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

Design and Implementation of a Modular Framework for Brain–Computer Interface Applications with the DIADEM EEG Headset

Luigi Rizzo, Antonio Guerrieri

RT- ICAR-CS-25-09 **Giugno 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. Caschetto EEG Diadem di Bitbrain 4
2. Framework per l'implementazione di un sistema BCI 5
2.1. Software Bitbrain Device Viewer 6
2.2. Software OpenViBE Suite 6
2.2.1. Acquisition Server 6
2.2.2. Designer 7
2.3. Protocollo di comunicazione Bluetooth 9
2.4. Protocollo di comunicazione Lab Streaming Layer (LSL) 10
3. Configurazioni e step di funzionamento 11
Conclusioni 14
Bibliografia 15

Premessa

Il presente documento intende fornire una descrizione completa del framework utilizzato per l'acquisizione e la gestione di dati EEG all'interno di un esperimento BCI (Brain–Computer Interface). Lo scopo principale è mostrare come sia possibile integrare un caschetto EEG Bitbrain Diadem con software di supporto (Bitbrain Device Viewer e OpenViBE) attraverso protocolli standardizzati (Bluetooth e Lab Streaming Layer, LSL).
L'idea alla base di questo flusso di lavoro è garantire che i segnali cerebrali acquisiti possano essere trasferiti in modo stabile e sincronizzato verso una piattaforma di analisi e registrazione. L'intera catena, infatti, permette di partire dall'acquisizione dei segnali grezzi fino alla loro elaborazione e archiviazione in formato CSV, pronto per analisi offline o per essere utilizzato in applicazioni BCI online.

Il flusso operativo si articola in quattro passaggi principali:

1. Acquisizione tramite caschetto EEG Diadem con connessione Bluetooth;
2. Visualizzazione e pubblicazione del flusso dati mediante Bitbrain Device Viewer con output LSL;
3. Ricezione e gestione del flusso da parte di OpenViBE Acquisition Server;
4. Elaborazione, annotazione e salvataggio in CSV tramite OpenViBE Designer.

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. Caschetto EEG Diadem di Bitbrain

Il caschetto EEG *Diadem* sviluppato da *Bitbrain* è un dispositivo indossabile pensato per semplificare l'acquisizione di segnali cerebrali in contesti sia sperimentali sia applicativi. È progettato per essere facilmente installabile, con un'interfaccia intuitiva che permette all'operatore di ridurre i tempi di preparazione. La trasmissione dei dati avviene in modalità wireless tramite Bluetooth, eliminando la necessità di collegamenti cablati e consentendo una maggiore libertà di movimento al soggetto.

Figura 1 – Caschetto EEG Bitbrain DIADEM

Caratteristiche tecniche:

- Numero di canali EEG: 12, disposti nelle regioni frontale, parietale ed occipitale (Fp1, Fp2, AF7, AF8, F3, F4, P3, P4, PO7, PO8, O1, O2)
- Tipologia di sensori EEG: Sensori a secco (dry) con schermatura attiva e DRL ottimizzato
- Frequenza di campionamento EEG: 256 Hz, sufficiente per catturare le principali bande EEG
- Risoluzione dei dati EEG: 24 bit
- Ulteriori sensori integrati: IMU (9 assi: accelerometro, giroscopio, magnetometro)
- Trasmissione dei dati: Bluetooth 2.1
- Alimentazione: a batteria ricaricabile, con autonomia > 8h
- Peso: Caschetto: 185g, amplificatore: 122g

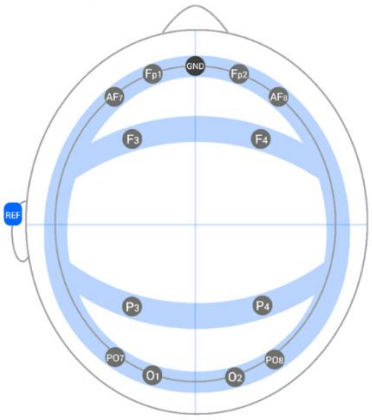

Figura 2 - Posizionamento elettrodi

Il caschetto Diadem è stato impiegato in numerosi studi di neuroscienze cognitive, ergonomia e interazione uomo–macchina, grazie alla sua praticità e al montaggio rapido. Diversi lavori scientifici ne hanno validato l'utilizzo in contesti reali, ad esempio nello studio della risposta cerebrale a stimoli visivi e sonori o nell'analisi dell'attenzione e dello stress.
Ad esempio, uno studio pubblicato da Fernandez et al. (2019) ha utilizzato il Diadem per indagare i correlati EEG della memoria di lavoro in ambienti non controllati, mostrando che la qualità del segnale rimane comparabile ai sistemi EEG tradizionali. Un altro lavoro, di Garcia-Molina et al. (2021), ha sfruttato il caschetto in un contesto di realtà virtuale per misurare l'impegno cognitivo durante simulazioni immersive, validando la sua usabilità in esperimenti ecologici. Inoltre, applicazioni in ambito clinico, come riportato da Becerra et al. (2020), hanno mostrato come il Diadem possa essere impiegato per monitorare lo stress e la fatica in soggetti durante attività quotidiane.
Sul fronte applicativo, il Diadem viene adottato in progetti di BCI sperimentali per il controllo di interfacce e dispositivi, nel monitoraggio neurofisiologico durante task di realtà virtuale e in valutazioni UX (User eXperience) in ambito commerciale. La sua diffusione si è estesa anche al settore industriale e clinico, con applicazioni per la valutazione della carica cognitiva, il monitoraggio dello stato mentale e la ricerca di biomarcatori EEG a supporto di studi clinici.
Dal punto di vista commerciale, il caschetto è stato promosso come soluzione versatile per laboratori di ricerca e aziende che desiderano integrare la misura EEG nei loro processi, senza la complessità dei sistemi tradizionali cablati. Grazie ai sensori dry e al design ergonomico, rappresenta infatti una tecnologia adatta a sessioni frequenti, dimostrazioni pubbliche e applicazioni fuori dal laboratorio.

2. Framework per l'implementazione di un sistema BCI

Il framework implementato e rappresentato nello schema di Figura 3 ha lo scopo di fornire un'infrastruttura completa per la realizzazione di esperimenti EEG–BCI. L'architettura collega in modo integrato il dispositivo di acquisizione (caschetto Diadem) con i software di supporto (Bitbrain Device Viewer e OpenViBE), sfruttando protocolli di comunicazione standard come Bluetooth e LSL. Questo permette di seguire l'intero flusso operativo: dalla raccolta del segnale EEG grezzo, alla sua sincronizzazione e visualizzazione in tempo reale, fino all'elaborazione, marcatura degli eventi e salvataggio dei dati in formato CSV. La pipeline è progettata per essere modulare e adattabile a diversi paradigmi BCI, garantendo da un lato stabilità per la registrazione offline e dall'altro la flessibilità necessaria per applicazioni online in tempo reale.

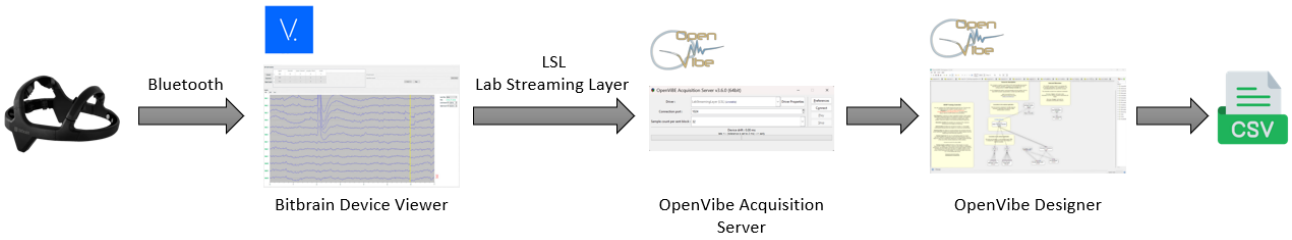

Figura 3 - Framework per esperimenti EEG-BCI

2.1. Software Bitbrain Device Viewer

Il *Bitbrain Device Viewer* è l'applicativo che funge da ponte tra il caschetto EEG e il resto della pipeline. Oltre a consentire la connessione e la configurazione del dispositivo, permette di monitorare in tempo reale la qualità dei segnali e di esportarli tramite il protocollo LSL (Lab Streaming Layer). Questo passaggio è cruciale perché rende i dati disponibili per software esterni in maniera standardizzata e sincronizzata. In questo modo, i dati EEG diventano immediatamente accessibili ad altre applicazioni compatibili con LSL.

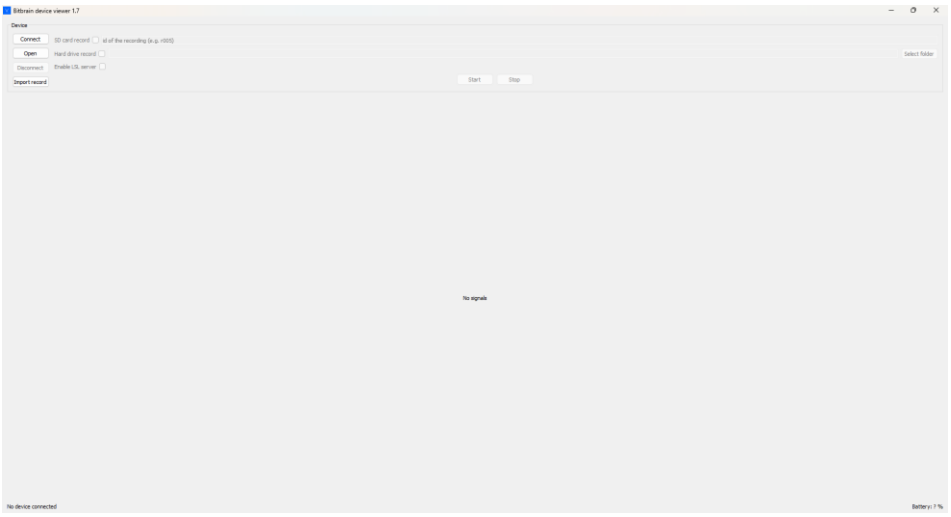

Figura 4 - Bitbrain Device Viewer GUI

2.2. Software OpenViBE Suite

OpenViBE rappresenta l'ambiente di lavoro per la gestione e l'elaborazione dei segnali EEG. È composto da due componenti principali:

- *Acquisition Server*: riceve i flussi dati, nel nostro caso provenienti dal Bitbrain Device Viewer;
- *Designer*: consente di costruire scenari di elaborazione in maniera modulare e visuale.

2.2.1. Acquisition Server

L'Acquisition Server è il modulo di OpenViBE deputato alla connessione con le sorgenti di dati EEG (o di altri segnali biomedici). Si tratta di un'applicazione autonoma, distinta dal *Designer*, che funge da interfaccia tra l'hardware di acquisizione e la piattaforma software. In pratica, il suo ruolo principale è quello di stabilire la comunicazione con il dispositivo, ricevere i campioni in tempo reale e organizzarli in un formato standard comprensibile da OpenViBE Designer.
Dal punto di vista architetturale, l'Acquisition Server gestisce i driver: ogni driver implementa le modalità di comunicazione con una specifica famiglia di dispositivi o con protocolli generici (ad esempio LSL). Una volta selezionato il driver, l'utente può configurare i parametri necessari, come il numero di canali, la frequenza di campionamento, i nomi e le unità di misura dei canali. In questo modo si crea un flusso di dati coerente che può essere utilizzato in qualsiasi scenario del Designer.

Un altro aspetto fondamentale è la gestione della sincronizzazione temporale. L'Acquisition Server associa un timestamp a ogni campione e fornisce strumenti per compensare eventuali ritardi introdotti dalla comunicazione o dal buffering. Questo è particolarmente importante negli esperimenti BCI, dove la precisione temporale è essenziale per correlare i segnali EEG con stimoli esterni o marker.
Dal punto di vista operativo, l'Acquisition Server fornisce un'interfaccia grafica semplice: una volta scelto il driver e configurati i parametri, l'utente può avviare la connessione e monitorare lo stato della comunicazione. L'applicazione espone poi il flusso verso il Designer, che può collegarsi tramite il box *Acquisition Client*.
In sintesi, l'Acquisition Server è un ponte standardizzato tra l'hardware e l'elaborazione software, progettato per astrarre le differenze tra dispositivi diversi e permettere la creazione di scenari sperimentali senza dover riscrivere procedure di acquisizione specifiche per ogni sistema.
Nel caso specifico del caschetto Diadem, non essendo presente il driver tra quelli già implementati, si è ricorso all'utilizzo del protocollo standard LSL e, pertanto, è stato necessario inserire nella catena di acquisizione il software BitBrain Device Viewer, che consente di esportare i segnali EEG nel protocollo LSL.
L'Acquisition Server, quindi, configurato con il driver LSL, permette di riconoscere e ricevere lo stream EEG.

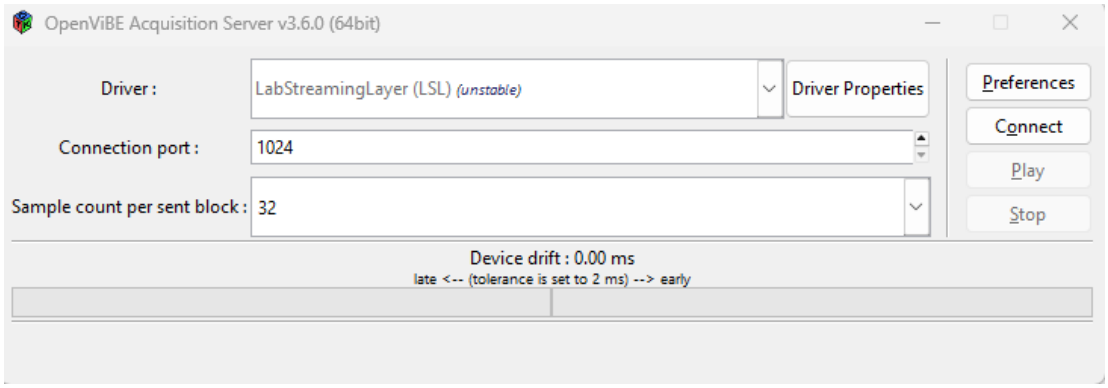

Figura 5 - OpenViBE Acquisition Server GUI

2.2.2. Designer

Il *Designer* è il cuore operativo di OpenViBE, un ambiente di sviluppo grafico che permette di costruire scenari di elaborazione dei segnali EEG (e di altri segnali biomedici) senza la necessità di scrivere codice. La logica del Designer si basa su un approccio modulare: ogni funzione di acquisizione, pre-processing, elaborazione, visualizzazione o salvataggio è rappresentata da un box. I box possono essere collegati tra loro attraverso flussi di dati o stimoli, permettendo così di comporre vere e proprie pipeline di elaborazione.
Grazie a questa architettura, l'utente ha la possibilità di progettare scenari complessi in maniera intuitiva, sfruttando un'interfaccia grafica drag-and-drop. Alcuni box sono dedicati a operazioni di base, come il filtraggio temporale o la selezione dei canali, altri a compiti più avanzati come l'estrazione di feature, la classificazione in tempo reale o la generazione di feedback visivi e sonori. Questa modularità rende il Designer estremamente flessibile e adatto sia a semplici registrazioni EEG sia a paradigmi BCI sofisticati.

Un elemento chiave è la gestione dei marker o stimoli, che vengono trattati come eventi discreti in grado di arricchire i dati continui. Attraverso box specifici, è possibile sincronizzare i marker con il segnale EEG, inviarli o riceverli da applicazioni esterne, e usarli per segmentare i dati o addestrare algoritmi di classificazione. In questo modo, il Designer diventa uno strumento completo per l'integrazione di stimoli, risposte e segnali fisiologici.
Dal punto di vista dell'utente, il Designer fornisce anche strumenti di monitoraggio e debug. Durante l'esecuzione di uno scenario, è possibile visualizzare i segnali in tempo reale, controllare la correttezza dei flussi, registrare i dati su file in diversi formati e monitorare le prestazioni (latenza, consumo di risorse, coerenza temporale). Ciò consente di adattare facilmente lo scenario sperimentale alle esigenze del momento.
Infine, il Designer è pensato per essere estensibile: sviluppatori esperti possono creare nuovi box personalizzati, aggiungendo algoritmi o interfacce specifiche. Questo approccio open-source ha reso OpenViBE una piattaforma molto diffusa nella comunità di ricerca sulle interfacce cervello-computer.
In sintesi, il Designer è lo strumento che traduce i flussi EEG acquisiti in un esperimento concreto, fornendo all'utente la possibilità di modellare, processare e sfruttare i dati in tempo reale o offline.
Oltre alle funzioni di base, il Designer include anche una serie di scenari preconfigurati forniti insieme all'installazione di OpenViBE, presenti precisamente nella cartella "*scenarios/bci-examples*". Questi esempi rappresentano delle vere e proprie applicazioni BCI già pronte all'uso, utili sia come punto di partenza per nuovi progetti sia come materiale didattico. Tra gli scenari più noti vi sono:

- *SSVEP (Steady-State Visual Evoked Potentials)*: paradigmi che utilizzano stimoli visivi lampeggianti a frequenze diverse per consentire all'utente di selezionare un comando semplicemente fissando lo sguardo su uno stimolo;
- *P300 Speller*: un'applicazione classica di comunicazione BCI basata sul potenziale evento-correlato P300, che permette di selezionare lettere o simboli attraverso la risposta cerebrale agli stimoli rari e inattesi;
- *Motor Imagery (MI)*: scenari che utilizzano l'immaginazione del movimento (ad esempio muovere una mano o un piede) per addestrare un classificatore capace di riconoscere le intenzioni motorie del soggetto;
- *Neurofeedback e biofeedback*: applicazioni che forniscono feedback visivo o sonoro all'utente in tempo reale, sulla base delle caratteristiche del suo EEG, con finalità di allenamento cognitivo o rilassamento.

Questi scenari possono essere facilmente modificati ed estesi, adattandosi a protocolli sperimentali specifici o a nuovi contesti applicativi.

Nel nostro caso specifico, il Designer viene utilizzato per generare lo scenario per l'esperimento BCI (ad esempio, stimoli SSVEP), acquisire i dati EEG provenienti dall'Acquisition Server e salvarli, insieme ai marker delle varie fasi dell'esperimento, su file CSV.

Lo scenario va creato in base alla tipologia di sistema BCI che si vuole realizzare. Nella pipeline descritta, le sezioni da includere nello scenario sono:

- Blocco *Acquisition Client*, che riceve i dati dall'*Acquisition Server*;

- Blocco *CSV File Writer*, che riceve i dati dall'*Acquisition Client* e i marker dal blocco controller dell'esperimento e li salva in maniera sincronizzata su file CSV;
- Blocchi per l'implementazione dell'esperimento: a seconda della tipologia del sistema BCI che si vuole realizzare e del meccanismo EEG che si vuole utilizzare, tale sezione va sviluppata ad hoc. Ad esempio, se l'applicazione riguarda il paradigma SSVEP, si può realizzare un'interfaccia con dei quadratini che lampeggiano a frequenze diverse. In tal senso, come già detto, sono presenti applicazioni già sviluppate riguardanti SSVEP, P300, Motor Imagery, che è possibile configurare, personalizzare o utilizzare già come sono.

Ad esempio, nell'immagine seguente è mostrato lo scenario "*ssvep-bci-2-training-acquisition*", modificato rispetto a quello già presente negli scenari di esempio installati con l'applicazione. In particolare, tale scenario modificato prevede l'esecuzione dell'esperimento relativo alla presentazione di stimoli SSVEP tramite n. 3 quadrati lampeggianti a frequenze diverse, con salvataggio dei dati EEG e dei marker corrispondenti alle varie fasi dell'esperimento su file CSV.

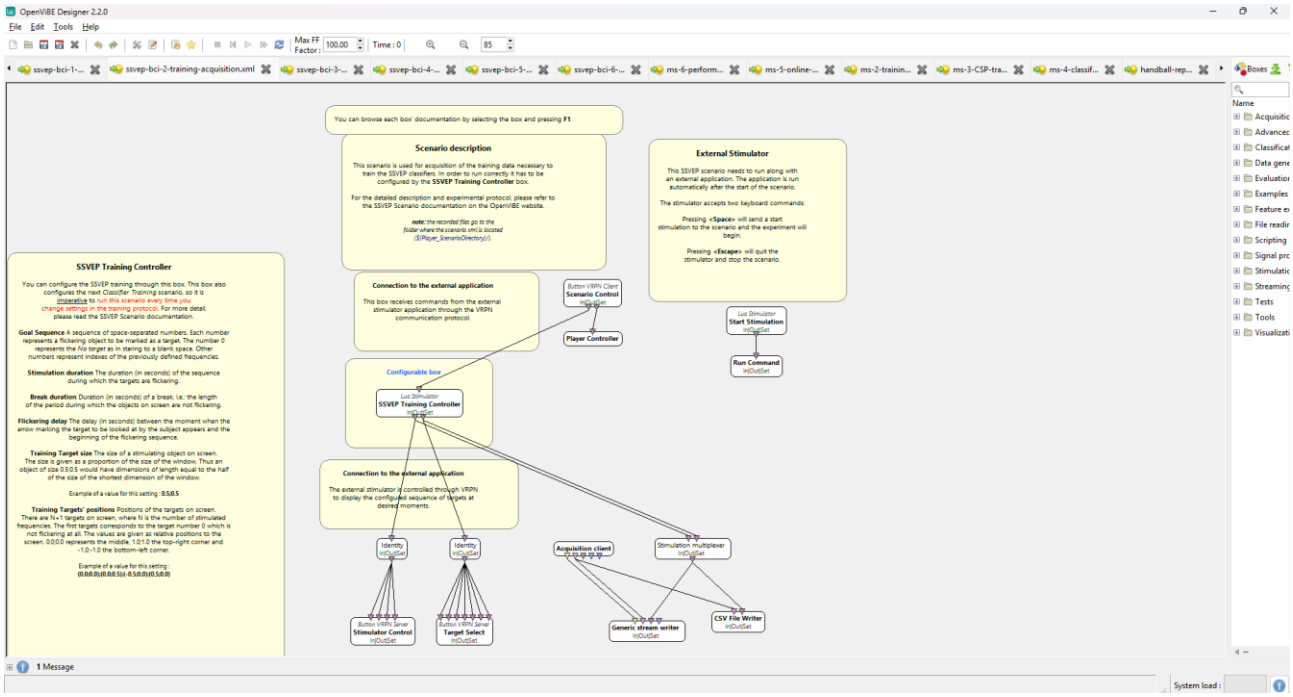

Figura 6 - Esempio di scenario per SSVEP in OpenViBE Designer

2.3. Protocollo di comunicazione Bluetooth

La comunicazione tra caschetto e PC avviene tramite protocollo *Bluetooth*.
Si tratta di un protocollo di comunicazione wireless a corto raggio, progettato per consentire la trasmissione di dati tra dispositivi senza la necessità di cavi. Basato su tecnologia a radiofrequenza nella banda ISM a 2,4 GHz, è ampiamente utilizzato in applicazioni consumer, industriali e biomedicali grazie al basso consumo energetico, alla semplicità di accoppiamento e alla diffusione universale dei dispositivi compatibili.

Dal punto di vista tecnico, Bluetooth si basa su una topologia a piconet, in cui un dispositivo funge da master e può connettersi a più dispositivi slave. Le versioni più recenti includono Bluetooth Low Energy (BLE), ottimizzato per dispositivi indossabili e sensori portatili, con un consumo ridotto e una latenza più contenuta rispetto alle versioni classiche.
Le caratteristiche principali del protocollo includono:

- *Basso consumo energetico*, ideale per dispositivi portatili alimentati a batteria;
- *Latenza ridotta*, che consente la trasmissione quasi in tempo reale di segnali fisiologici;
- *Sicurezza integrata*, grazie a meccanismi di autenticazione e crittografia;
- *Compatibilità universale*, essendo supportato dalla maggior parte dei computer, smartphone e tablet.

Nel contesto delle applicazioni EEG e BCI, il Bluetooth permette di eliminare i cavi tra il caschetto e il computer, migliorando la mobilità del soggetto e riducendo interferenze dovute al cablaggio. Il dispositivo EEG agisce come nodo trasmettitore, inviando i campioni registrati in tempo reale verso il software di acquisizione. Ciò consente di condurre esperimenti in condizioni più naturali, senza vincoli fisici, e di integrare la tecnologia BCI in scenari quotidiani o applicazioni portatili.
In sintesi, il Bluetooth rappresenta un mezzo di comunicazione standard, affidabile e flessibile, che ha favorito la diffusione di dispositivi EEG wireless, rendendo le interfacce cervello-computer più pratiche e accessibili.

2.4. Protocollo di comunicazione Lab Streaming Layer (LSL)

Il *Lab Streaming Layer* è lo standard di riferimento per la sincronizzazione e il trasporto di dati biomedici in tempo reale. Attraverso LSL, i flussi EEG acquisiti vengono corredati da metadati (nome dello stream, numero di canali, unità di misura, frequenza di campionamento) e inviati in rete locale con timestamp accurati.
Si tratta di un protocollo software open-source progettato per lo scambio in tempo reale di dati tra dispositivi, applicazioni e computer diversi all'interno di esperimenti neuroscientifici e psicofisiologici. LSL non è un protocollo hardware come il Bluetooth, bensì una libreria software che standardizza il formato dei dati e ne facilita la sincronizzazione temporale, indipendentemente dalla sorgente o dal sistema operativo utilizzato.

Una delle caratteristiche più rilevanti di LSL è la gestione accurata della sincronizzazione. Ogni campione di dati viene marcato con un timestamp ad alta precisione, calcolato tramite algoritmi di correzione del clock e compensazione della latenza di rete. Questo permette di combinare flussi provenienti da sorgenti diverse (EEG, marker sperimentali, stimoli visivi, sensori fisiologici) con una coerenza temporale che altrimenti sarebbe difficile da ottenere.

Dal punto di vista architetturale, LSL si basa sul concetto di stream, ossia flussi di dati continui a cui più applicazioni possono collegarsi come publisher (chi invia i dati) o subscriber (chi riceve i dati). Questo modello "publish–subscribe" consente grande flessibilità: un unico stream EEG può essere ricevuto simultaneamente da diversi software di elaborazione, di visualizzazione o di registrazione.
Le principali caratteristiche di LSL includono:

- *Compatibilità multipiattaforma*, con supporto per Windows, Linux e macOS;

- *Bassa latenza* e *sincronizzazione* precisa dei dati in rete locale;
- *Scalabilità*, grazie alla possibilità di trasmettere più stream in parallelo;
- *Interoperabilità*, poiché numerosi software (ad esempio OpenViBE, MATLAB, Python, Unity) includono interfacce native o librerie di supporto a LSL.

Nel contesto EEG e BCI, LSL svolge quindi un ruolo cruciale come strato intermedio: i dispositivi possono inviare i segnali grezzi tramite LSL, mentre diversi software possono contemporaneamente ricevere, visualizzare, registrare ed elaborare i dati, senza bisogno di driver dedicati o collegamenti esclusivi. Questo rende il protocollo una soluzione standard de facto nella ricerca neuroscientifica, favorendo l'integrazione di hardware e software eterogenei in un unico framework sperimentale.

In sintesi, LSL non è solo un protocollo di comunicazione, ma un ecosistema software versatile che abilita la sincronizzazione e l'integrazione dei dati in tempo reale, diventando una componente fondamentale per esperimenti BCI complessi e multimodali.

3. Configurazioni e step di funzionamento

Una volta descritte le singole componenti software e i protocolli di comunicazione, viene illustrato ora il flusso operativo da seguire per l'esecuzione dell'esperimento BCI. Questo insieme di configurazioni e passaggi garantisce la corretta acquisizione dei segnali EEG, la sincronizzazione con i marker e la registrazione dei dati per l'analisi successiva.

1. **Preparazione del caschetto EEG**
    - Verificare lo stato di carica della batteria: se il LED è rosso, va messo sotto carica.
    - Posizionare il caschetto Diadem sul soggetto.

2. **Connessione Bluetooth e Device Viewer**
    - Collegare il caschetto al PC tramite Bluetooth.
    - Avviare *Bitbrain Device Viewer* e procedere come segue:
        1. Cliccare su *Connect* e selezionare il dispositivo EEG a cui connettersi
        2. Effettuata la connessione, cliccare su *Open* e poi su *Start*, per visualizzare i segnali in tempo reale
        3. Correggere il posizionamento del caschetto ed agire sui singoli elettrodi finché la qualità del segnale risulta buona (tutti verdi)
        4. Stoppare l'acquisizione (pulsante *Stop*), mettere la spunta su *Enable LSL Server* e cliccare nuovamente su *Start*: i dati vengono esportati tramite protocollo LSL e sono disponibili per l'acquisizione.

3. **Configurazione ed avvio di OpenViBE Acquisition Server**
    - Avviare il software e configurarlo come segue:
        1. Selezionare il driver *LSL*
        2. In *Driver Properties*, selezionare lo stream EEG di interesse

3. Impostare *Connection Port*: generalmente si può lasciare su 1024
4. Cliccare su *Connect* e poi su *Play*: il server inizia ad acquisire lo stream LSL, rendendolo disponibile per il Designer.

- Verificare sulla barra in basso che i dati vengano ricevuti.

4. Esecuzione dello scenario dell'esperimento in OpenViBE Designer

Una volta avviato il *Designer*, bisogna aprire lo scenario di interesse per la conduzione dell'esperimento.

I passi da eseguire sono:

- Configurare i parametri del blocco *Acquisition Client*.

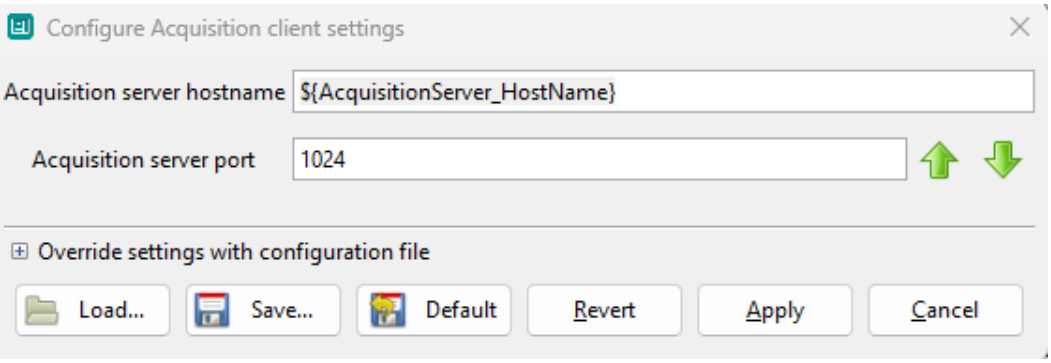

Figura 7 - Configurazione parametri box Acquisition Client

- Configurare i parametri del blocco *CSV File Writer*.

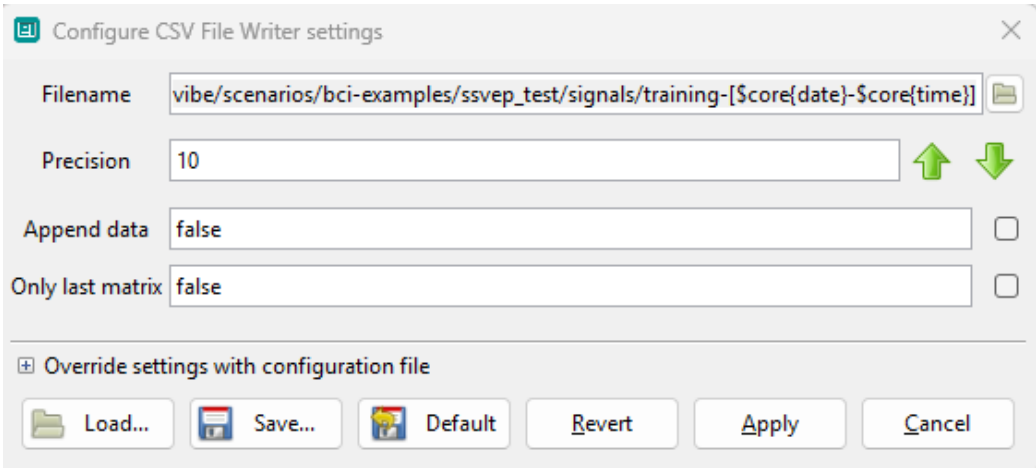

Figura 8 - Configurazione parametri box CSV File Writer

- Configurare eventuali parametri di altri blocchi.
- Lanciare l'esecuzione dello scenario premendo il pulsante *Start* (cerchiato in verde nella Figura 9).

Figura 9 - Pulsanti per la gestione dell'esecuzione dello scenario

Al termine dell'esecuzione dell'esperimento, verrà salvato in automatico un file CSV con i dati acquisiti, che ha il seguente formato:

Time:256Hz	Epoch	Channel 1	Channel 2	Channel 3	Channel 4	Channel 5	Channel 6	Channel 7	Channel 8	Channel 9	Channel 10	Channel 11	Channel 12	Event Id	Event Dat	Event Dur
0	0	-21979.0957	-4674.695313	-11498.18164	-29643.39258	11782.84473	14781.14746	68496.35938	55692.82422	1191.473022	-13838.85742	26023.64844	30741.51563			
0.00390625	0	-21981.17578	-4677.554688	-11500.49316	-29639.41406	11739.43066	14758.12695	68490.96875	55621.81641	1175.898438	-13856.25684	25992.87695	30734.82422			
0.0078125	0	-21981.15039	-4676.033691	-11503.32813	-29652.85938	11712.56445	14743.11133	68492.74219	55602.54297	1174.426147	-13855.07617	25990.77148	30739.84961			
0.01171875	0	-21983.30469	-4681.411621	-11508.9375	-29653.61328	11736.85059	14748.37988	68492.14844	55650.50781	1181.824097	-13848.05566	26004.0957	30743.5957			
0.015625	0	-21982.34375	-4681.618652	-11509.61914	-29664.66211	11752.87598	14752.26172	68493.69531	55685.97656	1176.044434	-13852.63086	26000.84766	30744.30273			
0.01953125	0	-21980.06836	-4678.771484	-11503.48633	-29666.59766	11759.64063	14768.45703	68493.23438	55680.70703	1175.655029	-13853.72559	26002.33203	30747.30664			
0.0234375	0	-21976.39453	-4677.919922	-11499.15527	-29631.62695	11760.85742	14774.49219	68482.32031	55637.97266	1176.798828	-13857.60742	26003.25586	30740.83398			
0.02734375	0	-21976.61328	-4677.481445	-11497.86523	-29624.20508	11725.70508	14752.8457	68478.3125	55597.39453	1163.049316	-13873.74219	25978.06836	30731.17383			
0.03125	0	-21970.38281	-4669.803711	-11492.98633	-29653.95508	11719.13477	14748.2832	68490.53125	55627.59375	1164.37561	-13871.0166	25975.66016	30737.29297			
0.03515625	0	-21971.03906	-4670.241699	-11493.66699	-29655.99805	11772.02734	14773.55469	68498.14844	55695.55078	1184.014282	-13854.0791	26005.5918	30745.60352			
0.0390625	0	-21977.25781	-4677.274902	-11499.72656	-29643.99023	11787.91895	14779.58984	68492.60938	55693.45703	1184.038574	-13860.12598	26002.92773	30741.66211			
0.04296875	0	-21977.2207	-4676.934082	-11500.55371	-29646.84961	11747.1084	14760.36523	68490.20313	55631.62109	1171.712646	-13868.83789	25982.37695	30736.51563			
0.046875	0	-21979.61719	-4678.041504	-11505.2627	-29644.09961	11729.92773	14749.88867	68488.58594	55604.98828	1171.493652	-13865.9541	25986.87891	30735.91797			
0.05078125	0	-21980.51758	-4679.306641	-11508.43848	-29641.55664	11740.01465	14744.5957	68489.35938	55630.91797	1167.551392	-13866.55078	25989.44531	30733.24219			
0.0546875	0	-21976.50391	-4674.196289	-11506.49219	-29665.69727	11752.42578	14751.23926	68499.44531	55674.64844	1169.571167	-13862.90039	25988.42383	30740.12891			
0.05859375	0	-21972.60938	-4671.95752	-11503.2793	-29662.44727	11783.50195	14776.40234	68501.77344	55692.76563	1181.422485	-13848.51855	26006.79688	30746.58984			
0.0625	0	-21973.37695	-4675.121094	-11503.52344	-29626.28516	11784.31738	14779.73633	68483.76563	55644.3125	1175.898438	-13854.56543	26001.50391	30736.85547			
0.06640625	0	-21970.89453	-4673.33252	-11502.29395	-29630.68945	11736.23047	14751.65332	68477.08594	55583.03516	1152.366089	-13873.20605	25967.17969	30725.29688			
0.0703125	0	-21963.13086	-4665.825195	-11496.08887	-29650.1582	11736.5957	14751.08105	68488.3125	55608.19922	1156.016357	-13865.71094	25974.55273	30733.05859			
0.07421875	0	-21961.3418	-4663.124023	-11494.09277	-29643.49023	11788.79492	14775.52637	68495.375	55677.56641	1174.51123	-13849.40625	26002.33203	30741.45508			
0.078125	0	-21962.64453	-4662.600586	-11495.21289	-29645.64453	11796.00977	14781.35449	68491.53906	55684.66016	1169.011475	-13853.43359	25991.18555	30736.42969			
0.08203125	0	-21964.32227	-4662.150391	-11494.1416	-29650.92578	11772.51465	14779.39551	68488.48438	55638.55859	1167.551392	-13856.87695	25981.87695	30734.43359			
0.0859375	0	-21968.00977	-4667.017578	-11497.84082	-29634.08398	11756.18555	14770.41602	68479.50781	55600.05859	1168.208374	-13861.59863	25981.43945	30728.17969			
0.08984375	0	-21971.49023	-4672.152344	-11502.31836	-29640.81445	11735.01367	14747.3457	68477.22656	55599.09766	1156.259766	-13875.63965	25966.04688	30721.66992			
0.09375	0	-21967	-4669.54834	-11498.97266	-29673.31445	11744.99121	14749.87695	68490.75	55650.87109	1156.344849	-13871.1748	25975.22266	30732.35352			

Figura 10 - Esempio di file CSV generato con i dati EEG ed i marker

Le colonne contengono le seguenti informazioni:

- *Time:256Hz*: timestamp relativo alla misura;
- *Epoch*: numero progressivo che identifica i vari blocchi dati ricevuti;
- *Channel1-12*: valori in uV rilevati dagli elettrodi relativi ai vari canali;
- *Event Id-Date-Duration*: informazioni relative ai marker delle varie fasi dell'esperimento.

Questo workflow standardizzato permette di avere un protocollo chiaro e ripetibile per ogni sessione sperimentale, minimizzando gli errori operativi e garantendo la qualità dei dati registrati.

Conclusioni

Il framework descritto rappresenta un'infrastruttura completa e modulare per la gestione di un esperimento EEG–BCI, in cui diverse componenti software e protocolli di comunicazione concorrono a garantire la raccolta, la sincronizzazione e l'elaborazione dei dati cerebrali in modo efficiente. L'utilizzo del caschetto Diadem di Bitbrain, dotato di sensori dry, fornisce una base affidabile per l'acquisizione dei segnali EEG, superando alcune delle limitazioni dei sistemi tradizionali con elettrodi gel-based.

La combinazione del Bitbrain Device Viewer con l'infrastruttura di OpenViBE (Acquisition Server e Designer) consente di realizzare pipeline di acquisizione e analisi che si adattano a diversi paradigmi sperimentali, dai compiti basati su potenziali evocati (P300, SSVEP) agli scenari di motor imagery e neurofeedback. I protocolli di comunicazione wireless, in particolare Bluetooth per la trasmissione tra caschetto e PC, e Lab Streaming Layer (LSL) per la sincronizzazione tra software eterogenei, garantiscono sia la mobilità del soggetto sia la precisione temporale necessaria a esperimenti neuroscientifici complessi.

Un aspetto di rilievo è la modularità dell'intero framework: ogni componente può essere sostituita, aggiornata o integrata con strumenti esterni (ad esempio librerie Python per machine learning, ambienti VR o interfacce di stimolazione personalizzate). Questo rende il sistema altamente scalabile e flessibile, adattabile sia a contesti di ricerca accademica sia a scenari applicativi concreti come riabilitazione, interazione uomo-macchina o applicazioni educative.

In prospettiva, il framework costituisce non solo una pipeline tecnica ma anche una base metodologica per la progettazione di esperimenti BCI riproducibili e comparabili. La possibilità di esportare i dati in formati aperti, di integrare marker e di estendere la pipeline con algoritmi personalizzati permette infatti di coniugare rigore scientifico e innovazione tecnologica.

In conclusione, questo sistema di interfacciamento tra hardware e software dimostra come sia possibile implementare un'infrastruttura solida e versatile per la ricerca e lo sviluppo di applicazioni BCI, aprendo la strada a studi futuri e a potenziali applicazioni real-time di grande impatto.

Bibliografia

Fernandez, X., Lopez, A., & Ramirez, M. (2019). EEG monitoring of working memory in ecological environments using a wearable dry-sensor headset. Journal of Cognitive Neuroscience, 31(8), 1123–1135.

Garcia-Molina, G., Perez, J., & Torres, L. (2021). Cognitive workload assessment in virtual reality with wearable EEG systems. Frontiers in Human Neuroscience, 15, 657–669.

Becerra, V., Alvarez, D., & Romero, P. (2020). Monitoring stress and fatigue in daily life using a portable EEG headset. Applied Psychophysiology and Biofeedback, 45(3), 215–227.

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.

https://labstreaminglayer.org

https://labstreaminglayer.readthedocs.io/

https://openvibe.inria.fr

https://www.bitbrain.com/neurotechnology-products/dry-eeg/diadem

https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth

https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/