

# Brain-computer interface: la nuova frontiera delle tecnologie assistive

E. Pasqualotto, S. Federici, M. Olivetti Belardinelli, N. Birbaumer

In questo capitolo, descriveremo cos'è un'interfaccia cervello-computer e come questa sia considerata una tecnologia assistiva. Inizialmente, porremo l'accento sulla definizione di questa TA: una BCI è un sistema di comunicazione indipendente dalle normali vie di comunicazione del cervello che sfruttano i nervi periferici e i muscoli. Spiegheremo poi le basi delle diverse tecniche di misurazione dell'attività cerebrale, ed evidenzieremo per ciascuna i vantaggi e gli svantaggi. Descriveremo l'evoluzione storica dagli anni Settanta fino ai progressi e le applicazioni più recenti. Illustreremo inoltre gli usi pratici delle BCI, quali la comunicazione, la riabilitazione motoria e i trattamenti clinici di sindromi non trattabili farmacologicamente. Infine, analizzeremo la prospettiva dal punto di vista delle tecnologie assistive e i requisiti per una valutazione dell'assegnazione dell'ausilio.

## 17.1 Che cos'è una brain-computer interface?

Un'interfaccia cervello-computer (*brain-computer interface*, BCI) fornisce una connessione diretta tra il cervello e un dispositivo esterno, come per esempio un computer o qualsiasi altro sistema capace di ricevere un segnale in entrata. Nel giugno del 1999, si è svolto *First International Meeting on Brain-Computer Interface Technology* presso il Rensselaerville Institute (Albany, New York), al quale hanno preso parte circa cinquanta ricercatori provenienti da ventidue diversi gruppi di ricerca, il cui scopo è stato quello di esaminare lo stato dell'arte della ricerca sulle BCI e di definire un insieme condiviso di procedure, metodi e definizioni. Durante questo incontro, per esempio, è stata fornita una definizione di BCI che chiarisce che “un'interfaccia cervello-computer è un sistema di comunicazione indipendente dalle normali vie di comunicazione del cervello che sfruttano i nervi periferici e i muscoli” (Wolpaw *et al.*, 2000). In una BCI, l'attività neuromuscolare non è necessaria per la produzione di un messaggio (Pasqualotto *et al.*, 2012).

Una BCI può essere considerata come una tecnologia assistiva (TA) che consenta a persone totalmente paralizzate o con gravi insufficienze motorie di comunicare. Normalmente, le TA vengono controllate dall'utente per mezzo dell'attività muscolare. Per questa ragione, persone affette da disabilità che portano a una progressiva e totale degenerazione muscolare, come la sclerosi laterale amiotrofica (SLA), corrono il rischio di non poter usufruire di nessun supporto alla comunicazione.

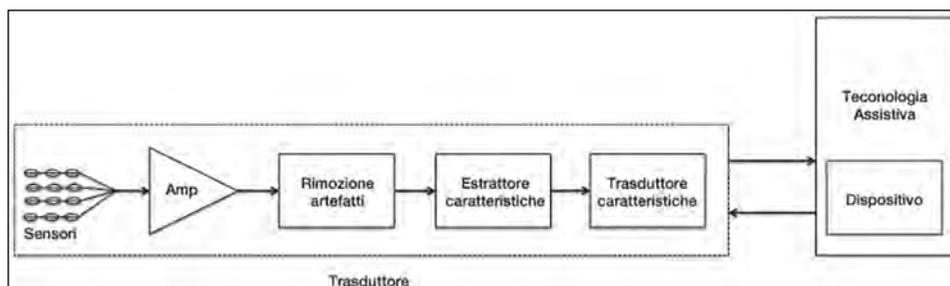
Negli ultimi anni, tecnologie raffinate hanno permesso la realizzazione di diversi sistemi in grado di consentire un collegamento tra un cervello e una macchina quale

per esempio un computer. Una BCI utilizza l'attività elettrica, magnetica o metabolica generata dai neuroni, per inviare un impulso a una TA. Ciò solitamente avviene attraverso la misurazione dell'attività cerebrale per mezzo di tecniche elettrofisiologiche diverse, che sono comunemente distinte in letteratura tra invasive e non invasive (Lebedev e Nicolelis, 2006).

L'approccio invasivo è caratterizzato da registrazioni intracraniche dell'attività elettrica, effettuate direttamente su assemblee di neuroni o su neuroni singoli. L'approccio non invasivo usa l'elettroencefalografia (EEG), la magnetoencefalografia (MEG) e la risonanza magnetica funzionale per immagini (*functional Magnetic Resonance Imaging*, fMRI) per consentire il controllo di un personal computer o di una periferica. Questo tipo di approccio viene utilizzato soprattutto per consentire a pazienti paralizzati di sviluppare una via di comunicazione con il mondo esterno (Wolpaw *et al.*, 2002). La maggior parte della ricerca sulle BCI si focalizza soprattutto sull'utilizzo dell'EEG, che, oltre a essere considerata una tecnica a basso costo, è anche più facilmente trasportabile. Nella descrizione che verrà portata avanti in questo capitolo ci concentreremo soprattutto sulle BCI che utilizzano l'EEG, fornendo comunque alcune informazioni anche sulle BCI basate su altre tecniche.

Dalle prime scoperte effettuate sugli impulsi cerebrali sono passati più di cent'anni (Swartz e Goldensohn, 1998), e più di trenta dal primo tentativo di creare un'interfaccia in grado di stabilire un rapporto diretto tra il cervello e una macchina. Nel corso degli ultimi vent'anni, le BCI hanno visto una notevole accelerazione dello sviluppo, con un numero sempre maggiore di gruppi di ricerca coinvolti in tutto il mondo.

I sistemi basati su BCI consistono di due blocchi funzionali separati: un trasduttore, che traduce l'attività cerebrale di un utente in segnali utilizzabili, e una periferica (Mason, Jackson e Birch, 2005). Un trasduttore è composto da diverse parti (Figura 17.1). Normalmente, vengono utilizzati dei sensori per registrare l'attività cerebrale, i cui segnali hanno però un'ampiezza molto bassa e necessitano quindi di essere amplificati. Per essere utilizzati, questi segnali vengono ripuliti da possibili artefatti, come per esempio segnali muscolari o oculari. Infine, mediante algoritmi matematici, vengono isolate le specifiche caratteristiche del segnale che verranno utilizzate come impulso e trasmesse alla periferica, che le utilizzerà per svolgere una certa attività o funzione.



**Figura 17.1** Normalmente, i sensori registrano l'attività cerebrale, che necessita poi di essere amplificata. Successivamente, questi segnali vengono ripuliti da possibili artefatti e, infine, vengono isolate le caratteristiche del segnale che verranno utilizzate come segnale di impulso.

## 17.2 La misurazione dell'attività cerebrale

### 17.2.1 EEG

L'elettroencefalografia è la misura dell'attività elettrica del cervello. Tale attività viene solitamente misurata per mezzo di elettrodi d'argento rivestiti di cloruro d'argento posizionati sullo scalpo, di dimensioni che variano dai 2 ai 12 millimetri. L'uso di tali elettrodi richiede che sia applicata, tra lo scalpo e l'elettrodo, una pasta conduttiva che riduce l'impedenza della pelle. Sono però in progettazione degli elettrodi speciali a secco, che eviterebbero l'uso della pasta conduttiva (Popescu *et al.*, 2007).

L'EEG registrato sullo scalpo riflette la somma dell'attività contemporanea di milioni di cellule piramidali. Come tutti i neuroni, quelle piramidali sono cellule eccitabili dai cambiamenti nel voltaggio che avvengono sulla loro membrana. A causa dell'attenuazione del segnale prodotto dai neuroni, è possibile registrare sullo scalpo solo il segnale che arriva dai dendriti. A causa di queste limitazioni nel segnale, l'EEG ha una buona risoluzione temporale ma una limitata risoluzione spaziale. Nonostante sia possibile registrare segnali nell'ordine di pochi millisecondi, la risoluzione spaziale è piuttosto bassa (nell'ordine di un centimetro), non permettendo quindi una corretta localizzazione del segnale (Tabella 17.1).

**Tabella 17.1** Confronto delle diverse tecniche di misurazione dell'attività cerebrale. L'EEG e la MEG hanno la migliore risoluzione temporale, mentre la MRI ha la migliore risoluzione spaziale. L'EEG è considerata una tecnica abbastanza trasportabile. La NIRS potrebbe essere considerata sufficientemente trasportabile, mentre la MEG e la fMRI non possono essere spostate.

	Risoluzione temporale	Risoluzione spaziale	Portabilità	Costo
EEG	~1 ms	~1 cm	Alta	Basso
MEG	~1 ms	~1 mm	Non portabile	Molto alto
fMRI	4-5 s	<1 mm	Non portabile	Alto
NIRS	4-5 s	<3 cm	Bassa	Moderato

### 17.2.2 MEG

La magnetoencefalografia è la misura dei cambiamenti magnetici prodotti dalle correnti elettriche che attraversano i neuroni. Poiché il segnale è lo stesso misurato anche dall'EEG, la MEG ne condivide la risoluzione temporale, nonostante la risoluzione spaziale sia invece nettamente superiore. La MEG viene considerata come una tecnica di compromesso, in quanto offre le potenzialità temporali dell'EEG e le potenzialità spaziali della fMRI (che vedremo più avanti), ma senza i loro svantaggi.

I vantaggi di questa tecnica sono però controbilanciati dai suoi costi. Oltre a quelli necessari per l'acquisto e la manutenzione della strumentazione, la MEG ha bisogno di essere posta in una stanza schermata in modo da essere protetta da tutti i campi

magnetici non provenienti dall'attività cerebrale. Questi campi sono di una intensità talmente bassa, misurando solo pochi femtotesla ( $10^{-15}$  T), da essere soggetti alle interferenze non solo del campo magnetico terrestre, ma potenzialmente di qualsiasi fonte elettrica che sia nelle vicinanze.

I campi magnetici del cervello vengono rivelati attraverso dei dispositivi superconduttori a interferenza quantistica (*Superconducting Quantum Interference Devices*, SQUID), posizionati nell'elmetto dentro al quale viene posta la testa durante le misurazioni.

### 17.2.3 fMRI

La risonanza magnetica funzionale utilizza un magnete estremamente potente posizionato all'interno di un tubo orizzontale, dentro al quale viene introdotto il soggetto della misurazione, per produrre stabilmente un campo magnetico. Tale campo magnetico costringe gli atomi di idrogeno, presenti dentro il tubo, ad allinearsi lungo la stessa direzione. Infatti, quando i nuclei di un atomo sono dentro a un campo magnetico, i protoni al suo interno si allineano nella stessa direzione. Se questi protoni vengono colpiti da onde radio, il loro allineamento viene alterato, inducendo i protoni a girare su stessi. Mentre i protoni tornano alla loro posizione di partenza, emettono un breve segnale radio che viene intercettato da una stazione ricevente che elabora questo segnale.

La risonanza magnetica ha un'accuratezza nell'ordine di un millimetro, ma ha il grande svantaggio di poter registrare solo una scansione del cervello ogni secondo, una risoluzione temporale troppo bassa per alcuni processi cerebrali.

### 17.2.4 NIRS

La spettroscopia vicina all'infrarosso utilizza la metabolizzazione dell'ossigeno per misurare l'attività cerebrale. Mentre la fMRI misura la concentrazione di ossi- e deossi-emoglobina, utilizzando le loro proprietà magnetiche, la NIRS misura il grado di assorbimento nei tessuti della regione vicino all'infrarosso nello spettro elettromagnetico.

Il funzionamento della NIRS può essere facilmente spiegato con un esempio che quasi tutti hanno rilevato almeno una volta da bambini. Appoggiando una piccola torcia su un lato di un'estremità di un dito, si può notare che la luce è ancora visibile dal lato opposto, nonostante abbia dovuto attraversare diversi centimetri di tessuto. Allo stesso modo, usando diodi al laser, la luce penetra nello scalpo, oltrepassa i tessuti più superficiali della testa fino ad arrivare al cervello, e successivamente dal cervello si riflette fino a essere catturata da optodi (elettrodi ottici) che permettono di determinare il grado di assorbimento. Infatti, durante il suo viaggio, la luce viene assorbita dall'emoglobina in modi diversi, a seconda che essa sia ossigenata o deossigenata. Sfruttando questo principio si riesce ad avere una misurazione della concentrazione del sangue, e perciò dell'attività cerebrale. I sistemi basati sulla NIRS hanno diversi vantaggi, rispetto ad altre tecniche: sono relativamente portabili e hanno una risoluzione spaziale accettabile, nonostante la risoluzione temporale sia invece limitata come nella fMRI.

### 17.3 Storia delle BCI

Nel 1929, il neuropsichiatra tedesco Hans Berger (1873-1941), professore di psichiatria e direttore della clinica psichiatrica dell'Università di Jena, pubblicò su *Zeitschrift für die gesamte Neurologie und Psychiatrie* l'articolo "Über das Elektrenkephalogramm des Menschen" (Berger, 1929), il primo di una serie di quattordici resoconti sull'elettroencefalografia, un sistema per misurare dalla superficie dello scalpo le differenze di potenziale delle sinapsi. Berger, che scoprì anche il ritmo alfa, fu il primo a registrare un encefalogramma. La nuova tecnica non ebbe immediato successo, fino alla conferma definitiva da parte di altri scienziati del calibro di Adrian, Lennox, Gibbs e Jasper (Wiedemann, 1994). Negli anni successivi questa tecnica divenne molto popolare, e numerosi laboratori di EEG si svilupparono in giro per l'Europa e gli Stati Uniti.

Probabilmente, all'epoca della sua scoperta, Hans Berger non immaginava che in poco più di quarant'anni il sistema da lui ideato avrebbe spinto qualcuno a usare l'elettroencefalografia per comandare delle macchine direttamente tramite l'attività cerebrale (Vidal, 1973).

Sin dall'inizio degli anni Settanta, si diffuse l'idea di utilizzare il condizionamento operante di eventi neurali per controllare dispositivi meccanici. L'obiettivo era ambizioso, ma i progressi tecnologici erano abbastanza avanzati da permettere di adattare l'EEG a tal fine.

Nel 1968, Joseph Kamiya dimostrò in un importante articolo che il ritmo alfa può essere soggetto al condizionamento operante e che le persone possono imparare a discriminare la presenza e l'assenza.<sup>1</sup> Utilizzando un meccanismo di feedback, le persone potevano imparare a modificare la frequenza del ritmo alfa. Questo articolo, che influenzò molto l'ambito degli studi sull'EEG, viene considerato solitamente come l'inizio dell'era del neurofeedback, il quale a sua volta ha influenzato l'idea dell'utilizzo dell'attività cerebrale per controllare un dispositivo esterno.

Diverse agenzie governative americane, come per esempio l'*Advanced Research Projects Agency* (ARPA, poi ribattezzata *Defense Advanced Research Projects Agency*, DARPA), interessate all'argomento finanziarono numerosi progetti di ricerca<sup>2</sup> a partire dagli anni Settanta, cercando di sviluppare tecnologie che "potessero permettere un'interazione immersiva e intima tra essere umani e computer includendo le cosiddette applicazioni bioniche" (Vidal, 1999).

Di questo periodo sono degni di nota soprattutto due progetti: il primo diretto dal dottor George Lawrence, il secondo dal dottor Jacques Vidal.

Il primo era un progetto interno dell'ARPA. Il punto centrale delle ricerche di Lawrence era lo studio sui meccanismi cognitivi del biofeedback, poiché aveva lo scopo di sviluppare nuove tecniche che potessero permettere l'accrescimento delle prestazioni umane. Essendo un progetto interno di un'agenzia il cui obiettivo era

1 Il ritmo alfa è un'oscillazione nello spettro di frequenza 8-12 Hz. Ha origine nel lobo occipitale e solitamente è associato a stati di veglia rilassati con gli occhi chiusi.

2 Negli stessi anni, l'ARPA finanziò anche il progetto ARPANET, progenitore di Internet.

principalmente rivolto all'arte della guerra, l'obiettivo finale erano soprattutto applicazioni militari, e le prestazioni che si intendevano migliorare erano quelle dei soldati impegnati in compiti che richiedevano grandi carichi di lavoro mentale (Wolpaw *et al.*, 2000). A eccezione di alcune idee significative sul biofeedback, questa ricerca non produsse risultati degni di nota. Infatti, dopo la fine di questo progetto, il focus delle ricerche venne spostato su altri tipi di approcci.

Contemporaneamente, veniva portato avanti un progetto simile all'Università della California a Los Angeles (*University of California – Los Angeles*, UCLA), finanziato prima dalla *National Science Foundation* (NSF) e poi dall'ARPA. All'interno di questo progetto, diretto dal dottor Vidal, direttore del Brain-Computer Interface Laboratory, venne utilizzato per la prima volta il termine *brain-computer interface* su un articolo scientifico (Vidal, 1973). Questa ricerca dimostrò che era possibile utilizzare come canale di comunicazione i potenziali evocati visivi (*Visual Evoked Potentials*, VEP). Vidal utilizzò la stimolazione visiva generata dal computer e sofisticati algoritmi di elaborazione del segnale per consentire a un utente di controllare un cursore all'interno di un labirinto mostrato su uno schermo. Compito dell'utente era portare il cursore fuori dal labirinto muovendolo in quattro direzioni.

Wolpaw e colleghi (2000) riferiscono come la ricerca di Vidal abbia messo in evidenza l'importanza di poter discriminare tra l'attività elettroencefalografica e quella elettromiografica (EMG) derivante dallo scalpo o dai muscoli facciali. Per questa ragione, infatti, uno degli obiettivi principali del già menzionato "Primo incontro internazionale sulle interfacce cervello-computer" fu di definire le BCI in modo da escludere il coinvolgimento dell'attività muscolare.

Nelle successive due decadi, il campo delle BCI è cresciuto in modo esponenziale, avvalendosi sia di un'accresciuta conoscenza dei processi e delle funzioni cerebrali, sia della nuova era dei personal computer, che hanno consentito l'utilizzo di macchine più economiche e potenti. Solo alcuni degli attuali usi delle BCI sono finalizzati a ristabilire la comunicazione o il movimento in pazienti con disabilità gravi e multiple (Lebedev e Nicolelis, 2006; Birbaumer, Murguialday e Cohen, 2008; Daly e Wolpaw, 2008).

Per supportare e assistere la ricerca sulle BCI, sono stati sviluppati diversi software in grado di servire da piattaforma generale per registrare i segnali cerebrali, analizzarli e traslarli in un'applicazione. Questi software sono solitamente *open source*, facilmente configurabili e possono essere modificati e adattati a nuovi paradigmi di ricerca. Tra questi, possiamo annoverare BCI2000 (Schalk *et al.*, 2004; Mellinger e Schalk, 2007), BioSig (Schlögl *et al.*, 2007) e Open-VIBE (Arrouet *et al.*, 2005).

## 17.4 Comunicazione

### 17.4.1 Potenziali utenti

Le interfacce cervello-computer sono progettate per essere utilizzate da persone con gravi disabilità per le quali risultano inefficaci le altre comuni tecnologie assistive, e ciò a causa della dipendenza di queste ultime dal controllo muscolare volontario. Sindromi e malattie degenerative come la sindrome di Guillain-Barré, la sclerosi laterale amio-

trofica (SLA), l'infarto del tronco encefalico e sindromi cerebrali traumatiche o metaboliche possono portare a paralisi motorie gravi o totali, rendendo di fatto la comunicazione estremamente difficile, se non impossibile (Kübler e Birbaumer, 2008).

Plum e Posner (1966) hanno definito la cosiddetta sindrome del chiavistello (*locked-in syndrome*, LIS), che consiste in una condizione di tetraplegia e anartria che porta a uno stato di paralisi completa, ma senza intaccare le facoltà intellettive. In questa condizione, chiamata ora sindrome LIS "classica", i pazienti mantengono la capacità di effettuare movimenti oculari, che possono essere talvolta usati per comunicare (Feldman, 1971). Successivamente al lavoro di Plum e Posner, Bauer e il suo gruppo di lavoro (1979) aggiunsero alla definizione classica due ulteriori stadi di progressione della sindrome. Il primo viene definito stadio incompleto (*incomplete LIS*), poiché oltre ai movimenti oculari sono presenti anche altri movimenti residui volontari, come per esempio il controllo di un dito o di alcuni muscoli facciali, che possono quindi essere utilizzati come canale di comunicazione. Il secondo stadio viene definito LIS totale o completo (*total or complete LIS*, CLIS), poiché in questo stadio non è più presente alcun movimento residuo, inclusi i movimenti oculari, e il paziente è in uno stato di completa immobilità.

Come suggeriscono Birbaumer e colleghi, "questi pazienti alla fine diventano incapaci di esprimersi e di comunicare persino i più fondamentali bisogni e necessità, poiché non sono più in grado di controllare i propri muscoli e quindi attivare un qualsiasi dispositivo per la comunicazione" (Birbaumer *et al.*, 1999).

A causa della loro incapacità di comunicare, la condizione di questi pazienti può essere erroneamente diagnosticata come stato vegetativo anziché LIS (Gallo e Fontanarosa, 1989). In letteratura si possono trovare resoconti secondo i quali pazienti in stato LIS sono stati riconosciuti come coscienti solamente diversi anni dopo l'insorgere della condizione di paralisi (Laureys *et al.*, 2005), nonostante sia stato provato che è possibile ottenere segni comportamentali utilizzando il condizionamento semplice contingente (Lancioni *et al.*, 2008).

Pazienti che presentano una condizione LIS medicalmente stabile e con adeguate cure mediche possono avere un'aspettativa di vita anche di diversi decenni (Doble *et al.*, 2003).

Sebbene nella condizione LIS classica e in quella incompleta siano presenti alcuni movimenti residui che possono essere utilizzati come canali di comunicazione, per esempio usando sistemi per il tracciamento del movimento oculare (Calvo *et al.*, 2008) o interruttori meccanici (Lancioni *et al.*, 2008; Lancioni *et al.*, 2010), solo una BCI potrebbe potenzialmente essere usata in tutti gli stadi di progressione della sindrome del chiavistello (Tabella 17.2). Inoltre, altri dispositivi sono spesso più difficili da utilizzare rispetto a una BCI.

In futuro, anche persone con disabilità meno gravi potrebbero beneficiare di questa tecnologia. Attualmente, per essere completamente funzionali, le BCI devono ancora superare alcuni ostacoli. Nessuno studio ha per il momento dimostrato l'affidabilità sul lungo termine delle BCI e, nonostante vi siano studi che hanno dimostrato l'influenza dell'umore e della motivazione sulle prestazioni nell'utilizzo delle BCI (Nijboer, Birbaumer e Kübler, 2010), non sappiamo ancora se l'uso di questa tecnologia possa o no migliorare la qualità della vita. È comunque dimostrato da diversi

studi che pazienti con SLA, che siano sottoposti ad adeguate cure e che abbiano a disposizione un sistema di base di comunicazione, hanno un livello ragionevole di qualità della vita (Simmons *et al.*, 2000; Robbins *et al.*, 2001; Lulé *et al.*, 2009; Matuz *et al.*, 2010).

**Tabella 17.2** Tavola di confronto di alcune tecnologie. Mentre tutte le tecnologie come per esempio i sistemi di tracciamento oculare (eye tracker), le tavolette Etran, gli interruttori meccanici (switch) o i joystick possono essere utilizzate negli stadi LIS incompleto e classico, solo una BCI può potenzialmente essere utilizzata durante tutti gli stadi della sindrome.

	Eye tracker	Etran	Switch	Joystick	BCI
LIS incompleta	X	X	X	X	X
LIS	X	X	X	X	X
LIS totale					X

### 17.4.2 Sviluppo

La prima “protesi mentale” pubblicata su un articolo scientifico è stata il P300 Speller di Farwell e Donchin (1988). Questo sistema, che viene ancora utilizzato in molte applicazioni, registra e utilizza il potenziale correlato all’evento chiamato P300. Questo potenziale è una deflessione positiva dell’EEG che avviene 300 millisecondi circa dopo una stimolazione, e viene normalmente evocato focalizzando l’attenzione su una serie di stimoli, tra i quali uno stimolo raro, rilevante o inaspettato. Il P300 Speller mette in pratica questa procedura, chiamata *paradigma oddball* (infrequente, saliente), utilizzando una matrice dove sono presenti lettere, numeri e altri comandi (Figura 17.2) e facendo in modo che ogni colonna e riga di questa matrice venga intensificata in maniera casuale. Quando un utente del P300 Speller desidera comunicare, focalizza la propria attenzione su una cella della matrice. Ciò facendo, il contenuto della cella diventa rilevante e raro, evocando quindi un potenziale P300 (in una matrice composta da sei righe e sei colonne, avvengono infatti dodici intensificazioni, ma solamente due, una per la riga e una per la colonna, identificano una certa cella).

Diverse applicazioni basate sul P300 Speller sono state sviluppate sia per la comunicazione sia per l’intrattenimento, ed è, al momento attuale, una delle BCI più utilizzate. In letteratura si possono infatti trovare diversi usi per la comunicazione (Donchin, Spencer e Wijesinghe, 2000) per il controllo di browser Internet o dell’e-mail (Karim *et al.*, 2006; Bensch *et al.*, 2007; Mugler *et al.*, 2008; Mugler *et al.*, 2010), applicazioni per dipingere (Münßinger *et al.*, 2010) o per il controllo di ambienti reali e virtuali (Bayliss, 2003; Cincotti *et al.*, 2009).

Usando una tecnica diversa, Birbaumer e colleghi furono i primi a fornire una prova sperimentale dell’uso di BCI per comunicare con un paziente affetto da SLA (Birbaumer *et al.*, 1999). Mentre il P300 Speller usa un’occorrenza naturale dell’attività cerebrale, Birbaumer e colleghi hanno utilizzato una tecnica più vicina al neurofeedback, cioè il condizionamento dei potenziali corticali lenti (*slow cortical potentials*, SCP).



**Figura 17.2** Il potenziale P300 viene evocato focalizzando l'attenzione su una serie di stimoli, tra i quali è presente uno stimolo raro, rilevante o inaspettato. Per creare l'effetto di stimoli rari e rilevanti, il P300 Speller intensifica in modo casuale le righe e le colonne della matrice, che contiene lettere, numeri e altri comandi. Quando un utente del P300 Speller desidera comunicare, focalizza la propria attenzione su una cella della matrice.

Diversi studi, infatti, hanno dimostrato in precedenza che era possibile auto-modulare volontariamente l'attività cerebrale attraverso un sistema di feedback e ricompense. Ciononostante, le attese sui possibili risultati furono eccessive e diversi ricercatori si sbilanciarono in affermazioni troppo ottimistiche sui successi clinici della tecnica, basandosi solo su casi singoli e decretando un generale discredito su tutto il campo di ricerca.

Nel 1969, infatti, Miller sostenne l'efficacia del controllo operante di funzioni autonome e centrali in topi trattati con curaro, dimostrando che era possibile modulare in maniera operante e volontaria le funzioni corporee, avendo escluso tramite l'utilizzo del curaro la mediazione del sistema motorio. Tuttavia, non fu mai possibile replicare tali risultati (Dworkin e Miller, 1986).

Come Birbaumer, Ramos Murguialday, Weber e Montoya sottolineano (2009), tali risultati contraddittori frenarono fortemente la possibilità di finanziamenti di studi clinici su larga scala da parte di istituzioni pubbliche, sebbene alcune prove di efficacia del biofeedback fossero già allora presenti. Solo pochi anni dopo fu dimostrato, infatti, che l'automodulazione di potenziali corticali lenti può influenzare il numero di attacchi epilettici in pazienti con epilessia farmaco-resistente (Rockstroh *et al.*, 1993; Kotchoubey *et al.*, 2001).

Simili risultati sono stati ottenuti utilizzando il biofeedback con la conduttanza cutanea (Nagai *et al.*, 2004), confermando quindi i resoconti precedenti che affermavano che controllando la risposta della cute era possibile produrre una diminuzione della risposta degli SCP a livello corticale e quindi aumentare la soglia di livello degli attacchi epilettici (Birbaumer *et al.*, 1990; Rockstroh *et al.*, 1993; Kotchoubey *et al.*, 2001).

Gli SCP durano normalmente da 300 millisecondi circa fino a diversi secondi. Variazioni nella polarizzazione prendono origine dalla depolarizzazione dell'albero dendritico apicale, nel più alto livello corticale, provocata da una serie di attivazioni sincrone derivanti da afferenti talamo-corticali. Questo sistema controlla l'eccitamento (con potenziali negativi) e l'inibizione (con potenziali positivi) dei circuiti corticali.

Negli studi in cui pazienti con epilessia focale sono stati sottoposti a training intensivo con l'utilizzo di feedback visivi di SCP positivi, si è arrivati a raggiungere un'accuratezza del 100% nel controllo dell'attività cerebrale. Questo importante risultato ha spianato la strada all'uso dei potenziali corticali lenti come mezzo di comunicazione in pazienti con SLA (Birbaumer *et al.*, 1999).

In un esperimento tipico, vengono presentati ai pazienti due bersagli alle due estremità verticali di uno schermo. Ai pazienti viene fornito un feedback continuo, utilizzando un cursore che si muove sulla base dell'ampiezza degli SCP. Per imparare a regolare l'ampiezza delle onde cerebrali, ai pazienti viene detto che le ampiezze negative e positive degli SCP possono essere evocate muovendo il cursore rispettivamente verso l'obiettivo in alto e quello in basso (Kübler *et al.*, 2001; Kübler e Birbaumer, 2008). Per rinforzare l'associazione tra il controllo cerebrale e il cursore durante la fase di apprendimento, viene mostrata ai pazienti una faccina sorridente al centro dello schermo quando l'associazione è corretta. Quando i pazienti raggiungono un buon controllo durante la fase di apprendimento (circa il 75% delle prove in cui i bersagli sono colpiti correttamente), passano alla fase successiva, dove iniziano a usare il *Language Support Program* (LSP; Birbaumer *et al.*, 2000; Neumann *et al.*, 2003), un programma dedicato alla comunicazione. All'interno di questo programma vengono mostrati, alle estremità dello schermo, gli stessi obiettivi della fase di apprendimento, in modo da utilizzare una versione dicotomica dell'alfabeto. A ogni stadio, all'utente viene richiesto di accettare o rifiutare un blocco di lettere. Per selezionare una lettera, i pazienti devono muovere il cursore verso una delle due estremità. La velocità di questo processo non è molto alta: in diverse occasioni è stato necessario sottoporre i pazienti a sessioni di apprendimento durate diversi mesi per renderli in grado di controllare gli SCP (Kübler *et al.*, 2001; Kübler e Birbaumer, 2008).

Per migliorare le prestazioni dei pazienti, è necessario avere algoritmi in grado di classificare le diverse componenti dell'EEG, nel modo più accurato possibile. Una buona parte della ricerca fatta nel corso degli ultimi anni, infatti, è dedicata proprio a questo aspetto, cioè all'implementazione di diversi algoritmi matematici in grado di classificare l'EEG sia durante l'utilizzo da parte del paziente, sia a posteriori per ulteriori analisi (Hinterberger *et al.*, 2003; Dornhege *et al.*, 2007). A questo proposito è stata istituita una competizione internazionale, i cui risultati vengono pubblicati su riviste specializzate e a cui moltissimi ricercatori hanno già preso parte, che viene tenuta regolarmente per valutare le tecniche di elaborazione della segnalazione e i metodi di classificazione per le BCI (Sajda *et al.*, 2003; Blankertz *et al.*, 2004; Blankertz *et al.*, 2006).

Un importante vantaggio nell'uso delle BCI con i pazienti affetti da LIS è il loro potenziale uso come dispositivo per la riabilitazione cognitiva. Attualmente, nessun paziente in stato CLIS è stato mai in grado di comunicare con una BCI (Kübler e Birbaumer, 2008). Ciononostante, in uno studio del 2007 viene riportato che 17

pazienti in stato CLIS hanno utilizzato con successo una BCI basata sul sistema NIRS (Naito *et al.*, 2007). A questi pazienti venivano presentate semplici domande la cui risposta prevedeva un “sì” o un “no”. La risposta positiva era stata associata nei pazienti a un aumento dell’ossigenazione del sangue, mentre la risposta negativa era stata associata con una diminuzione. Di questi pazienti, sette hanno raggiunto un’accuratezza nella risposta del 70%. I buoni risultati ottenuti non sono stati accolti favorevolmente, poiché lo studio non specifica a sufficienza i criteri clinici utilizzati per definire lo stadio CLIS dei pazienti (Birbaumer *et al.*, 2009).

È stato spesso proposto che i pazienti in stato LIS non siano in grado di comunicare a causa del progredire della sindrome (Sellers e Donchin, 2006). Birbaumer prima (2006) e Kübler e Birbaumer dopo (2008) hanno invece proposto che, in pazienti rimasti paralizzati per un lungo periodo, il pensiero intenzionale è raramente seguito da una ricompensa o una punizione, causando perciò una diminuzione della percezione della causalità contingente tra il pensiero e le sue conseguenze. In questo modo, il pensiero intenzionale si estingue progressivamente nello stato *locked-in*. Teoricamente, un uso estensivo della BCI che abbia inizio prima dello stato LIS potrebbe aiutare il pensiero intenzionale, fornendo ai pazienti il sistema necessario di ricompense e punizioni per l’attribuzione causale e quindi, presumibilmente, prevenendo l’assenza totale di comunicazione.

## 17.5 Riabilitazione motoria

### 17.5.1 Utenti potenziali

Gravi lesioni del sistema motorio, come per esempio ictus e lesioni traumatiche cerebrali o del midollo spinale, possono portare a una completa paralisi, o semi-paralisi, di uno o più arti.

A seconda della gravità e del luogo della lesione, tali sindromi possono causare difficoltà respiratorie, intorpidimento e cambiamenti sensoriali, oltre a debolezza e paralisi degli arti.

Quando una lesione colpisce il midollo spinale a livello del torace, si verifica una condizione chiamata paraplegia, che compromette le funzioni sensomotorie degli arti inferiori. Quando invece una lesione colpisce il midollo a livello del collo, è possibile che si verifichi una compromissione degli arti sia superiori sia inferiori, oltre che al livello del tronco, causando problemi respiratori. Tale condizione è comunemente nota con il nome di tetraplegia, o quadriplegia.

Negli Stati Uniti, nel 2005, il numero di persone che erano sopravvissute a una lesione del midollo era di circa 250.000 unità (Wyndaele e Wyndaele, 2006). È stato stimato che l’incidenza annuale negli Stati Uniti delle lesioni del midollo si attesta all’incirca sugli 11.000 nuovi casi ogni anno, non considerando in questa stima le persone che non sono sopravvissute alla lesione. Un’altra causa piuttosto diffusa di lesioni motorie, e motivo di grande preoccupazione per le istituzioni che si occupano di salute pubblica, è l’ictus. Ogni anno, infatti, circa 750.000 nuovi casi di ictus avvengono negli Stati Uniti (Carandang *et al.*, 2006). Nel Regno Unito, circa la metà delle persone che sopravvivono a un ictus diventano dipendenti dalle cure di altre

persone anche per le attività quotidiane (Rothwell *et al.*, 2004), mentre in Germania circa un terzo dei pazienti che sopravvivono presenta un'emiplegia (Millán *et al.*, 2010). Circa un terzo delle persone che hanno sofferto di un ictus non è in grado, a un anno da esso, di utilizzare correttamente l'arto paralizzato (Lai *et al.*, 2002). Inoltre, allo stato attuale non è disponibile nessun trattamento in grado di sopperire a questa mancanza (Birbaumer, Murguialday e Cohen, 2008; Buch *et al.*, 2008), causando un impatto negativo sui pazienti, la loro famiglia e, non da ultimo, la società.

### 17.5.2 Le BCI nella riabilitazione motoria

Le BCI possono essere utilizzate per attivare dispositivi che supportano il movimento. Oltre alla possibilità di ricorrere ai segnali cerebrali per il controllo, per esempio, di sedie a rotelle (Rebsamen *et al.*, 2007; Galán *et al.*, 2008; Iturrate *et al.*, 2009; Millán *et al.*, 2010), diversi gruppi di ricerca si sono messi alla prova per utilizzare questi segnali per controllare un dispositivo che fosse in grado di aiutare persone con disabilità nel movimento degli arti.

La riorganizzazione funzionale della corteccia motoria ha un importante ruolo adattativo nel modificare il tessuto corticale intatto (Nudo, Plautz e Frost, 2001). Sin dal primo tentativo in cui un paziente tetraplegico è stato in grado di controllare con successo, utilizzando il ritmo mu delle onde cerebrali, un dispositivo collegato ai muscoli della mano (Pfurtscheller *et al.*, 2000), le BCI sono state considerate come possibili dispositivi per la riabilitazione (Dobkin, 2007).

Successivamente, l'utilizzo delle BCI nella riabilitazione motoria è stato esteso dal solo EEG all'uso anche di altre tecniche, sia per ciò che riguarda metodi considerati invasivi, come per esempio l'uso di elettrodi impiantati in pazienti tetraplegici (Hochberg *et al.*, 2006), sia metodi considerati meno invasivi, come per esempio la MEG per modulare il ritmo mu atto a controllare una ortesi della mano (Birbaumer, 2006; Buch *et al.*, 2008).

Registando l'attività cerebrale, è possibile individuare un'attività corticale che prende origine nelle aree sensomotorie del cervello. Questa attività ha un ciclo di variazione tra gli 8 e i 12 Hz ed è visibile quando un individuo non è impegnato nell'elaborazione di informazioni motorie o non sta mettendo in atto o immaginando un movimento. Il cosiddetto ritmo sensomotorio (*sensorimotor rhythm*, SMR), conosciuto con diversi nomi, viene prodotto durante uno stato di inattività, ed è causato dai circuiti talamo-corticali (Wolpaw *et al.*, 2003). Utilizzando la sincronizzazione correlata a un evento (*event-related synchronisation*, ERS), conosciuta anche come incremento del ritmo mu, e la de-sincronizzazione correlata a un evento (*event-related de-synchronisation*, ERS), conosciuta anche come diminuzione del ritmo mu, Pfurtscheller e il suo gruppo di lavoro sono stati in grado di far controllare a un paziente un'ortesi della mano, facendogli immaginare i relativi comandi motori. Con questo e altri lavori, Pfurtscheller è riuscito a dimostrare in modo convincente il potenziale utilizzo di una BCI basata su SMR per la riabilitazione motoria delle funzioni prensili della mano (Pfurtscheller *et al.*, 2003a; Pfurtscheller *et al.*, 2003b). Un altro lavoro interessante dello stesso gruppo di ricerca ha coinvolto l'uso delle oscillazioni del ritmo beta generate da pazienti impegnati nell'immaginazione del movi-

mento del piede. Utilizzando questa tecnica, Pfurtscheller e colleghi sono stati in grado di analizzare e classificare i segnali cerebrali e di utilizzarne i risultati per controllare un dispositivo per la stimolazione elettrica funzionale (*functional electrical stimulation*, FES). Un dispositivo per la FES è un sistema che utilizza stimolatori elettrici per evocare una risposta da parte dei nervi periferici adibiti al controllo di muscoli specifici, o gruppi di muscoli, in modo da riattivare funzioni corporee perse, come per esempio le funzioni prensili della mano, quelle deambulative e la gestione delle funzioni dell'intestino e della vescica.

In genere, i sistemi FES dedicati alle funzioni prensili della mano sono limitati dal fatto che solamente quei pazienti in grado di controllare volontariamente la spalla e il gomito del braccio paralizzato riescono a controllare il dispositivo (Millán *et al.*, 2010). Avendo quindi dimostrato la fattibilità di un sistema combinato BCI-FES, Pfurtscheller diede un forte e rinnovato impulso alla ricerca sulle BCI (Pfurtscheller *et al.*, 2003a; Pfurtscheller *et al.*, 2003b). In questo studio, un paziente tetraplegico era in grado di provocare la stimolazione della FES tramite l'immaginazione del movimento del piede. Stimolando i nervi dell'avambraccio, la FES era in grado di attivare i movimenti necessari per afferrare con la mano paralizzata un cilindro posto di fronte al paziente.

Successivamente, venne esplorato anche l'impiego di una BCI basata sulla MEG, dimostrando la fattibilità di tale sistema per il controllo delle funzioni prensili sia su soggetti sani (Mellinger *et al.*, 2007) sia su pazienti affetti da ictus (Buch *et al.*, 2008). Questo sistema utilizzava l'attività di tre sensori, dei 275 presenti nella MEG, per controllare una ortesi della mano. Per aprire l'ortesi, i pazienti dovevano aumentare l'ampiezza del ritmo mu, mentre dovevano diminuirla per chiuderla. A questo studio presero parte diversi pazienti con paralisi cronica della mano, i quali per poter ottenere il controllo dell'ortesi si sono sottoposti fino a 22 sessioni di allenamento. Alla fine del training, questi pazienti erano in grado di controllare le funzioni di apertura e chiusura dell'ortesi attaccata alla mano paralizzata, ma nessuno di loro ha mostrato segni di miglioramento clinico senza la protesi. Un risultato piuttosto importante che è stato ottenuto a seguito di questo studio è stato lo spostamento dell'attività MEG durante il periodo di allenamento. Questo spostamento ha fornito la prima prova che un training basato sull'uso di una BCI può avere come esito una riorganizzazione corticale (Birbaumer *et al.*, 2009).

A ulteriore supporto della riorganizzazione cerebrale a seguito di utilizzo di una BCI, Caria e colleghi hanno trovato in un paziente con una grave paralisi della mano un aumento della lateralizzazione verso le regioni sensomotorie ipsilaterali, dopo l'utilizzo di BCI basate su EEG e su MEG in combinazione con sessioni di fisioterapia (Caria *et al.*, 2011).

## 17.6 BCI e disturbi del comportamento

### 17.6.1 Epilessia e ADHD

In questo ambito di ricerca, il neurofeedback è stato ampiamente utilizzato in combinazione con l'EEG come trattamento per pazienti con sindromi che non sono tratta-

bili farmacologicamente, o che sono trattabili ma in misura insufficiente, come per esempio nell'epilessia farmaco-resistente o nella sindrome da deficit di attenzione e iperattività (*Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder*, ADHD).

L'epilessia è un disturbo neurologico grave che è caratterizzato da convulsioni, causate da un eccesso di attività sincrona del sistema nervoso centrale (SNC). Questa attività anormale è alla base di alcuni sintomi che possono variare a seconda del tipo di epilessia e che possono influenzare la vita dei pazienti in diversi modi. Una convulsione può durare da pochi secondi fino a diversi minuti, a volte con contemporanea perdita di coscienza e di controllo muscolare, con spasmi tonici, clonici o mioclonici, o un insieme di questi.

La *World Health Organization* (WHO) stima che l'epilessia colpisca nel mondo almeno 50 milioni di persone (Dua *et al.*, 2006). Normalmente, l'epilessia può essere trattata farmacologicamente, ma alcune persone non rispondono ad alcuno dei trattamenti disponibili.

Altri potenziali utenti delle interfacce cervello-computer sono i pazienti colpiti da ADHD. La sindrome da deficit di attenzione e iperattività è un disturbo dello sviluppo, caratterizzato da disattenzione, iperattività e impulsività (Zwi, Ramchandani e Joughin, 2000). La terminologia ADHD e lo stesso disturbo sono dei temi piuttosto controversi. L'estensione, per la quale i sintomi siano considerati patologici, varia secondo il quadro di riferimento teorico in esame. Tali sintomi dovrebbero sempre essere valutati, infatti, all'interno del contesto di sviluppo del bambino. Una teoria al momento prevalente mette in relazione questo disturbo con uno sviluppo non corretto delle reti dopaminergiche e noradrenergiche cortico-sottocorticali, che sono considerate importanti per il controllo delle funzioni esecutive e la regolazione dell'attenzione. Circa il 3-5% dei bambini è affetto da ADHD e viene normalmente trattato con stimolanti che possano far diminuire l'impulsività e l'iperattività nonché incrementare l'attenzione. Ciononostante, c'è una forte richiesta per trattamenti non farmacologici, a causa di serie preoccupazioni sull'uso di farmaci stimolanti durante il periodo dello sviluppo (Strehl *et al.*, 2006).

### **17.6.2 BCI e neurofeedback con epilessia e ADHD**

Il primo utilizzo clinico di BCI e neurofeedback è stata la modulazione dei potenziali corticali lenti, già in precedenza descritti, usata per controllare le convulsioni epilettiche non altrimenti trattabili (Kotchoubey *et al.*, 2001). Come già menzionato (vedi il Paragrafo 17.4), in diversi studi è stato dimostrato che i pazienti con epilessia farmaco-resistente in grado di controllare gli SCP hanno un numero di attacchi epilettici inferiore rispetto agli altri (Rockstroh *et al.*, 1993; Kotchoubey *et al.*, 2001).

Anche in uno studio più recente, nel quale l'autoregolazione degli SCP era inserita in un programma comportamentale autogestito, più della metà dei pazienti coinvolti ha avuto una rilevante riduzione del numero di attacchi epilettici (Strehl *et al.*, 2005).

Utilizzando procedure molto simili, le BCI hanno dimostrato un discreto successo nel trattamento di bambini affetti da ADHD (Fuchs *et al.*, 2003; Strehl *et al.*, 2006). Questi studi, sebbene compiuti su campioni di pazienti abbastanza ristretti, hanno dimostrato come sia possibile ottenere un miglioramento sia dell'attenzione sia della

vigilanza (per una rassegna completa degli effetti di altri trattamenti su pazienti affetti da ADHD, si veda Toplak *et al.*, 2008). L'attenuazione dei sintomi dell'ADHD ottenuta tramite la modulazione degli SCP è confrontabile con i miglioramenti ottenuti tramite farmaci, senza, d'altro canto, portare ad alcun effetto collaterale (Birbaumer e Cohen, 2007).

Questi studi molto innovativi hanno evidenziato come sia possibile portare a un cambiamento nelle funzioni cognitive, spianando la strada a nuove future applicazioni per le BCI. Una delle più recenti direzioni di ricerca riguardante gli usi clinici delle BCI è rappresentata dall'uso del segnale dipendente dall'ossigenazione del sangue per il trattamento di disturbi emozionali, come la psicopatia e la schizofrenia (Birbaumer *et al.*, 2005; Birbaumer, Murguialday e Cohen, 2008). Diversi studi hanno, infatti, dimostrato come sia possibile controllare l'attività cerebrale correlata alle emozioni utilizzando il cosiddetto *real-time fMRI* (rt-fMRI), una particolare applicazione dell'fMRI che permette di ottenere cambiamenti funzionali in tempo reale (Weiskopf *et al.*, 2003; Weiskopf *et al.*, 2004a; Weiskopf *et al.*, 2004b; Phan *et al.*, 2004; Caria *et al.*, 2007). La possibilità di classificare in tempo reale l'attività cerebrale correlata a stati emozionali ha dato il via, negli ultimi anni, a studi finalizzati allo sviluppo di BCI cosiddette "affettive" (Nijboer *et al.*, 2009). Le BCI affettive avrebbero il vantaggio di poter essere utilizzate anche con pazienti il cui sistema cognitivo non è intatto, per esempio nella comunicazione di base di pazienti con demenza (Liberati *et al.*, 2011).

In un tipico esperimento, i soggetti cercano di aumentare o diminuire la risposta di ossigenazione di una determinata regione di interesse. Tale risposta viene solitamente mostrata su uno schermo responsabile di fornire un feedback al soggetto dell'esperimento con un ritardo (fisiologico della tecnica) di circa 1-3 secondi. Utilizzando questo stesso protocollo, diverse ricerche hanno esplorato le capacità di modulazione di diverse regioni cerebrali. La regolazione del segnale di ossigenazione derivante dalle aree motorie e premotorie può portare a cambiamenti nella velocità di risposta motoria, mentre quello derivante da aree paraippocampali può portare a cambiamenti nelle prestazioni della memoria esplicita (Weiskopf *et al.*, 2004b; Weiskopf *et al.*, 2007).

È stato anche dimostrato che la regolazione della regione cingolata anteriore può portare a una diminuzione del dolore (deCharms *et al.*, 2005). Infine, la regolazione dell'insula anteriore può portare a cambiamenti sia nelle risposte emotive negative (Caria *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2011), sia nella percezione dei volti (Ruiz *et al.*, 2011).

La praticabilità di una BCI basata sulla NIRS è stata esplorata utilizzando i cambiamenti nel livello di emoglobina ossigenata e de-ossigenata provocati dall'immaginazione motoria dei movimenti delle mani in cinque soggetti sani (Sitaram *et al.*, 2007). Utilizzando un modello di Markov nascosto (*Hidden Markov Model*, HMM), Sitaram e colleghi sono stati in grado con successo di classificare l'immaginazione delle due mani con un'accuratezza dell'89%.

## 17.7 Tecnologie assistive e BCI

Le interfacce cervello-computer rappresentano uno dei campi più pionieristici delle TA. È necessario, quindi, considerare la complessità del processo di valutazione di TA

(ATA process). Infatti, come è stato recentemente sottolineato, le BCI possono essere considerate come delle TA nell'area delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (*Information and Communication Technologies, ICT*; Millán *et al.*, 2010): "I dispositivi TA ICT sono intesi come tecnologie per aiutare una persona a ricevere, inviare, produrre e/o elaborare informazioni sotto forme differenti" (International Standard Organisation, 2007).

In accordo con questa definizione, le BCI dovrebbero essere considerate come TA che supportano le attività quotidiane di persone con disabilità. È di vitale importanza, infatti, essere in grado di eseguire una giusta assegnazione della tecnologia in modo da evitare insoddisfazione e l'abbandono della stessa (Louise-Bender Pape, Kim e Weiner, 2002). È ormai ampiamente riconosciuto che fattori personali possono dimostrarsi sia come importanti barriere sia come facilitatori nell'utilizzo di TA (Scherer, Craddock e Mackeogh, 2011). La predisposizione all'utilizzo della tecnologia può dipendere da caratteristiche personali e psicosociali, come per esempio la personalità dell'utente, la sua qualità della vita, le capacità e le credenze sulla tecnologia (Scherer *et al.*, 2005). In quest'ottica, le TA non sono considerate come sistemi compensatori di un deficit, ma coinvolgono il benessere personale e la partecipazione sociale. Solo quando le tecnologie sono considerate all'interno di un contesto d'uso reale, possono venire incontro ai bisogni degli utenti e implicare la considerazione di un ampio spettro di attributi funzionali e non funzionali (Stephanidis *et al.*, 1998). La nozione di qualità, in questo caso, integra il tradizionale concetto di usabilità (Abran *et al.*, 2003), e arriva a includere anche aspetti che non sono facilmente misurabili in forza dei soli criteri basati sulle prestazioni.

La corretta BCI dovrebbe essere valutata sulla base dei bisogni individuali e delle specifiche condizioni di salute del paziente (Nijboer, Birbaumer e Kübler, 2010). Nonostante sia stato dimostrato che pazienti affetti da SLA possano usare i potenziali corticali lenti (Birbaumer *et al.*, 1999), la P300 (Sellers e Donchin, 2006) e i ritmi sensomotori (Kübler *et al.*, 2005), non è stato ancora dimostrato che pazienti nello stato CLIS siano in grado di utilizzare queste tecnologie (Kübler e Birbaumer, 2008).

Sebbene ci sia una consolidata tradizione di ricerca nelle BCI, ci sono solo pochi studi che prendono in esame l'usabilità delle BCI (Pasqualotto *et al.*, 2009; Pasqualotto *et al.*, 2011b; Pasqualotto *et al.*, 2011c), e in generale viene riscontrata una mancanza di studi di valutazione sulle BCI (Pasqualotto *et al.*, 2012). In ogni caso, prendendo in esame le sole BCI per la comunicazione, possiamo individuare alcune limitazioni, che di seguito indichiamo.

Solamente in alcuni studi sono stati coinvolti a lungo termine pazienti in stato LIS, e nessuno di essi ha dimostrato efficacia sul lungo periodo. Nonostante questa tecnologia sia teoricamente utilizzabile a lungo, gli studi che hanno coinvolto LIS durano generalmente solo poche ore. Gli effetti di possibili cambiamenti nell'EEG durante l'utilizzo di una BCI non sono stati ancora valutati.

Altri due possibili punti critici, che potrebbero influenzare la valutazione dei pazienti (e quindi la probabilità di abbandono), sono l'usabilità e l'estetica delle BCI. Al momento, l'estetica potrebbe essere ritenuta un problema secondario nell'utilizzo di questa tecnologia. È comunque importante sottolineare come l'EEG non sia una tecnologia molto attraente per i pazienti, a causa dell'utilizzo degli elettrodi e dei

relativi cavi, della pasta conduttiva che tende a seccarsi e che necessita, quindi, di essere sostituita e delle cuffie per il posizionamento degli elettrodi. Il possibile utilizzo del cosiddetto EEG a secco e tecnologie wireless (Popescu *et al.*, 2007; Gargiulo *et al.*, 2010; Grozea, Voinescu e Fazli, 2011) costituiranno certamente un miglioramento dell'usabilità e quindi dell'accettazione delle BCI da parte dei pazienti.

Inoltre, è ancora necessario migliorare il lato software della TA in modo da semplificare le operazioni necessarie al controllo. Sebbene esistano diverse piattaforme, gestire la comunicazione richiede tuttora l'utilizzo di un operatore esterno. Una soluzione alternativa potrebbe essere la BCI ibrida ideata da Pfurtscheller e il suo gruppo (2010). Solitamente una BCI si affida a un solo segnale cerebrale. Una BCI ibrida consiste invece di due o più segnali (come per esempio quello EEG e quello di conduttanza cutanea), dove uno è utilizzato come "interruttore cerebrale" o "selettore", in modo che si possa individuare uno stato cerebrale che funzioni come un comando per l'attivazione dell'altro.

Per valutare correttamente le BCI, è inoltre necessario identificare gli strumenti adatti allo scopo. Infatti, la maggior parte dei questionari psicologici classici e le misure fisiologiche non possono essere utilizzate con pazienti LIS (Birbaumer, 2006). Parallelamente allo sviluppo della tecnologia BCI, occorre sviluppare e rendere disponibili degli strumenti di valutazione a chi eseguirà il processo di valutazione della tecnologia.

## 17.8 Conclusioni

Sin dagli anni Settanta, l'idea di comunicare direttamente attraverso l'attività cerebrale si è spostata da una prospettiva meramente di fantascienza ad applicazioni reali. L'aumento delle ricerche, dei finanziamenti e degli articoli pubblicati durante gli anni Novanta ha portato una vasta comunità di ricerca, documentata nel 1999 nel "Primo incontro internazionale sulle interfacce cervello-computer", a proporre una definizione condivisa di BCI: un sistema di comunicazione indipendente dalle normali vie di comunicazione del cervello che sfruttano i nervi periferici e i muscoli.

Due diversi metodi di registrazione fisiologica sono solitamente utilizzati: quello invasivo e quello non invasivo. Al primo gruppo appartiene l'elettrocorticografia, che è caratterizzata da registrazioni intracraniche dell'attività elettrica, effettuate direttamente su assemblee di neuroni o su neuroni singoli. Il metodo non invasivo utilizza l'elettroencefalografia, la magnetoencefalografia, la risonanza magnetica funzionale e la spettroscopia vicina all'infrarosso per consentire a un utente di controllare un computer o una qualsiasi periferica. La ricerca sulle BCI utilizza normalmente l'EEG a causa della sua portabilità e dei costi più ridotti.

La maggior parte degli attuali usi delle BCI è dedicato alla riabilitazione della comunicazione e del movimento in pazienti con disabilità gravi e multiple. Come mezzo di comunicazione le BCI sono state sviluppate per pazienti gravemente paralizzati. Sindromi neurodegenerative e motorie possono portare a una grave o completa paralisi, rendendo la comunicazione difficile o impossibile. A causa del requisito necessario di un residuo controllo muscolare, le normali tecnologie assistive sono

inefficaci con questi pazienti. Utilizzando diverse componenti del tracciato EEG, sono state sviluppate diverse applicazioni. Il P300 Speller è probabilmente una delle applicazioni più diffuse, non solo per la comunicazione, ma anche per il controllo di browser internet, per l'e-mail, per applicazioni per la pittura e per il controllo di ambienti reali e virtuali.

Utilizzando i potenziali corticali lenti è stato dimostrato per la prima volta che pazienti affetti da SLA in condizione LIS sono in grado di comunicare per mezzo di una BCI. Il pensiero intenzionale in pazienti paralizzati da molto tempo è raramente seguito da un sistema di ricompense, compromettendo la percezione della contingenza causale tra il pensiero e le sue conseguenze, che può portare a un'estinzione del pensiero orientato a un obiettivo. Per questa ragione, un uso estensivo delle BCI prima dell'insorgere dei diversi stadi LIS potrebbe fornire il sistema di ricompense necessario per l'attribuzione causale.

Ictus e lesioni traumatiche cerebrali o del midollo spinale possono portare a paralisi o semiparalisi degli arti. Le BCI possono essere utilizzate per attivare dispositivi che assistano il movimento in questi pazienti. Pfurtscheller ha dimostrato che un paziente tetraplegico può, modulando il ritmo  $\mu$ , controllare un dispositivo applicato ai muscoli della mano. Una BCI basata sulla MEG è stata utilizzata per controllare le funzioni prensili della mano in pazienti colpiti da ictus. Questi studi hanno dimostrato anche che l'uso di una BCI può portare a una riorganizzazione corticale.

Infine, le BCI possono essere utilizzate come trattamento per pazienti che presentano sindromi non trattabili farmacologicamente, o che sono trattabili ma in misura insufficiente, come per esempio nell'epilessia farmaco-resistente o nella sindrome da deficit di attenzione e iperattività. È stato infatti dimostrato che c'è un effetto positivo sull'attenzione e la vigilanza in pazienti con ADHD. Inoltre, l'attenuazione dei sintomi ottenuta con la regolazione degli SCP è confrontabile con i miglioramenti ottenuti tramite farmaci.

Un'ulteriore applicazione clinica è l'uso delle BCI basate sulla regolazione del segnale dipendente dall'ossigenazione del sangue come trattamento per disturbi emozionali, come la psicopatìa e la schizofrenia. L'autoregolazione di specifiche aree cerebrali può portare a cambiamenti nella velocità di risposta motoria, nelle prestazioni di memoria esplicita e nella diminuzione del dolore.

Nonostante le BCI rappresentino uno dei campi più pionieristici delle TA, è necessario lavorare sul processo di assegnazione della tecnologia in modo da evitare l'abbandono della stessa. Fattori personali possono rivelarsi come importanti ostacoli o anche facilitatori nell'utilizzo delle TA. Solamente quando le tecnologie vengono considerate all'interno di un reale contesto d'uso è possibile incontrare i reali bisogni degli utenti.

La BCI più adatta e gli specifici segnali cerebrali da utilizzare dovrebbero essere valutati considerando i bisogni individuali del paziente e le sue condizioni di salute.

Ci sono stati solo pochi studi sull'usabilità delle BCI e c'è una generale mancanza di studi che si occupano della valutazione di questa tecnologia. È infatti necessario identificare gli strumenti adeguati per il processo di assegnazione e la valutazione delle BCI, poiché la maggior parte dei classici questionari psicologici e le misure fisiologiche non possono essere applicati alla vita di pazienti affetti da sindrome *locked-in*.