna delle quali lampeggia in modo casuale. Quando la lettera desiderata dall'utente si illumina, la sua attenzione genera un segnale P300 che il sistema interpreta per effettuare la selezione.

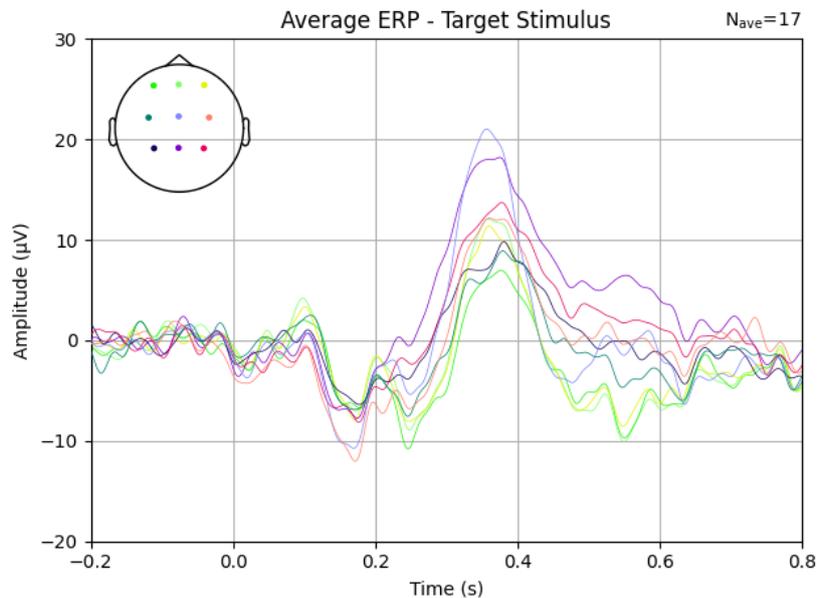


Figura 6 - Esempio di segnale P300

4.2. Segnali spontanei

I segnali spontanei sono generati volontariamente dal soggetto senza la necessità di alcuno stimolo esterno. A differenza di quelli ERP quindi, che derivano da risposte cerebrali a eventi specifici, tali segnali riflettono attività neurali autoindotte e possono essere modulati intenzionalmente dall'utente.

Questi segnali si suddividono principalmente in due categorie:

- potenziali corticali lenti (SCP, Slow Cortical Potentials)
- variazioni della potenza ritmica, note come Desincronizzazione/Sincronizzazione Evento-Correlata (ERD/ERS, Event-Related Desynchronization/Synchronization).

4.2.1. Potenziali corticali lenti (SCP)

Sono segnali EEG caratterizzati da frequenze inferiori a 1 Hz: le loro variazioni si sviluppano in un intervallo di tempo che può andare da millisecondi a diversi secondi. Questi potenziali a bassa frequenza rappresentano variazioni lente del potenziale elettrico della corteccia cerebrale e sono principalmente osservabili nelle regioni frontali e centrali del cervello. Gli SCP riflettono processi neurali di lunga durata e possono essere associati a stati di attivazione o inibizione corticale. Questi segnali sono stati studiati in relazione a diverse funzioni cognitive e motorie, tra cui l'attenzione sostenuta, la pianificazione del movimento e la regolazione degli stati di vigilanza.

Tuttavia, tali segnali non sono generalmente preferiti nelle interfacce cervello-computer (BCI) a causa della loro estrema lentezza, che rende difficile la loro integrazione in sistemi che richiedono risposte rapide. Inoltre, il controllo volontario di questi segnali richiede un lungo addestramento, poiché la modulazione consapevole degli SCP non è immediata come per altri segnali EEG, come l'ERD/ERS o il P300.

4.2.2. Desincronizzazione/Sincronizzazione Evento-Correlata (ERD/ERS)

Rappresentano un fenomeno neurale che riflette le variazioni della potenza delle oscillazioni cerebrali in risposta a specifici eventi cognitivi o motori, in una determinata banda di frequenza. Questi cambiamenti riflettono l'attivazione o l'inibizione di gruppi di neuroni in diverse aree corticali e sono ampiamente utilizzati nelle interfacce cervello-computer.

I segnali ERD/ERS vengono identificati attraverso specifiche variazioni dell'attività cerebrale in relazione all'esecuzione di un compito. In particolare, come illustrato in Figura 7, si osserva una diminuzione dell'attività neurale prima e durante l'esecuzione del compito, denominata Desincronizzazione Evento-Correlata (ERD - Event-Related Desynchronization). Questo processo riflette un aumento dell'attivazione neuronale in aree specifiche del cervello, indicando che tali regioni stanno elaborando informazioni sensoriali, motorie o cognitive. Una volta completato il compito, indipendentemente dal fatto che sia stato eseguito fisicamente o semplicemente immaginato, l'attività cerebrale ritorna ai livelli basali attraverso un processo opposto, chiamato Sincronizzazione Evento-Correlata (ERS - Event-Related Synchronization). L'ERS è caratterizzato da un incremento della potenza delle oscillazioni cerebrali nelle bande di frequenza coinvolte, segnalando una fase di recupero e di riorganizzazione dell'attività neuronale.

I segnali ERD/ERS si suddividono in due principali categorie:

- Segnali motori e sensomotori;
- Segnali cognitivi mentali.

4.2.2.1. Segnali motori e sensomotori

Sono strettamente legati all'attività motoria e ai processi sensomotori, come il movimento degli arti o la preparazione all'azione. Sono principalmente generati nella corteccia motoria e sono caratterizzati da variazioni di potenza nelle bande di frequenza μ (7-13 Hz) e β (13-30 Hz).

I segnali motori e sensomotori possono emergere in due condizioni:

- **movimento reale**: quando il soggetto esegue fisicamente un'azione, come sollevare un braccio o muovere una gamba;
- **immaginazione motoria (*motor imagery*)**: quando il soggetto immagina mentalmente di compiere un movimento senza eseguirlo fisicamente. Questo fenomeno è alla base di molte applicazioni BCI, consentendo agli utenti di controllare dispositivi esterni, come protesi neurali o cursori su uno schermo, semplicemente immaginando un'azione.

4.2.2.2. Segnali cognitivi mentali

Anche attività cognitive complesse possono generare variazioni nei ritmi EEG attraverso il meccanismo ERD/ERS. Questi segnali emergono durante compiti mentali che richiedono elaborazione cognitiva senza un coinvolgimento motorio diretto. Alcuni esempi includono:

- Immaginazione musicale: la riproduzione mentale di melodie o suoni;
- Conteggio visivo: il monitoraggio mentale di elementi visivi, come contare oggetti in una scena;
- Rotazione mentale: l'immaginazione di oggetti nello spazio, utilizzata per valutare la capacità di manipolazione mentale delle forme;
- Calcoli matematici: la risoluzione mentale di operazioni aritmetiche.

Questi segnali sono particolarmente rilevanti per le BCI basate su attività cognitive, permettendo il controllo di sistemi tecnologici senza la necessità di movimenti fisici, con potenziali applicazioni nel supporto alle persone con gravi disabilità motorie.

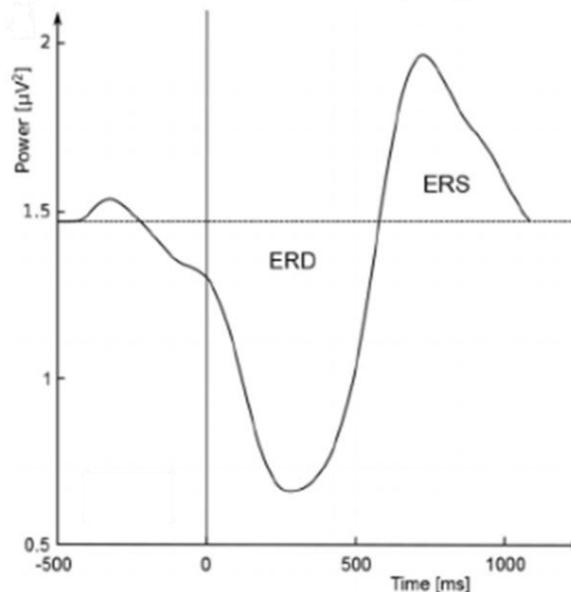


Figura 7 - Esempio di segnale ERD/ERS

4.2.2.3. Altro segnale di controllo

Un altro schema di segnale riconosciuto nei segnali EEG e utilizzato in alcuni sistemi BCI è il **segnale del battito di ciglia**. Questo segnale è generato principalmente dall'attività elettrica dei muscoli facciali attorno agli occhi piuttosto che da un'attività neuronale diretta all'interno del cervello. Per questo motivo, viene generalmente classificato come un movimento muscolare piuttosto che come un comando mentale derivato direttamente dai segnali cerebrali.

Nelle applicazioni BCI, tale segnale può essere gestito in modi differenti a seconda del contesto d'uso:

- artefatto da rimuovere: in molte applicazioni EEG, questi segnali sono considerati rumore che può interferire con l'analisi delle onde cerebrali. Poiché il movimento delle palpebre genera potenziali elettrici relativamente intensi, questi segnali possono sovrapporsi a quelli di interesse e compromettere l'accuratezza dell'interpretazione EEG. Per questo motivo, vengono spesso filtrati o eliminati attraverso tecniche di elaborazione del segnale;
- comando volontario: in altre applicazioni BCI, questo segnale viene sfruttato come un mezzo di controllo intenzionale. Ad esempio, il riconoscimento di uno o più battiti di ciglia può essere utilizzato per attivare selezioni, confermare scelte, o controllare dispositivi. Questo approccio è particolarmente utile per utenti con disabilità motorie, poiché consente loro di interagire con sistemi tecnologici attraverso un movimento facciale semplice e naturale.

L'integrazione di tale segnale nelle BCI dimostra come sia possibile combinare segnali cerebrali con segnali di origine muscolare per migliorare l'interfaccia uomo-macchina, offrendo maggiore flessibilità e accessibilità nelle applicazioni di assistenza e comunicazione.

5. Tool Software e Dataset

Esistono diversi tool e librerie software disponibili, molti dei quali gratuiti, per l'analisi e l'implementazione di sistemi BCI basati su EEG. Di seguito se ne elencano alcuni tra i più significativi ed utilizzati:

- **OpenViBE**: è una piattaforma software dedicata alla progettazione, al test e all'uso di interfacce cervello-computer. Questa piattaforma è pensata per supportare lo sviluppo e la sperimentazione di applicazioni neuroscientifiche in tempo reale, consentendo agli utenti di acquisire, filtrare, processare, classificare e visualizzare segnali cerebrali in tempo reale. Le sue funzionalità principali includono:
 - o acquisizione dei segnali cerebrali: supporta diverse modalità di acquisizione dei segnali EEG, facilitando l'interfacciamento con dispositivi hardware per la registrazione dei dati cerebrali;
 - o elaborazione in tempo reale: è in grado di processare i segnali EEG istantaneamente, permettendo l'applicazione di filtri e tecniche di pre-elaborazione per migliorare la qualità del segnale;
 - o classificazione dei segnali: la piattaforma offre strumenti per classificare le diverse tipologie di segnali cerebrali illustrate in precedenza;
 - o visualizzazione dei dati: fornisce strumenti grafici per la visualizzazione dei segnali EEG e dei risultati del processamento, consentendo di monitorare e interpretare facilmente le informazioni in tempo reale.

- **BCI2000**: è un sistema software open-source e multiuso progettato per la ricerca sulle interfacce cervello-computer (BCI). Questa piattaforma fornisce una serie di strumenti software avanzati che consentono di acquisire e processare dati EEG, presentare stimoli e feedback, e gestire l'interazione con dispositivi esterni, come ad esempio braccia robotiche. Le principali caratteristiche di BCI2000 includono:
 - acquisizione e processamento dei dati: BCI2000 permette di acquisire segnali EEG e altri bio-segnali, offrendo potenti strumenti per il trattamento in tempo reale dei dati, inclusi filtri e algoritmi di classificazione per distinguere vari tipi di segnali cerebrali;
 - presentazione di stimoli e feedback: la piattaforma supporta la presentazione di stimoli visivi, acustici e tattili, utilizzando questi feedback per motivare l'utente e guidare l'interazione con il sistema;
 - interazione con dispositivi esterni: BCI2000 è compatibile con una vasta gamma di dispositivi hardware, come braccia robotiche, dispositivi di tracciamento oculare (eye-trackers) e dispositivi di input tradizionali come il mouse, permettendo il controllo di strumenti esterni tramite segnali cerebrali;
 - sistema in tempo reale: la piattaforma è progettata per sincronizzare i segnali EEG con altri bio-segnali e dispositivi di input, consentendo una comunicazione immediata tra il cervello e il dispositivo di output in tempo reale.

- **Matlab** (EEGLAB, FieldTrip, BCILAB, etc)

- **Python** (MNE, etc)

I principali dataset disponibili sono i seguenti:

- DEAP (<https://www.eecs.qmul.ac.uk/mmv/datasets/deap/index.html>)
- BCI Competitions (<https://www.bbc.de/competition/>)
- <https://bnci-horizon-2020.eu/database/data-sets>
- https://sites.google.com/site/fabienlotte/bci-community/links?authuser=0#h.p_ID_172
- <https://physionet.org/content/eegmidb/1.0.0/> (<https://physionet.org/about/database/>)
- SEED dataset (<https://bcmi.sjtu.edu.cn/home/seed/seed.html>)

Conclusioni

In questo rapporto tecnico sono stati descritti in modo sistematico i fondamenti teorici e pratici delle interfacce cervello-computer (BCI), con particolare attenzione ai sistemi basati su elettroencefalografia (EEG). Dopo una premessa generale sulle BCI e sui loro campi applicativi (dalla riabilitazione alla domotica, dall'intrattenimento alla ricerca neuroscientifica), è stata approfondita la struttura del cervello, distinguendo tra regioni subcorticali e corteccia cerebrale, per comprendere i meccanismi neurofisiologici alla base dei segnali cerebrali.

La sezione dedicata ai segnali EEG ha illustrato le caratteristiche principali di queste oscillazioni, incluse le bande di frequenza (Delta, Theta, Alpha, Beta, Gamma e Mu), la loro rilevanza funzionale e le applicazioni nelle neuroscienze e nei sistemi BCI. Sono stati descritti anche i problemi legati ad artefatti e rumore e l'importanza di utilizzare sistemi standard di posizionamento degli elettrodi (come il 10-20 e il 10-10) per garantire la qualità e la riproducibilità dei dati.

Il rapporto ha inoltre classificato i segnali di controllo EEG per le BCI in:

- Event-Related Potentials (ERP), come gli SSVEP e il P300, che permettono la comunicazione assistiva grazie a risposte riproducibili a stimoli esterni;
- Segnali spontanei, come gli SCP e i pattern di desincronizzazione/sincronizzazione evento-correlata (ERD/ERS), che possono riflettere sia attività motorie (reali o immaginate) sia cognitive.

Sono stati trattati anche aspetti pratici e risorse disponibili per la realizzazione di sistemi BCI, come tool software (OpenViBE, BCI2000, EEGLAB, MNE) e dataset pubblici utili per lo sviluppo e la validazione degli algoritmi di elaborazione del segnale.

I sistemi BCI sono al centro di un'evoluzione tecnologica accelerata, trainata dall'integrazione con tecnologie emergenti come l'intelligenza artificiale, la realtà virtuale e l'Internet of Things (IoT). Questa convergenza apre nuove prospettive in termini di precisione, affidabilità e portabilità, rendendo le interfacce cervello-computer strumenti sempre più promettenti per applicazioni quotidiane e specialistiche.

L'elettroencefalografia (EEG), grazie alla sua elevata risoluzione temporale, si conferma una delle tecniche più accessibili e diffuse per monitorare l'attività cerebrale, offrendo un valido supporto sia nella ricerca neuroscientifica sia nello sviluppo di soluzioni BCI non invasive. Tuttavia, la limitata risoluzione spaziale e la vulnerabilità ai rumori ambientali e fisiologici rendono necessaria l'applicazione di tecniche avanzate di filtraggio e analisi del segnale, al fine di ottenere dati utili e interpretabili.

Nonostante i progressi compiuti, le BCI devono ancora affrontare sfide cruciali, tra cui:

- la riduzione degli artefatti e del rumore nei segnali EEG per migliorarne la qualità e l'affidabilità;
- lo sviluppo di algoritmi di machine learning sempre più sofisticati per una decodifica accurata e in tempo reale dell'attività cerebrale;
- il miglioramento dell'ergonomia e della portabilità dei dispositivi, condizione fondamentale per un'adozione su larga scala.

In prospettiva, l'integrazione delle BCI con ambienti intelligenti e immersivi potrebbe rivoluzionare l'interazione uomo-macchina, trasformando le interfacce neurali da strumenti specialistici a tecnologie pervasive, capaci di ridefinire profondamente il rapporto tra l'individuo e il suo ambiente fisico e digitale. Le BCI, pertanto, non rappresentano soltanto una sfida tecnologica, ma anche una nuova frontiera sociale, con il potenziale di migliorare la qualità della vita e promuovere nuove forme di inclusione, assistenza e comunicazione.

Bibliografia

- Y. Roy, H. Banville, I. Albuquerque, A. Gramfort, T. H. Falk, and J. Faubert, "Deep learning-based electroencephalography analysis: a systematic review", *Journal of neural engineering*, vol. 16, no. 5, p. 051001, 2019.
- I. Lazarou, S. Nikolopoulos, P. C. Petrantonakis, I. Kompatsiaris, and M. Tsolaki, "Eeg-based brain-computer interfaces for communication and rehabilitation of people with motor impairment: a novel approach of the 21 st century", *Frontiers in human neuroscience*, vol. 12, p. 14, 2018.
- C. G. Coogan and B. He, "Brain-computer interface control in a virtual reality environment and applications for the internet of things", *Ieee Access*, vol. 6, pp. 10 840-10 849, 2018.
- M. Amadeo, F. Cicirelli, A. Guerrieri, G. Ruggeri, G. Spezzano, and A. Vinci, "When edge intelligence meets cognitive buildings: The cogito platform", *Internet of Things*, vol. 24, p. 100908, 2023.
- F. Cicirelli, A. Guerrieri, G. Spezzano, and A. Vinci, "IoT Edge Solutions for Cognitive Buildings", ser. *Internet of Things*. Springer Cham, 2023.
- L. Rizzo, P. Zicari, F. Cicirelli, A. Guerrieri, M. Micieli, and A. Vinci, "A study on consumer-grade eeg headsets in bci applications," in *2024 IEEE Conference on Pervasive and Intelligent Computing (PICom)*, 2024, pp. 67-74.
- R. A. Ramadan and A. V. Vasilakos, "Brain computer interface: control signals review", *Neurocomputing*, vol. 223, pp. 26-44, 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231216312152>
- A. Khosla, P. Khandnor, and T. Chand, "A comparative analysis of signal processing and classification methods for different applications based on eeg signals", *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, vol. 40, no. 2, pp. 649-690, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0208521620300231>
- M. Riaz and R. Gravina, "Anxiety and eeg frontal theta-beta ratio relationship analysis across personality traits during hdr affective videos experience", in *Proceedings of the 10th International Conference on Information and Communication Technologies for Ageing Well and e-Health - Volume 1: ICT4AWE, INSTICC*. SciTePress, 2024, pp. 27-36.
- Klem, G. H., Lüders, H. O., Jasper, H. H., & Elger, C. (1999). "The ten-twenty electrode system of the International Federation", *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 52(3), 3-6.
- Oostenveld, R., & Praamstra, P. (2001). "The five percent electrode system for high-resolution EEG and ERP measurements", *Clinical Neurophysiology*, 112(4), 713-719.
- Koessler, L., Maillard, L., Benhadid, A., Vignal, J. P., Felblinger, J., Vespignani, H., & Braun, M. (2009). "Automated cortical projection of EEG sensors: Anatomical correlation via the international 10-10 system", *NeuroImage*, 46(1), 64-72.
- R. Fazel-Rezai, B. Z. Allison, C. Guger, E. W. Sellers, S. C. Kleih, and A. Kubler, "P300 brain computer interface: current challenges and emerging trends", *Frontiers in Neuroengineering*, vol. 5, 2012. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/journals/neuroengineering/articles/10.3389/fneng.2012.00014>

L. Wu, A. Liu, R. K. Ward, Z. J. Wang, and X. Chen, "Signal processing for brain – computer interfaces: A review and current perspectives", IEEE Signal Processing Magazine, vol. 40, no. 5, pp. 80–91, 2023.

L. Farwell and E. Donchin, "Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials", Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, vol. 70, no. 6, pp. 510–523, 1988. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0013469488901496>

<https://www.bitbrain.com/blog/brain-computer-interface-using-eeeg-signals>

<https://www.bitbrain.com/blog/what-is-an-eeeg>

<https://it.wikipedia.org/wiki/Elettroencefalografia>

<https://www.bitbrain.com/blog/eeeg-electrode-placement>

[https://en.wikipedia.org/wiki/10%E2%80%93system_\(EEG\)](https://en.wikipedia.org/wiki/10%E2%80%93system_(EEG))

<https://sapienlabs.org/lab-talk/bci-using-steady-state-visual-evoked-potentials/>

<https://info.tmsi.com/blog/what-is-the-p300-in-event-related-potentials-erps>

<https://openvibe.inria.fr/>

https://www.bci2000.org/mediawiki/index.php/Main_Page