



Universitatea
Transilvania
din Braşov

ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea: Design de Produs şi Mediu

Ing. Oana-Andreea RUŞANU

TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

Conducător ştiinţific

Prof. Univ. Dr. Ing. Ileana-Constanţa ROŞCA

BRAŞOV, 2024



Universitatea
Transilvania
din Braşov

Ing. Oana-Andreea RUŞANU

TEZĂ DE DOCTORAT

TITLU (română): CERCETĂRI PRIVIND UTILIZAREA INTERFEŢELOR DE TIP CREIER-COMPUTER ÎN EXTINDEREA FUNCŢIONALITĂŢII SISTEMELOR BIO-MECATRONICE

TITLU (engleză): RESEARCH ON THE USE OF BRAIN-COMPUTER INTERFACES IN EXTENDING THE FUNCTIONALITY OF BIO-MECHATRONIC SYSTEMS

Domeniul de doctorat: Inginerie mecanică

Comisia de analiză a tezei:

Prof.univ.dr.ing. Codruţa Ileana JALIU Preşedinte, Universitatea Transilvania din Braşov

Prof.univ.dr.ing. Ileana-Constanţa ROŞCA Conducător ştiinţific, Universitatea Transilvania Braşov

Prof.univ.dr.ing. Horia Cornel HEDEŞIU Referent oficial, Universitatea Tehnică din Cluj Napoca

Prof.univ.dr.ing. Laurenţiu-Dan MILICI Referent oficial, Universitatea Ştefan cel Mare Suceava

Prof.univ.dr.ing. Sorin Aurel MORARU Referent oficial, Universitatea Transilvania din Braşov

CUPRINS

LISTĂ DE ABREVIERI	6.....6	Pag. Teză
LISTA DE FIGURI	7...../	Pag. Rezumat
LISTA TABELELOR.....	22...../	
CAPITOLUL 1.....	23.....7	
INTRODUCERE	23.....7	
PREZENTAREA SUCCINTĂ A CAPITOLELOR TEZEI	26.....10	
ADRESAREA MULȚUMIRILOR	27.....11	
CAPITOLUL 2.....	31.....15	
STADIUL ACTUAL PRIVIND CERCETAREA SISTEMELOR DE TIP INTERFAȚĂ CREIER COMPUTER.....	31.....15	
2.1. ASPECTE PRIVIND ANALOGIA SISTEM NERVOS – COMPUTER.....	31.....15	
2.1.1. Corelația dintre creier și procesorul unui calculator	31.....15	
2.1.2. Comuniunea creier – calculator	32.....16	
2.1.3. Integrarea tuturor funcțiilor vitale la nivelul sistemului nervos	32...../	
2.1.4. Neuronul – structură, funcții, proprietăți, procese metabolice	34...../	
2.1.5. Controlul neuromotor - măduva spinării, cerebelul, emisferele cerebrale	35...../	
2.2. DESCRIEREA CONCEPTULUI DE INTERFAȚĂ CREIER-COMPUTER.....	38.....16	
2.2.1. Interfața creier-computer – definiții și funcții	38.....16	
2.2.2. Principiul de funcționare al unui sistem BCI.....	39...../	
2.2.3. Sisteme BCI – sincrone, asincrone, de intrare, de ieșire, interne.....	45...../	
2.2.4. Domeniile de aplicabilitate ale interfețelor creier-computer	46...../	
2.2.5. Utilizarea clipirilor oculare voluntare pentru BCI	47...../	
2.2.6. Componente hardware și software pentru dezvoltarea BCI.....	47...../	
CONCLUZII	51.....17	
2.3.1. Utilitatea unui sistem generalizat de tip interfață creier-computer	51.....17	
2.3.2. Necesitatea seturilor de date EEG pentru recunoașterea clipirilor	52.....18	
2.3.3. Domeniul BCI – Aplicabilitate, Performanță, Noutate, Provocări, Oportunități	54.....19	
2.3.3.1. Concluzii privind conceptul de interfață creier-computer	54.....19	
2.3.3.2. Concluzii privind domeniile de aplicabilitate ale sistemelor BCI	54.....19	
2.3.3.3. Concluzii privind factorii performanței de funcționare BCI.....	55.....19	
2.3.3.4. Concluzii privind gradul de noutate al interfeței creier-computer	55.....20	
2.3.3.5. Concluzii privind provocările actuale ale interfeței creier-computer	56.....21	
2.3.3.6. Concluzii privind perspectivele interfețelor creier-computer	56.....21	
CAPITOLUL 3.....	58.....23	
MOTIVAȚIA ABORDĂRII TEMEI ȘI OBIECTIVELE TEZEI	58.....23	
3.1. MOTIVAȚIA ABORDĂRII TEMEI ȘI OBIECTIVELE TEZEI	58.....23	
3.2. PERSPECTIVĂ GENERALĂ PRIVIND APLICAȚIILE DEZVOLTATE	60.....25	
CAPITOLUL 4.....	62.....27	
CONSIDERAȚII TEORETICE PRIVIND SISTEMELE DE TIP INTERFAȚĂ CREIER-COMPUTER.....	62...../	
4.1. Evoluția interfețelor creier-computer.....	62...../	
4.2. Clasificarea sistemelor de tip interfață creier-computer.....	63...../	
4.3. Metode de achiziție a semnalelor cerebrale	64...../	
4.4. Tipuri de semnale electroencefalografice utilizate în interfețele creier-computer	68.....27	
CAPITOLUL 5.....	75.....30	

METODOLOGIA CERCETĂRILOR	75.....30
5.1. PERSPECTIVĂ DE ANSAMBLU - CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE	75.....30
5.2. CĂȘTI PORTABILE PENTRU ACHIZIȚIA SEMNALELOR ELECTROENCEFALOGRAFICE	76...../
5.2.1. Casca NeuroSky cu un singur senzor EEG	76...../
5.2.2. Casca Emotiv Insight cu 5 senzori EEG	77...../
5.2.3. Casca Gtec Unicorn cu 8 senzori EEG	78...../
5.3. PLATFORME HARDWARE PENTRU DEZVOLTAREA SISTEMELOR MECATRONICE	78...../
5.3.1. Sistemul de dezvoltare NI myRIO	78...../
5.3.2. Platforma de dezvoltare Raspberry Pi	79...../
5.3.3. Platforma de dezvoltare Micro:Bit	79...../
5.3.4. Platforma de dezvoltare ArduinoUno	79...../
5.3.5. Platforma de dezvoltare Arduino Mega.....	79...../
5.3.6. Platforma de dezvoltare Arduino Nano 33 IoT	80...../
5.3.7. Kitul Arduino Engineering Rev 2.....	80...../
5.4. SISTEME MECATRONICE CONTROLATE DE INTERFAȚA CREIER-COMPUTER.....	81...../
5.4.1. Roboți mobili	81...../
5.4.2. Braț robotic.....	83...../
5.4.3. Mână robotică.....	85...../
5.4.4. Casă inteligentă.....	86...../
5.4.5. Sisteme de afișare	86...../
5.4.6. Motocicletă miniaturală.....	87...../
5.4.7. Automat pentru livrarea sucurilor	88...../
5.5. PLATFORME SOFTWARE FURNIZATE DE CĂȘTILE EEG	89...../
5.5.1. Aplicația software oficială EmotivPRO GUI.....	89...../
5.5.2. Aplicația software oficială EmotivBCI.....	89...../
5.5.3. Aplicația software oficială GTEC Unicorn P300 Speller.....	89...../
CAPITOLUL 6.....	91.....32
IMPLEMENTĂRI ORIGINALE. ALGORITMI. SECVENȚE DE PROGRAMARE. APLICAȚII BCI	91.....32
6.1. UTILIZAREA CLIPIRII OCULARE VOLUNTARE CA SEMNAL DE CONTROL BCI	91.....32
6.2. DETECTAREA ȘI CUANTIFICAREA CLIPIRILOR OCULARE VOLUNTARE	92.....33
6.2.1. Detectarea clipirilor oculare voluntare cu funcția ThinkGear.....	92.....33
6.2.2. State-Machine pentru numărarea clipirilor oculare voluntare	93...../
6.2.3. Tranziții și selecții la nivelul comenzilor bazate pe clipirile oculare voluntare.....	94.....34
6.2.4. Algoritmul Divide et Impera utilizând clipirile oculare voluntare multiple	95.....34
6.2.5. Detectarea și numărarea clipirilor oculare voluntare prin analiza semnalului EEG	95...../
6.3. ACHIZIȚIA, ANALIZA ȘI CLASIFICAREA SEMNALELOR EEG UTILIZÂND METODE BAZATE PE REȚELELE NEURONALE ARTIFICIALE DIN LABVIEW ȘI PYTHON.....	97.....35
6.3.1. Aspecte generale	97.....35
6.3.2. Achiziția și procesarea semnalului EEG brut în Modul Manual.....	97...../
6.3.3. Achiziția și procesarea semnalului EEG brut în Modul Automat	98...../
6.3.4. Pregătirea secvențelor temporale de date EEG în LabVIEW	98...../
6.3.5. Stabilirea etichetelor pentru fiecare secvență temporală EEG.....	98...../
6.3.6. Generarea datelor EEG pentru antrenamentul și testarea RNA.....	99.....36
6.3.7. Antrenarea modelelor de clasificare RNA prin setarea parametrilor.....	99.....36
6.3.8. Antrenarea modelelor de clasificare RNA prin generarea parametrilor optimi	100.....37
6.3.9. Activarea și dezactivarea distribuirii aleatorii a datelor EEG	101...../
6.3.10. Testarea modelelor de clasificare RNA.....	101...../

6.3.11. Clasificarea în Python a clipirilor oculare voluntare utilizând RNA.....	102...../
6.4. DETECTAREA AMPLITUDINII CLIPIRII OCULARE UTILIZÂND LOGICA FUZZY	103...../
6.5. DETECTAREA ȘI UTILIZAREA BIOPOTENȚIALELOR EVOCATE P300	104...../
6.5.1 Achiziția și analiza în mediul LabVIEW a pachetelor de date UDP.....	104...../
6.5.2 Aplicații LabVIEW și Python pentru comunicarea cu Chat GPT	105...../
6.5.3 Aplicație LabVIEW pentru accesarea resurselor de Internet.....	106...../
6.6. DEZVOLTAREA APLICAȚIILOR AUXILIARE INTERFEȚELOR CREIER-COMPUTER.....	106...../
6.6.1. Integrarea dintre mediul open-sourceNode-Red și casca EEG Emotiv Insight.....	106...../
6.6.2. Integrarea dintre mediul de dezvoltare Node-Red și platforma Micro:Bit	107...../
6.6.3. Aplicație Android de tip Chat implementată în LabVIEW și MIT App Inventor 2	108...../
6.6.4. Aplicații LabVIEW pentru proiectarea și controlul modelelor robotice 3D	108...../
6.6.5. Aplicație Android dezvoltată în MIT App Inventor pentru afișarea imaginilor	111...../
6.6.6. Aplicație Python pentru detectarea ritmului Alpha de la casca Emotiv.....	112...../
6.6.7. Aplicație Python pentru integrarea Emotiv–Raspberry Pi prin WebSockets.....	113...../
6.6.8. Instrument LabVIEW pentru un mediu experimental automatizat.....	113...../
6.6.9. Aplicații integrate LabVIEW & Python pentru accesarea Chat GPT	114...../
6.6.10. Aplicații integrate LabVIEW & Arduino pentru sistemele de afișare	116...../
CAPITOLUL 7.....	122.....38
CERCETĂRI EXPERIMENTALE. REZULTATE ȘI DISCUȚII	122.....39
7.1. ASPECTE GENERALE PRIVIND EXPERIMENTAREA BCI	122.....39
7.1.1. Eșantionul de subiecți voluntari la experimentarea BCI	122.....39
7.1.2. Standurile EEG-HW-SW utilizate la experimentarea BCI.....	124.....39
7.1.3. Etapele preliminare experimentării BCI	124.....40
7.1.4. Etapele de calibrare pentru experimentarea BCI	127...../
7.1.5. Etapele de experimentare și parametri de performanță BCI	129.....43
7.1.6. Chestionar de feedback adresat subiecților voluntari ulterior experimentării BCI	144.....56
7.2. ANALIZA GENERALĂ A REZULTATELOR OBȚINUTE LA EXPERIMENTAREA BCI	145.....57
7.2.1. Analiza descriptiv-calitativă	145.....57
7.2.2. Analiza descriptiv-cantitativă	148.....60
7.2.3. Analiza inferențială	153...../
7.2.4. Analiza multi-criterială	190...../
7.2.5. Analiza SWOT	192.....65
7.3. APLICAȚII BCI BAZATE PE INTEGRAREA dintre EEG - HARDWARE – SOFTWARE	200.....66
7.3.1. Aspecte esențiale privind aplicațiile BCI dezvoltate și experimentate	200...../
7.3.2. Aplicație BCI bazată pe integrarea în LabVIEW dintre NeuroSky și NI myRIO	203...../
7.3.3. Aplicație BCI bazată pe integrarea în Matlab dintre Neurosky și Arduino Nano 33.....	206...../
7.3.4. Aplicație BCI bazată pe integrarea în Python dintre Neurosky și Raspberry Pi.....	210...../
7.3.5. Aplicație BCI bazată pe integrarea în NodeRED dintre Emotiv și Micro:Bit.....	215...../
7.3.6. Aplicație BCI bazată pe integrarea în Python dintre Emotiv și Arduino	218...../
7.3.7. Aplicație BCI bazată pe integrarea în LabVIEW dintre Unicorn și Arduino	221...../
7.4. APLICAȚII PENTRU CERCETAREA BCI BAZATĂ PE INTELIGENȚA ARTIFICIALĂ.....	225.....69
7.4.1. Aspecte esențiale privind aplicațiile BCI dezvoltate și experimentate	225.....69
7.4.2. Aplicație LabVIEW pentru monitorizarea și analiza datelor EEG de la NeuroSky	226...../
7.4.3. Aplicație Python pentru monitorizarea și analiza datelor EEG de la NeuroSky	237...../
7.4.4. Aplicație LabVIEW de tip BCI bazată pe logica Fuzzy	246...../
7.5. APLICAȚII BCI PENTRU COMUNICARE ȘI TRANSMITERE MESAJE	249.....70
7.5.1. Aspecte esențiale privind aplicațiile BCI dezvoltate și experimentate	249.....70

7.5.2. Aplicație BCI pentru controlul unei tastaturi virtuale.....	251...../
7.5.3. Aplicații BCI pentru transferul mesajelor chat la smartphone cu Android	255...../
7.5.4. Aplicații BCI pentru afișarea mesajelor text la nivelul sistemelor cu led-uri	260...../
7.5.5. Aplicație BCI pentru comunicarea cu Chat GPT utilizând P300 Speller	267...../
7.5.6. Aplicație BCI pentru accesarea resurselor de Internet utilizând P300 Speller.....	270...../
7.6. APLICAȚII BCI PENTRU CONTROLUL SISTEMELOR ROBOTIZATE	275.....72
7.6.1. Aspecte esențiale privind aplicațiile BCI dezvoltate și experimentate	275.....72
7.6.2. Aplicație BCI pentru controlul unei mâini robotice utilizând NeuroSky și Arduino.....	276...../
7.6.3. Aplicație BCI pentru controlul unui braț robotic utilizând NeuroSky	280...../
7.6.4. Aplicație BCI pentru controlul unui robot mobil utilizând NeuroSky și Arduino.....	284...../
7.6.5. Aplicație BCI pentru controlul unui sistem mecatronic utilizând P300 Speller.....	288...../
APLICAȚII BCI PENTRU SIMULARE ȘI ANTRENAMENT BAZATE PE MODELE 3D	292.....74
7.7.1. Aspecte esențiale privind aplicațiile BCI dezvoltate și experimentate	292.....75
7.7.2. Aplicație BCI pentru controlul unei mâini robotice 3D utilizând NeuroSky	294...../
7.7.3. Aplicație BCI pentru controlul hologramelor cu Yoda utilizând NeuroSky	297...../
7.7.4. Aplicație BCI pentru controlul unui braț robotic 3D utilizând P300 Speller	301...../
7.7.5. Aplicație BCI pentru controlul unui scaun cu roțile 3D utilizând P300 Speller	306...../
7.7.6. Aplicație BCI pentru controlul unui scooter 3D utilizând P300 Speller	310...../
7.7.7. Aplicație BCI pentru simularea Juice Vending Machine utilizând P300 Speller	312...../
CAPITOLUL 8.....	318.....77
Concluzii finale. Contribuții originale, Modul de valorificare a rezultatelor și direcții viitoare de cercetare	318.....77
8.1. Concluzii finale.....	318.....77
8.2. Contribuții originale.....	329.....88
8.3. Valorificarea rezultatelor cercetării.....	332.....91
8.4. Direcții viitoare de cercetare	336.....95
BIBLIOGRAFIE	338.....97
ANEXE	378...../
ANEXE – Secțiunea 6.2.2	378...../
ANEXE – Secțiunea 6.2.3	384...../
ANEXE – Secțiunea 6.2.4	394...../
ANEXE – Secțiunea 6.2.5	400...../
ANEXE – Secțiunea 6.3.2	410...../
ANEXE – Secțiunea 6.3.3	415...../
ANEXE – Secțiunea 6.3.4	418...../
ANEXE – Secțiunea 6.3.5	419...../
ANEXE – Secțiunea 6.3.6	421...../
ANEXE – Secțiunea 6.3.7	425...../
ANEXE – Secțiunea 6.3.8	427...../
ANEXE – Secțiunea 6.3.9	429...../
ANEXE – Secțiunea 6.3.10.....	431...../
ANEXE – Secțiunea 6.3.11	432...../
ANEXE – Secțiunea 6.4.....	453...../
ANEXE – Secțiunea 6.5.2	458...../
ANEXE – Secțiunea 6.5.3	462...../
ANEXE – Secțiunea 6.6.1	466...../
ANEXE – Secțiunea 6.6.2	468...../

ANEXE – Secțiunea 6.6.3.....	469...../
ANEXE – Secțiunea 6.6.4.....	477...../
ANEXE – Secțiunea 6.6.5.....	494...../
ANEXE – Secțiunea 6.6.10	496...../
ANEXE – Secțiunea 7.1.3	500...../
ANEXE – Secțiunea 7.1.6	516...../
ANEXE – Secțiunea 7.2.1	518...../
ANEXE – Secțiunea 7.4.2.....	539...../

LISTĂ DE ABREVIERI

ANNs = Artificial Neural Networks

BCI = Brain-Computer Interface = Interfața Creier-Computer

BMI = Brain-Machine Interface = Interfața Creier-Mașină

LIS = Locked-In Syndrome

SSVEPs = Steady-State Visual Evoked Potentials = Potențiale Evocate de Stare Staționară / Regim Permanent

EEG = Electroencephalography = Electroencefalografie

MEG = Magnetoencephalography = Magnetoencefalografie

ECoG = Electrocorticography = Electrocorticografia

fNIRS = Functional Near-Infrared Spectroscopy = Spectroscopie în Infraroșu Apropiat

fMRI = Functional Magnetic Resonance Imaging = Imagistică prin Rezonanță Magnetică Funcțională

PET = Positron Emission Tomography = Tomografie cu Emisie de Pozitron

SPECT = Single Photon Emission Computed Tomography

SCP = Slow Cortical Potentials = Potențiale Corticale Lente

MI = Motor Imagery = Imaginare Motorie

ERD = Event-Related Desynchronization

ERS = Event-Related Synchronization

SMRs = Sensorimotor Rhythms

ERPs = Event Related Potentials

SVM = Supported Vector Machines

LDA = Linear Discriminant Analysis

CAPITOLUL 1

INTRODUCERE

Interfața creier-computer (termenul oficial fiind BCI = Brain-Computer Interface) reprezintă un domeniu de cercetare multidisciplinară, oferind aplicații destinate ingineriei medicale, prin extinderea funcționării sistemelor bio-mecatronice în vederea asistării persoanelor cu dizabilități neuromotorii. Prin valorificarea cunoștințelor teoretice și experimentale din domenii variate (neuroștiințe, psihologie, procesarea semnalelor, învățarea automată, inteligența artificială, știința calculatoarelor, mecatronica, ingineria electronică, realitate virtuală), interfața creier-computer prezintă potențialul dezvoltării atât a aplicațiilor non-clinice, adresate zonelor de delectare/entertainment, precum jocuri video digitale, marketing/promovare publicitară, meditație, sporirea abilităților cognitive, cât și, în special, a aplicațiilor medicale, realizate în scopul asistării oamenilor care au suferit un accident vascular cerebral, leziuni la nivelul măduvei spinării sau au fost diagnosticați cu scleroză laterală amiotrofică, sindromul Locked-In (afecțiunea lui Lou Gehrig), tetraplegie sau paralizii, astfel că ei nu își mai pot deplasa membrele superioare și inferioare folosind modalitățile normale de control, precum mușchii și nervii periferici. Această categorie de subiecți, care necesită sprijinul permanent acordat de o persoană însoțitoare, reprezintă beneficiarii ideali ai tehnologiei de tip interfață creier-computer, fiind singura soluție capabilă să le ofere independență și autonomie în desfășurarea tuturor activităților din viața cotidiană.

Sistemele BCI constituie inovații hardware și software, care s-au dezvoltat odată cu evoluția tehnologiei informaționale, prin proiectarea dispozitivelor compacte, mobile, portabile și descoperirile realizate în știința calculatoarelor, performanțele determinate de procesarea volumului extrem de mare de date, amplificarea vitezei de calcul și implementarea algoritmilor complecși de inteligență artificială, compatibile cu execuția în timp real în vederea clasificării sarcinilor cognitive asociate cu intențiile mentale ale persoanelor cu dizabilități neuromotorii. Prin urmare, interfața creier-computer oferă posibilitatea translatării gândurilor în acțiuni asupra unor dispozitive bio-mecatronice de asistare, precum un braț robotizat, un robot mobil multifuncțional, o mână robotică, un exoschelet, un sistem de comunicare augmentativă sau o aplicație de simulare virtuală. Gândurile sau intențiile mentale privind efectuarea unor acțiuni, transmise de subiecți pot fi interpretate sau analizate, într-o anumită măsură, la momente de timp bine definite/delimitate sau în mod permanent, prin aplicarea tehnicilor de procesare, identificarea trăsăturilor specifice și clasificarea semnalelor cerebrale, achiziționate de la nivelul creierului. Astfel, există atât metode invazive (electrozii implantați în interiorul sau în exteriorul scoarței cerebrale – electrocorticografia), cât și non-invazive (electroencefalografia [45], [86], [87] magnetoencefalografia, spectroscopia în infraroșu apropiat, imagistica prin rezonanță magnetică funcțională, tomografie cu emisie de pozitroni) pentru măsurarea biopotențialelor neuronale. Tehnica de investigație prin electroencefalografie oferă o rezoluție temporală ridicată, portabilitate, caracter non-invaziv, simplitate în utilizare, conducând la dezvoltarea versiunilor comerciale de căști și seturi pentru detectarea semnalelor electroencefalografice, modelele lansate la momentul actual (NeuroSky Mindwave, Emotiv Insight, Emotiv EPOC, Muse, GTEC Unicorn) fiind accesibile din punct de vedere al

costurilor, atractive și performante în vederea dezvoltării unor aplicații simple sau avansate de tip interfață creier-computer.

Primele investigații la nivelul creierului uman, cu ajutorul tehnicii de electroencefalografie, au fost realizate de cercetătorul Hans Berger în anul 1929. Primele sisteme de tip interfață creier-computer, testate pe maimuțe, au fost dezvoltate în anii 1969-1970. Experimentele de tip interfață creier-computer, realizate pe subiecți umani, au fost efectuate la începutul anilor '90, iar definiția BCI a fost stabilită de cercetătorul Wolpaw în anul 2000. Cu toate că sistemele BCI au cunoscut o evoluție ascendentă de-a lungul ultimelor două decenii, la momentul actual încă există numeroase provocări importante cu care se confruntă cercetătorii, astfel că nu s-a realizat, până în prezent, un sistem fiabil, portabil, eficient, atractiv, capabil să funcționeze în timp real și să se adapteze unei categorii largi de utilizatori ai interfețelor creier-computer. Provocările, care trebuie depășite prin cercetarea multidisciplinară, se referă la gradul ridicat de dificultate privind abilitățile de efectuarea sarcinilor cognitive (spre exemplu: concentrarea atenției asupra unor stimuli luminoși, imaginarea deplasării membrelor inferioare sau superioare, reproducerea mentală a unor cuvinte, sunete sau acțiuni determinate de obiectele tridimensionale), variabilitatea fiziologiei cerebrale și a structurilor anatomice specifice fiecărui individ, discontinuitatea semnalelor aleatoare detectate prin electroencefalografie, selecția metodelor optime de procesare și clasificare a semnalelor (spre exemplu: algoritmi bazați pe rețele neuronale artificiale, analiza discriminantului liniar – LDA, analiza prin transformata Wavelet sau învățarea automată utilizând SVM = supported vector machines), cerințele adresate sistemelor de calcul privind performanțele hardware și software ridicate, vitezele sporite și capacitatea mare a memoriei în vederea manipulării în timp real și stocării volumului extins de date, alături de versatilitatea modalităților de control și complexitatea structurii sistemelor mecatronice comandate.

Având în vedere provocările anterior menționate, conform literaturii de specialitate, rezultate remarcabile privind dezvoltarea, experimentarea și optimizarea cu succes a unei interfețe creier-computer, de către persoanele cu dizabilități neuromotorii s-au putut obține numai în cadrul centrelor universitare de cercetare multidisciplinară, unde există condiții controlate de mediu, echipamente masive și costisitoare, posibilitatea efectuării tehnicilor invazive de achiziție a semnalelor cerebrale, precum și existența sistemelor multifuncționale care pot fi comandate. Prin urmare, la momentul actual, se constată că sistemele de tip interfață creier-computer nu sunt comercializate pe scară largă și nu oferă un grad suficient de ridicat de încredere, nu prezintă un caracter generalizat, nu sunt portabile, nu furnizează o construcție compactă, nu au demonstrat precizie sau acuratețe optimă alături de un timp rapid de răspuns privind detectarea și interpretarea intențiilor mentale. De aceea, prin raportarea la activitatea științifică a cercetătorilor novici sau cu experiență limitată în domeniul BCI ori considerând situația doctoranzilor ori a masteranzilor, se remarcă și se justifică predilecția spre dezvoltarea, testarea și optimizarea prototipurilor experimentale de tip interfață creier-computer pentru controlul dispozitivelor mecatronice, utilizând căști portabile de achiziție a semnalelor electroencefalografice și platforme multifuncționale cu microcontroller, precum Arduino și Raspberry Pi. Astfel, sunt acceptate și încurajate inițiativele privind lansarea dispozitivelor simple și eficiente de tip interfață creier-computer, prin extinderea domeniilor de aplicabilitate. Tehnologia portabilă pentru achiziția non-invazivă a semnalelor electroencefalografice, dispozitivele biomecatronice compacte care pot fi controlate și energia, pasiunea, motivația intrinsecă pe care o manifestă cercetătorii novici privind interfețele creier-computer reprezintă argumentele care justifică, pe deplin, dezvoltarea dispozitivelor simple, având costuri reduse, un aspect profesionist, care permit antrenamentul mental,

demonstrarea principiului de funcționare BCI și experimentarea sistemelor BCI, conducând treptat la evoluția avansată în domeniul interfețelor creier-computer.

Această teză de doctorat s-a bazat pe utilizarea unor echipamente portabile, compacte, ergonomice, având costuri reduse, oferind fiabilitate sporită, atractivitate și precizie ridicată, scopul final constând în obținerea unor sisteme simple de tip interfață creier-computer destinate experimentării, testării și utilizării la domiciliul personal al utilizatorului. Prin urmare, conform titlului propus tezei, s-au utilizat interfețele creier-computer în vederea extinderii funcționalității sistemelor bio-mecatronice, precum: un robot mobil, un braț robotic, o mână robotică, o motocicletă miniaturală, sau modelelor tridimensionale, simulărilor virtuale, unui sistem pentru controlul hologramelor, unei tastaturi virtuale pentru aplicații de scriere și comunicare ori unor sisteme virtuale de afișare efecte grafice sau mesaje text, respectiv accesarea resurselor de Internet ori adresarea întrebărilor asistentului Chat GPT. Mai mult decât atât, referitor la un element cu grad ridicat de originalitate, teza de doctorat prezintă un instrument software LabVIEW cu funcționalități complexe și flexibile, destinate unor aplicații diverse de tip interfață creier-computer, prin achiziția semnalului electroencefalografic brut de la biosenzorul integrat de casca portabilă NeuroSky Mindwave, procesarea datelor EEG, selecția și extragerea trăsăturilor caracteristice, respectiv calculul mărimilor statistice stabilite și clasificarea, bazată pe inteligența artificială, executată atât offline cât și online (în timp real) a variațiilor de biopotențial neuronal, în final rezultând comenzile necesare la controlul sistemelor bio-mecatronice.

Având în vedere necesitatea utilizării căștii portabile NeuroSky, cel mai simplu de recunoscut, cuantificat și precis semnal de control este reprezentat de clipirea oculară voluntară, care s-a utilizat pentru definirea diferitelor comenzi într-un sistem de tip interfață creier-computer, destinat persoanelor cu dizabilități neuromotorii. Analizând literatura științifică din domeniul interfețelor creier-computer, se constată existența unui număr redus de seturi de date EEG cuprinzând clipiri oculare voluntare, de diferite tipuri, utilizate în scopul determinării semnalelor de control într-un sistem BCI. De aceea, pentru a răspunde unei astfel de cerințe, această teză de doctorat cuprinde seturi exhaustive de date EEG generate în urma efectuării clipirilor oculare, simple, duble sau triple, în vederea antrenării și testării modelelor de clasificare bazate pe rețelele neuronale artificiale.

În ansamblu, teza actuală propune o varietate de aplicații software originale (programe implementate în LabVIEW, Matlab, Python, Arduino) și hardware (sisteme mecatronice controlate cu NI myRIO, Arduino – diferite versiuni, Raspberry Pi, Micro:Bit) simple, portabile, atractive, eficiente, de tip interfață creier-computer, bazate pe semnalele de control determinate de clipirea oculară voluntară sau biopotențialele evocate P300, rezultând simularea, experimentarea, testarea principiului de funcționare al unei astfel de tehnologii inovative, complexe și provocatoare, adresate persoanelor cu dizabilități neuromotorii. Particularitățile tezei de doctorat sunt reprezentate de: aplicația BCI având scop general, facilitând achiziția, procesarea, extragerea trăsăturilor caracteristice și clasificarea semnalului EEG brut detectat de biosenzorul NeuroSky, multitudinea seturilor de date EEG cuprinzând clipiri oculare voluntare, simple, duble, triple și diversitatea aplicațiilor controlate prin extinderea funcționalității sistemelor biomecatronice experimentale, modelelor reale sau virtuale (roboți mobili, braț robotizat, mână robotică, motocicletă miniaturală, sistem de control a unor holograme) și a sistemelor de comunicare cu ajutorul tastaturii virtuale, sistemelor virtuale de afișare sau a unei aplicații Android pentru transferul mesajelor chat.

PREZENTAREA SUCCINTĂ A CAPITOLELOR TEZEI

Capitolul 1 – Introducerea – prezintă aspecte generale privind interfețele creier-computer, provocările cu care se confruntă cercetătorii care abordează un astfel de domeniu, posibilele dezvoltări, implementări, soluții care pot fi realizate la nivelul studiilor de doctorat, toate acestea constituind, totodată, fundamentul desfășurării activităților experimentale și conceperii aplicațiilor originale din cadrul acestei teze de doctorat.

Capitolul 2 cuprinde Stadiul Actual privind cercetarea în domeniul sistemelor de tip interfață creier-computer. Sunt prezentate aspecte referitoare la analogia dintre sistemul nervos și computer. De asemenea, s-a introdus un subcapitol cuprinzând o serie de noțiuni teoretice privind descrierea conceptului de interfață creier-computer. După aceea, sunt expuse concluziile care generează, totodată, direcțiile de cercetare pe care se concentrează teza de doctorat.

Capitolul 3 prezintă motivația privind abordarea temei de cercetare – Interfața Creier-Computer din cadrul tezei de doctorat, fiind enumerate obiectivele principale și secundare.

Capitolul 4 cuprinde elementele teoretice necesare la înțelegerea, dezvoltarea, experimentarea, testarea și optimizarea sistemelor de tip interfață creier-computer. Prin urmare, sunt descrise anumite noțiuni generale referitoare la evoluția interfețelor creier-computer. De asemenea, este introdusă clasificarea sistemelor BCI. După aceea, sunt prezentate metodele de achiziție și înregistrare a biopotențialelor cerebrale utilizate într-un sistem BCI. Totodată, sunt expuse tipurile de semnale electroencefalografice necesare în sistemele BCI.

Capitolul 5 cuprinde metodologia cercetărilor experimentale desfășurate de doctorandă și reliefate în cadrul acestei teze, prin dezvoltarea, testarea și optimizarea unor aplicații software și hardware în scopul extinderii funcționalității sistemelor bio-mecatronice prin utilizarea interfețelor creier-computer. Prin urmare, capitolul 5 prezintă o perspectivă de ansamblu privind principiile de funcționare și modalitățile de lucru, proiectate și aplicate de doctorandă în activitățile experimentale, la care au fost implicații subiecții reprezentați de studenți în anii III-IV. Totodată, sunt enumerate și prezentate căștile portabile (NeuroSky, Emotiv, GTEC) utilizate de doctorandă la achiziția semnalelor neuronale, platformele hardware (Raspberry Pi, Arduino, NI myRIO) necesare la controlul sistemelor mecatronice și dispozitivele comandate (roboți mobili) prin utilizarea unei interfețe creier-computer.

Capitolul 6 prezintă contribuțiile originale aduse de autoarea acestei teze de doctorat, fiind evidențiate implementările software originale, respectiv secvențele de programare în mai multe limbaje (Python, Arduino) sau medii (LabVIEW, Matlab, NodeRED, MIT App Inventor), bazate pe diferiți algoritmi de analiză a datelor electroencefalografice detectate la nivelul senzorilor integrați de căștile portabile. Algoritmii se referă la principiile de funcționare pe care se bazează aplicațiile software propuse de doctorandă, pe care ea le-a dezvoltat și le-a experimentat cu studenții pe parcursul studiilor doctorale. Prin urmare, au rezultat comenzi determinate de numărarea clipirilor oculare voluntare sau detectarea biopotențialelor evocate P300. Numărarea clipirilor oculare se poate realiza prin tehnici bazate pe clasificarea semnalului EEG brut utilizând modele de rețele neuronale artificiale sau determinarea amplitudinii unei clipiri, sau metoda Divide et Impera (Dezbină și Cucerește) ori modalități reprezentate de tranziții și selecții ori metode de tip Logica Fuzzy.

De asemenea, sunt evidențiate și explicate succint modalitățile identificate privind integrarea eficientă dintre tehnologiile software aferente căștilor portabile de electroencefalografie și aplicațiile dezvoltate, respectiv platformele hardware.

Capitolul 7 descrie rezultatele obținute de subiecții voluntari implicați la experimentarea aplicațiilor de tip interfață creier-computer în vederea îndeplinirii obiectivelor tezei privind dezvoltarea, testarea și optimizarea sistemelor BCI simple, portabile, eficiente, atractive și utile, care au permis: integrarea optimă dintre căștile EEG – platformele hardware – mediile software; comunicarea și transmiterea mesajelor Chat; cercetarea BCI bazată pe inteligența artificială; controlul sistemelor robotizate și antrenamentul cognitiv prin generarea comenzilor de control a modelelor 3D. Astfel, utilizatorii au folosit căștile EEG portabile, au efectuat sarcini mentale determinate de concentrarea atenției și orientarea privirii asupra unor flash-uri luminoase, respectiv efectuarea clipirilor oculare voluntare, pentru a controla sisteme robotizate – prototipuri reale sau virtuale 3D (roboți mobili, mână robotică, braț robotic, motocicletă miniaturală, iluminarea RGB dintr-o mini casă inteligentă, scaun cu roțile, scooter ghidat de un robot umanoid, automat de sucuri), pentru a comunica prin utilizarea unei tastaturi virtuale, pentru a transmite mesaje chat către un telefon inteligent cu sistem de operare Android, pentru a formula și a-i adresa întrebări asistentului Chat GPT, pentru a accesa resursele Internet, pentru a afișa holograme cu Maestrul Yoda, și pentru a reda efecte grafice sau a deplasa mesaje text la nivelul unor sisteme cu LED-uri.

Capitolul 8 cuprinde concluziile finale ale tezei de doctorat și totodată, prezintă contribuțiile originale specifice, în funcție de obiectivele inițial stabilite. De asemenea, sunt enumerate rezultatele obținute prin cercetarea desfășurată în timpul studiilor de doctorat și sunt menționate lucrările științifice publicate în scopul valorificării activității experimentale.

La finalul tezei, se regăsește secțiunea exhaustivă pentru Referințele Bibliografice și secțiunea elaborată pentru Anexele bazate pe obținerea datelor experimentale și implementarea codului sursă pentru diferite limbaje de programare procedurală (Python, Arduino, Matlab) și a diagramelor bloc pentru mediile de programare grafică/vizuală (LabVIEW și MIT App Inventor).

ADRESAREA MULȚUMIRILOR

Sfinte Mulțumiri adresate lui Dumnezeu

Autoarea acestei Teze de doctorat îi mulțumește lui Dumnezeu pentru tot ajutorul primit, toate oportunitățile de care a beneficiat, purtarea de grijă de zi cu zi, realizările frumoase pe plan profesional, liniștea sufletească, sănătatea primită, puterea interioară dobândită, bucuria lăuntrică avută, iubirea nemărginită și îndrumarea la fiecare pas prin gânduri bune, armonie, încredere deplină în reușită, binecuvântări nenumărate, miracole și oamenii binevoitori trimiși în cele mai importante momente.

Mulțumiri importante adresate Părinților și Familiei

Doctoranda Oana Andreea mulțumește în mod special familiei, părinților pentru susținerea morală, tot sprijinul acordat, răbdarea avută, iubirea necondiționată, implicarea cu extrem de mult devotament prin sfaturi utile, conversații generoase, energie pură, entuziasm, încurajări și multă înțelegere.

Mulțumiri semnificative adresate Propriului Sine

Doctoranda Oana Rușanu este mulțumită de propria sa evoluție prin întărirea Credinței în Dumnezeu, determinarea avută, tenacitatea, ambiția, pasiunea reală, motivația intrinsecă, tăria de caracter, sensibilitatea lăuntrică, detașarea emoțională, dedicarea completă, reziliența dobândită, și în special, pentru faptul că a continuat să încerce, să exploreze, să izbândească, nerenunțând în fața obstacolelor întâmpinate, fără a se lăsa deznădăjduită în fața eșecurilor de orice natură, dificultăților pe planul cercetărilor științifice, situațiilor solicitante, depunând un efort consecvent și reușind să arate implicare activă inclusiv la activitățile didactice sau la Consiliul Școlii Doctorale.

Mulțumiri profunde, sincere și calde adresate Doamnei Prof. Dr. Ing. Ileana Constanța Roșca – Conducător de Doctorat în perioada Octombrie 2021 – Septembrie 2024

Drd. Ing. Oana-Andreea Rușanu îi rămâne profund recunoscătoare Doamnei Prof. Dr. Ing. Ileana Constanța Roșca, dumneai acceptând cu încântare rolul de Conducător de Doctorat la această teză în perioada Octombrie 2021 – Septembrie 2024. În mod autentic și permanent, doctoranda apreciază la doamna prof. Ileana Roșca atât trăsăturile de caracter și calitățile morale deosebite, precum generozitatea, implicarea activă, noblețea sufletească, entuziasmul, căldura lăuntrică, disponibilitatea, toleranța constructivă, răbdarea, încrederea arătată, încurajările transmise, cât și cunoștințele de specialitate în domeniul biomecanicii, expertiza privind tematicile inovatoare de cercetare în ingineria medicală, tactul pedagogic și experiența în învățământul universitar, obținută în cei aproximativ 50 de ani de activități didactice. Drd. Oana Rușanu îi mulțumește din tot sufletul doamnei prof. Ileana Roșca pentru devotamentul și sprijinul acordat în coordonarea acestei teze de doctorat. Doctoranda este convinsă că rolul de Conducător de Doctorat al doamnei prof. Constanța Roșca reprezintă o binecuvântare înălțătoare primită de la Dumnezeu, fără de care finalizarea și susținerea cu succes a acestei Teze de Doctorat nu ar fi fost posibilă. Doamna Prof. Ileana Roșca a fost prima persoană din mediul academic, care a remarcat și a valorificat implicarea și contribuțiile doctorandei privind Interfața Creier-Computer încă de la începutul cercetării teoretice prin realizarea unei simulări virtuale în anul III de Licență, motiv pentru care Oana Rușanu îi poartă o stimă profundă și îi acordă o aleasă considerație.

Mulțumiri speciale adresate Doamnei Prof. Dr. Ing. Luciana Cristea – Conducător de Doctorat în perioada Octombrie 2017 – Septembrie 2021

Drd. Ing. Oana-Andreea Rușanu îi poartă un respect aparte și îi mulțumește în mod deosebit Doamnei Prof. Dr. Ing. Luciana Cristea, dumneai primind rolul de Conducător de Doctorat la această teză în perioada Octombrie 2017 – Septembrie 2021. Drd. Oana Rușanu apreciază în mod special la doamna prof. Luciana Cristea, abilitățile manageriale și organizatorice dovedite, rigurozitatea demonstrată privind respectarea termenelor de susținere și evaluare a rapoartelor de cercetare, observațiile critice, deschiderea privind aprofundarea tematicii Interfața Creier-Computer din mai perspective, implicarea privind îndeplinirea cu succes a tuturor etapelor obligatorii aferente studiilor doctorale, optimismul și colaborarea armonioasă inclusiv din perspectiva schimbării conducătorului de doctorat, considerând argumentele temeinice privind progresul și definitivarea cu succes a acestei teze.

Mulțumiri deosebite adresate Domnului Prof. Dr. Ing. Marius Cristian Luculescu – Membru în Comisia de Îndrumare în perioada Octombrie 2017 – Septembrie 2021

Drd. Ing. Oana-Andreea Rușanu își amintește în permanență cu mulțumire sufletească de Domnul Prof. Dr. Ing. Marius Cristian Luculescu, dumnealui fiind preferat și ales de doctorandă atât la Licență, cât și la Masterat, în calitate de coordonator principal. Dumnealui a inspirat-o pe doctorandă privind acumularea abilităților informatice, implicarea prin contribuții practice în domeniul mecatronicii și i-a transmis pasiunea pentru desfășurarea activităților didactice cu deosebit devotament, tact pedagogic, energie pozitivă, jovialitate și interactivitate, demonstrate în calitate de profesor. Drd. Ing. Oana Rușanu îi mulțumește în mod special domnului prof. Marius Luculescu pentru tot sprijinul acordat pe parcursul studiilor doctorale prin conversațiile avute pe subiecte de specialitate sau diverse tematici referitoare la procesul de învățământ și îi rămâne recunoscătoare pentru încrederea acordată, încurajările primite, răbdarea oferită, atitudinea amiabilă, implicarea activă, momentele pline de efervescență lăuntrică, efectul constând în creșterea exponențială a curiozității, tenacității, entuziasmului și inducerea motivației intrinseci. Doctoranda îl va aprecia mereu pe domnul prof. Marius Luculescu pentru profesionalismul dumnealui în raport cu studenții, rămânând pentru totdeauna un punct de referință privind calitățile pedagogice și pregătirea didactică pe care ar trebui să le demonstreze un mentor în formarea tinerei generații.

Sincere mulțumiri și aleasă considerație adresate Domnului Prof.dr. Petru Adrian Cotfas – Membru în Comisia de Îndrumare în perioada Octombrie 2017 – Septembrie 2024

Drd. Ing. Oana-Andreea Rușanu îi rămâne profund recunoscătoare domnului prof. Petru Adrian Cotfas și îi mulțumește foarte mult pentru susținerea morală, amabilitatea arătată de fiecare dată, disponibilitatea permanentă, optimismul transmis, energia înălțătoare, încurajările transmise, promptitudinea demonstrată, starea de entuziasm continuu și implicarea activă pe parcursul tuturor etapelor aferente acestei teze de doctorat. Drd. Oana Rușanu îl apreciază în mod special pe domnul prof. Petru Cotfas datorită calităților sale morale, abilităților de specialitate în domeniul fizicii, electronicii, sistemelor de energii regenerabile, instrumentației virtuale și rezultatelor impresionante în cercetarea științifică prin publicarea contribuțiilor semnificative la jurnale cu înaltă recunoaștere pe plan internațional, obținute prin pasiune, motivație și profesionalism. Drd. Oana Rușanu consideră că a primit o profundă binecuvântare de la Dumnezeu prin colaborarea frumoasă, autentică, sinceră, lină și plăcută pe plan didactic cu domnul prof. Petru Cotfas. Prin aprecierea constantă, la nivel profund, a doctorandei Oana Andreea, domnul prof. Petru Cotfas a demonstrat mereu că deține un cumul complet alcătuit din abilitățile solide la nivel științific prin cercetări riguroase, cunoștințele temeinice de specialitate, integritatea academică, implicarea continuă, comportamentul empatic, dovedind mereu calm, blândețe, înțelegere, răbdare, căldură sufletească, armonie, încredere și pace interioară. Domnul Prof. Petru Adrian Cotfas reprezintă un model privind implicarea academică plină de energie, tenacitate, entuziasm și motivație intrinsecă în desfășurarea activităților de cercetare științifică.

Mulțumiri sincere adresate tuturor Membrilor (Prof. Dr. Ing. Mihaela Ioana Baritz, Prof. Dr. Constantin Sorin Zamfira, Șef Lucr. Dr. Ing. Corneliu Nicolae Drugă) în Comisia de Îndrumare în perioada Octombrie 2017 – Septembrie 2024

Drd. Ing. Oana-Andreea Rușanu mulțumește în mod deosebit și apreciază foarte mult contribuția fiecărui membru din Comisia de Îndrumare. Domnului Prof. Sorin Constantin Zamfira, doctoranda îi acordă un respect sincer pentru experiența academică, implicarea constructivă și cunoștințele de specialitate în domeniul fizicii. De asemenea, doctoranda Oana Rusanu îi rămâne recunoscătoare Doamnei Prof. Ing. Mihaela Ioana Baritz pentru încrederea acordată, încurajările transmise, noblețea sufletească și o apreciază în mod deosebit pentru calitățile morale și profesionalismul demonstrat în învățământul universitar. Totodată, drd. Ing. Oana-Andreea Rușanu îi mulțumește foarte mult Domnului Prof. Dr. Ing. Corneliu Drugă pentru sprijinul acordat, atitudinea amiabilă, promptitudine și îl apreciază pentru implicarea activă privind coordonarea studenților cu devotament și profesionalism.

Mulțumiri adresate tuturor Cadrelor Didactice din Departamentul Design de Produs, Mecatronică și Mediu

Drd. Ing. Oana-Andreea Rușanu apreciază și mulțumește tuturor profesorilor care au influențat-o într-un mod pozitiv print-un gând bun, o cugetare plăcută, o vorbă frumoasă, un zâmbet sau orice altă încurajare ori o conversație armonioasă sau chiar o idee interesantă, enumerând următoarele cadre didactice: domnul prof. Barbu Braun, domnul prof. Ionel Șerban, doamna prof. Daniela Mariana Barbu, domnul prof. Ionel Starețu, doamna prof. Anca Elena Stanciu, doamna prof. Angela Repanovici, doamna prof. Nadia Crețescu, domnul prof. Daniel Cotfas și doamna prof. Diana Cotoros.

Mulțumiri adresate tuturor studenților, colegilor, prietenilor

Drd. Ing. Oana-Andreea Rușanu este recunoscătoare tuturor studenților pentru energia transmisă, bucuria inerentă, implicarea activă la activitățile didactice – experimentale și în special pentru recunoștința și aprecierea lor reciprocă. Oana mulțumește tuturor studenților (români și internaționali) care au contact-o pentru a solicita îndrumare ori pentru a transmite gânduri bune, demonstrând astfel importanța contribuțiilor aduse de doctorandă privind implementările software în domeniul de cercetare Interfața Creier-Computer.

Drd. Ing. Oana-Andreea Rușanu mulțumește tuturor colegilor și prietenilor pentru conversațiile purtate, împărtășirea experiențelor, energia pozitivă, entuziasmul și bucuria transmise.

Mulțumiri adresate Școlii Doctorale Interdisciplinare, Universității Transilvania din Brașov – Departamentele Financiar, Achiziții, Resurse Umane; Facultății Design de Produs și Mediu; Facultății de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor

Drd. Ing. Oana-Andreea Rușanu mulțumește tuturor persoanelor implicate activ (secretare, tehnicieni, referenți, cadre didactice) de la diverse departamente UnitBV, Facultatea Design de Produs și Mediu, respectiv Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, unde a desfășurat activități didactice de laborator și cu care a colaborat, într-o anumită măsură, în vederea soluționării diferitelor solicitări sau problemelor întâmpinate ori pentru facilitarea unor beneficii materiale, precum achiziția unor echipamente hardware și software, sau achitarea taxelor de publicare a lucrărilor științifice, utilizând fondurile financiare disponibile la Universitatea Transilvania din Brașov.

CAPITOLUL 2

STADIUL ACTUAL PRIVIND CERCETAREA SISTEMELOR DE TIP INTERFAȚĂ CREIER COMPUTER

2.1. ASPECTE PRIVIND ANALOGIA SISTEM NERVOS – COMPUTER

2.1.1. Corelația dintre creier și procesorul unui calculator

Creierul, componentă a sistemului nervos, constituie centrul de comandă și control al organismului uman, determinând funcționarea tuturor proceselor vitale, voluntare sau involuntare. Calculatorul reprezintă un instrument indispensabil pentru gestionarea, organizarea și coordonarea activităților în majoritatea domeniilor profesionale.

Atât creierul omului, cât și procesorul unui calculator, atunci când funcționează la parametri normali, îndeplinesc roluri fundamentale privind integrarea, coeziunea și adaptarea celorlalte subsisteme la mediul exterior.

Prin urmare, creierul primește informații de la organele de simț (spre exemplu: senzația produsă de o arsură la nivelul pielii), procesează datele recepționate și transmite prompt răspunsul așteptat, manifestat cu ajutorul glandelor, mușchilor (retragerea instantanee a membrului afectat) sau a nervilor periferici.

De asemenea, structura hardware și software a unui calculator cuprinde dispozitive dedicate introducerii datelor de intrare (exemple: mouse, tastatură, microfon, ecran tactil, trackpad și scanner), programe informatice pentru descifrarea codurilor generate și sisteme necesare afișării datelor de ieșire (exemple: monitor, imprimantă, videoproiector, led-ul care semnalează nivelul redus al acumulatorului).

Creierul, fiind componenta cea mai reprezentativă a sistemului nervos, monitorizează, integrează, reglează și determină acțiunile efectuate de organele interne în scopul îndeplinirii, în mod automat, fără intervenția conștientă din partea omului, a funcțiilor aferente sistemelor: respirator, cardiac, limfatic, digestiv și excretor. Superioritatea creierului este relevată de capacitatea lui de coordonare și sincronizare a activității tuturor celulelor, organelor și sistemelor anatomice care contribuie la fiziologia organismului uman, astfel încât să se asigure adaptabilitatea la condițiile exterioare (căldură, frig, primejdii) pe care le conferă mediul de viață.

Procesorul, fiind componenta principală a unui computer, gestionează și alocă resursele de memorie în funcție de prioritatea sau complexitatea proceselor care se execută în mod independent de voința utilizatorului, adică în absența unor intenții concrete. Se pot exemplifica următoarele situații: execuția recurentă a unui proces de salvare automată a datelor, ulterior așteptării unui anumit interval de timp sau efectuarea calculelor ori operațiilor matematice destinate redimensionării, scalării sau deplasării unor obiecte virtuale tridimensionale. Procesorul unui calculator integrează informațiile primite de la componentele periferice, permite procesarea paralelă a datelor și elaborează comenzi adaptate la dorințele utilizatorului. Spre exemplu, la apăsarea tastei de reglare a volumului sau selecția pictogramei virtuale aferente, va rezulta micșorarea sau amplificarea sunetului perceput de utilizator.

2.1.2. Comuniunea creier – calculator

În ceea ce privește similitudinea dintre sistemul nervos și computer, știința a consemnat faptul că semnalul electric reprezintă mediul care facilitează recepția stimulilor sau achiziția datelor de intrare, respectiv prelucrarea și transferul informațiilor în cazul ambelor componente implicate.

La nivelul creierului, se generează biopotențialele neuronale, care pot fi detectate cu ajutorul unor căști echipate cu senzori și electrozi, tehnologie avansată de amplificare și filtrare a nivelului redus de tensiune și procesoare compacte având performanțe ridicate. Prin urmare, semnalul brut obținut este amplificat, filtrat, măsurat, prelucrat, afișat sub formă grafică, supus proceselor de extragere a trăsăturilor caracteristice, de clasificare a unor tipare specifice în vederea asocierii lor cu anumite gânduri, dorințe, respectiv intenții mentale manifestate de persoana investigată.

De aceea, se constată simbioza existentă între fiziologia creierului uman și funcționarea unui calculator personal. Fiecare persoană, sănătoasă din punct de vedere clinic, dispune de anumite abilități cognitive, reușind să își mențină atenția concentrată, să învețe continuu, să evolueze și să se adapteze la situații noi prin generarea unor idei creative. Capacitatea creierului uman de a dezvolta procese inteligente este în strânsă corelație cu specificațiile hardware și software, care caracterizează performanțele unui computer.

Prin urmare, într-o interfață creier-computer, este important ca subiectul uman să deprindă aptitudinile mentale necesare la generarea unor tipare de unde cerebrale individualizatoare, consistente ori consecvente (repetabile, recurente), inteligibile, astfel încât componenta software (programele informatice necesare la aplicarea modalităților de procesare a semnalelor și tehnicilor de inteligență artificială [465], [499]) a calculatorului să determine decodificarea sau clasificarea eficientă, în timp real (ceea ce implică performanțe hardware ridicate) a informațiilor recepționate. Sarcinile mentale executate de o persoană presupun: efectuarea unor calcule matematice sau numărarea mentală [256], imaginarea unor operații [502] (rotație, translație, redimensionare, deplasare) atribuite figurilor geometrice 3D, enunțarea în gând a unor cuvinte, fredonarea unui cântec în gând, concentrarea atenției asupra unei singure idei, intenția de a executa o mișcare (imaginarea motorie [171], [3], [192], [246], [283], [310] a unui membru – mână sau picior). Sarcinile de decodificare sau clasificare realizate de procesorul calculatorului presupun extragerea trăsăturilor caracteristice unor tipare cerebrale (pot fi de ordin statistic sau vor fi determinate de algoritmi matematici, precum transformata Wavelet [473]) și aplicarea tehnicilor de inteligență artificială [278], [499] (utilizarea rețelelor neuronale artificiale [183], [257], [298], [10], [453] algoritmi de tip SVM = supported vector machines [104], LR = logistic regression [279], [512]) pentru delimitarea unor categorii de semnale necesare la individualizarea comenzilor îndeplinite de interfața creier-computer.

2.2. DESCRIEREA CONCEPTULUI DE INTERFAȚĂ CREIER-COMPUTER

2.2.1. Interfața creier-computer – definiții și funcții

Interfața creier-computer (BCI) este un sistem care înregistrează activitatea sistemului nervos central (SNC) și o translatează în semnale artificiale de ieșire pentru a înlocui, a restabili sau a îmbunătăți modalitățile naturale de ieșire SNC (Figura 2.2.1.1). Un sistem BCI necesită înregistrarea

semnalelor cerebrale, care provin din fenomenele electrofiziologice, neurochimice și metabolice manifestate permanent la nivelul sistemului nervos central. Cea mai frecvent utilizată modalitate pentru monitorizarea activității neuronale este electroencefalografia (EEG). Semnalele EEG pot fi înregistrate prin tehnici non-invasive cu senzori [157] localizați pe scalp, sau invazive cu electrozi plasați pe suprafața corticală ori în interiorul creierului.

Sistemele BCI prezintă domenii vaste de aplicabilitate, fiind utile pentru controlul dispozitivelor motorizate necesare persoanelor paralizate [251], exprimarea gândurilor prin sintetizatoare de discurs, intensificarea recuperării în cazul persoanelor care au suferit un accident vascular cerebral (AVC), îmbunătățirea capacității de concentrare a atenției.

În funcție de dependența lor față de căile/semnalele normale de ieșire (neuromusculare) ale sistemului nervos central, interfețele creier-computer pot fi dependente sau independente. Sistemele BCI dependente utilizează biopotențialele evocate vizuale [136], implicând mușchii care determină mișcarea globilor oculari. Sistemele BCI independente utilizează ritmurile senzomotorii, unde activitatea musculară nu este implicată.

Sistemele hibride de tip interfață creier-computer [168], [536] utilizează două tipuri distincte de semnale cerebrale (potențiale vizuale evocate și ritmuri senzomotorii), existând posibilitatea să genereze comenzi bazate inclusiv pe activitatea mușchilor.

Sistemele BCI pot fi considerate neurotehnologii adaptive [41], care acționează direct asupra SNC, stimulând zonele senzoriale corticale ori subcorticale [251], sprijinind persoanele diagnosticate cu Parkinson.

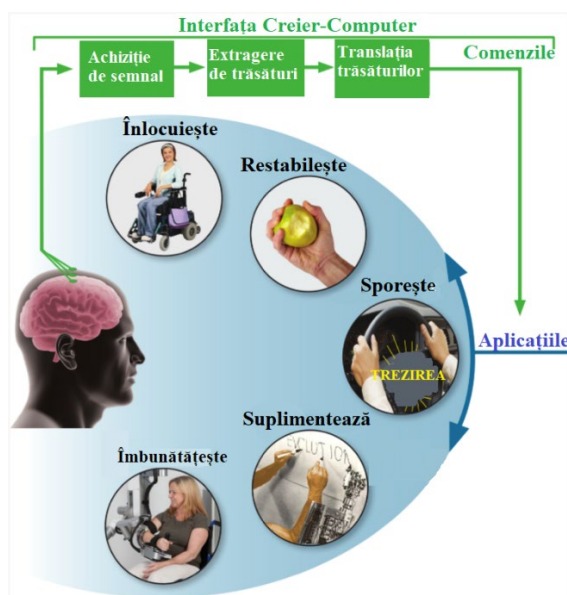


Figura 2.2.1.1. Cele 5 funcții ale unei interfețe creier-computer – Traducere - [251].

CONCLUZII

2.3.1. Utilitatea unui sistem generalizat de tip interfață creier-computer

Un sistem generalizat de tip interfață creier-computer (BCI) este util pentru desfășurarea activităților de cercetare științifică privind reabilitarea medicală și dezvoltarea aplicațiilor accesibile din

punct de vedere al costurilor. Un sistem generalizat BCI va facilita cercetarea și experimentarea diverselor aplicații din stadiile incipiente de proiectare și dezvoltare. Din nefericire, numărul redus al centrelor de cercetare specializate în domeniul BCI [179] alături de dificultățile tehnice și financiare întâmpinate de oamenii de știință aflați în țările care nu dispun de resurse optime pe plan intelectual și financiar, pot influența negativ, întârzia sau opri dezvoltarea sistemelor BCI. Dificultățile se referă la costurile ridicate ale echipamentelor de achiziție a semnalelor cerebrale, absența dotărilor adecvate din laboratoarele de cercetare experimentală, colaborarea redusă între grupurile multidisciplinare, lipsa resurselor pentru pregătirea intelectuală și organizarea sesiunilor practice și teoretice de împărtășire a cunoștințelor. Aceste probleme pot avea ca rezultat descurajarea cercetătorilor novici și pot împiedica dezvoltarea interfețelor creier-computer inovatoare pentru asistarea persoanelor cu dizabilități neuromotorii.

Conform literaturii de specialitate [441], [342], [98], s-au identificat următoarele sisteme de tip interfață creier-computer, care se bazează pe funcționalitate și structură generalizată: BCI2000, OpenViBE și EEGLAB. Aceste sisteme BCI implică limitări specifice: BCI2000 nu mai este actualizat pentru integrarea căștilor EEG portabile, recente (exemplu: NeuroSky Mindwave Mobile), OpenViBE este mai complex și mai puțin accesibil cercetătorilor novici, fără experiență, iar EEGLAB nu include metode de machine learning pentru clasificarea datelor EEG brute.

Elementele fundamentale necesare la dezvoltarea unui instrument destinat cercetării BCI sunt:

- Achiziția semnalelor EEG;
- Procesarea semnalelor EEG;
- Pregătirea secvențelor temporale necesare setului de date EEG;
- Generarea setului de date EEG destinat proceselor de antrenament și testare;
- Antrenarea modelelor de tip machine learning, rezultate prin clasificarea datelor EEG;
- Testarea modelelor de tip machine learning, obținute prin procesul de antrenament, astfel încât să fie posibilă măsurarea valorilor de acuratețe și precizie a clasificării;
- Lansarea modelelor de tip machine learning într-o aplicație BCI rulând în timp real.

2.3.2. Necesitatea seturilor de date EEG pentru recunoașterea clipirilor

Înregistrarea seturilor de date EEG este necesară la recunoașterea tiparelor cerebrale care indică clipirile oculare multiple utilizate ca semnale de control într-un sistem de tip interfață creier-computer. O aplicație simplă și accesibilă, testată cu ajutorul unui instrument virtual propus în această teză de doctorat, constă în clasificarea clipirilor oculare multiple pentru determinarea semnalelor precise de control. Clipirea oculară voluntară generează un tipar distinct în semnalul EEG, fiind simplu de detectat. Prin identificarea acestui tipar și numărarea aparițiilor sale, se pot genera comenzi de control a unor dispozitive și sisteme de asistare a persoanelor cu dizabilități: **un fotoliu rulant electric, un robot mobil** [413], [411], **o mână robotică** [412], **un braț robotic** [531], **obiecte electrocasnice** [32], **diverse prototipuri experimentale** [422], precum și **sisteme de comunicare** [414], [397].

Literatura științifică de specialitate BCI conține numeroase studii care investighează **utilizarea clipirilor oculare voluntare în dezvoltarea interfețelor creier-computer**. Cercetătorii au vizat tehnici variate, precum: **măsurarea amplitudinii clipirii oculare**, necesare la **setarea unei valori de prag** [341], [446], **aplicarea calculului statistic** în vederea implementării unui **algoritm de numărare a clipirilor oculare voluntare** [526], [513], [321] respectiv dezvoltării unor **prototipuri experimentale BCI** [144],

[474], clasificarea clipirilor bazată pe rețele neuronale artificiale [347], [69], [159], [437], metodele de tip wavelet [273], [473] sau support vector machines [8].

2.3.3. Domeniul BCI – Aplicabilitate, Performanță, Noutate, Provocări, Oportunități

2.3.3.1. Concluzii privind conceptul de interfață creier-computer

Prima impresie fiind concentrată asupra transcenderii abilităților noastre cognitive, obținându-se rezultate impresionante în cadrul acestui domeniu de cercetare, pe de-o parte anticipat prin producțiile cinematografice de tipologie științifico-fantastică, iar pe de altă parte precursor al revoluției digitale, al tehnologiei de ultimă generație, interfața creier-computer se remarcă prin antiteza dintre simplitatea principiului ei de funcționare, respectiv a modului utilizare și complexitatea proceselor care implică achiziția biopotențialelor neuronale, procesarea acestora în vederea extragerii de trăsături relevante, clasificarea și translatarea lor în comenzi de control a unor dispozitive biomedicatronice: fotoliu rulant motorizat, mână robotică, braț robotizat [531], sau robot mobil multifuncțional [187]. Principalul scop al interfeței creier-computer (BCI) constă în asistarea persoanelor cu dizabilități neuromotorii în desfășurarea activităților cotidiene, astfel încât ele să își redobândească independența. Acest deziderat presupune augmentarea și extinderea funcționalității sistemelor biomedicatronice astfel încât acestea să furnizeze persoanelor diagnosticate cu afecțiuni neurologice (precum ataxie, scleroză laterală amiotrofică, sindrom locked-in, accident vascular cerebral, leziuni ale măduvei spinării), condițiile necesare îndeplinirii la nivel optim și în siguranță a sarcinilor de interacțiune cu mediul înconjurător, totodată asigurându-le un instrument de comunicare și control locomotor.

2.3.3.2. Concluzii privind domeniile de aplicabilitate ale sistemelor BCI

Desfășurarea și aprofundarea cercetărilor asupra interfețelor creier-computer se justifică prin diversitatea domeniilor de utilizare, acestea cuprinzând totodată aplicații destinate persoanelor clinic sănătoase, în scopul obținerii unui canal alternativ sau suplimentar de comunicare și control și prin aspirația explorării unei arii fascinante, puterea gândului, care ne stârnește curiozitatea, având în vedere că misterele creierului uman nu au fost încă elucidate în totalitate. De asemenea, există așa numitele sisteme de tip interfață creier-mașină (brain-machine interface) care sunt destinate transporturilor auto, sistemelor mecatronice și roboților industriali. Alte ramuri de aplicabilitate a sistemelor de tip interfață creier-computer sunt reprezentate de: dezvoltarea jocurilor video pentru computer, a aplicațiilor interactive pentru îmbunătățirea nivelului de concentrare a atenției, respectiv a gradului de profunzime a meditației sau monitorizarea parametrilor corelați cu diferite stări psihologice: stres, relaxare, interes, încântare și implicare.

2.3.3.3. Concluzii privind factorii performanței de funcționare BCI

Performanțele acestor sisteme sunt influențate de o varietate de factori, precum:

- Metodele de achiziție a biopotențialelor neuronale, invazive (implantarea unei matrice de senzori la nivel intra-cortical și electrocorticografia), care oferă o rezoluție spațială ridicată sau non-invazive

(electroencefalografia, magnetoencefalografia, imagistica medicală prin rezonanță magnetică funcțională și spectroscopia în infraroșu apropiat), care furnizează o rezoluție temporală sporită;

- Tehnicile (hardware și software) de filtrare a semnalelor în vederea reducerii zgomotului (provenit spre exemplu, de la rețeaua electrică sau de la vibrații), eliminării artefactelor (cauzate spre exemplu de gesturi neintenționate precum mișcările capului sau clipirea oculară) și delimitării componentelor utile (tipare particularizate prin amplificarea sau diminuarea reprezentării grafice);
- Algoritmii matematici (implicând anumite mărimi statistice: media, mediana, deviația standard, coeficientul Kurtosis și altele) necesari la extragerea trăsăturilor relevante unei sarcini cognitive;
- Tehnicile bazate pe inteligența artificială și algoritmii de tip machine learning pentru clasificarea semnalelor achiziționate, respectiv a trăsăturilor extrase;
- Structura mecanică, fiabilă, compactă, mobilitatea, gradele de libertate, versatilitatea și funcționarea optimă a dispozitivelor controlate prin intermediul comenzilor cognitive;
- Paradigmele prezentate utilizatorilor, respectiv sarcinile pe care trebuie să le execute: stimuli luminoși de tipul potențialelor evocate P300, SSVEP, N200; imaginarea motorie; ritmurile senzomotorii pentru măsurarea nivelului de atenție.

2.3.3.4. Concluzii privind gradul de noutate al interfeței creier-computer

Factorii anterior enumerați conferă gradul de noutate al sistemelor de tip interfață creier-computer, astfel evidențiindu-se multidisciplinaritatea acestui domeniu de cercetare, fiind necesare cunoștințe și abilități din diverse arii, precum: inginerie mecanică, electronică, informatică, neurologie sau psihologie. De asemenea, prin posibilitatea de implementare a aplicațiilor non-clinice, se redefinesc interacțiunea dintre om și computer, acesta din urmă reprezentând centrul de procesare a datelor la nivelul unui sistem mecatronic utilizat în programele de asistare și reabilitare. Prin urmare, are loc tranziția de la instrumentele standard/obișnuite (tastatură, mouse, ecran tactil, gesturi [225], [226], [227] voce) la dispozitivele bazate pe puterea gândurilor sau transmiterea comenzilor mentale, care reprezintă, cu siguranță, la momentul actual, atât o noutate pentru majoritatea persoanelor, indiferent de vârstă, gen, religie, condiție socială sau pregătire intelectuală, cât și o curiozitate acerbă/greu de stăpânit pentru specialiștii și pasionații de tehnologiile viitorului, jocurile video și alte aplicații interactive, bazate pe inteligența artificială [438].

Gradul de noutate, caracteristic interfețelor creier-computer, se reflectă, totodată, prin faptul că progresul realizat în acest domeniu a luat amploare odată cu dezvoltarea tehnicilor de tip machine learning și evoluția tranzistoarelor și a procesoarelor, conform legii lui Moore. Această constatare se explică prin faptul că astfel de interfețe ating funcționalitatea optimă și își îndeplinesc rolul pe deplin în momentul în care permit achiziția continuă a semnalelor provenite de la creier și monitorizarea permanentă a stărilor cognitive a utilizatorilor în vederea identificării în timp real a variațiilor de potențial neuronal, care determină executarea instantanee a unei comenzi de către un dispozitiv mecatronic de asistare. Prin urmare, în cadrul proceselor menționate, se vehiculează o cantitate enormă de informație, se prelucrează un volum extins de date, fiind astfel necesară o putere exorbitantă de calcul, furnizată de un computer cu performanțe foarte ridicate.

2.3.3.5. Concluzii privind provocările actuale ale interfeței creier-computer

La momentul actual, domeniul interfețelor creier-computer se confruntă cu numeroase provocări: sunt necesare sisteme de calcul costisitoare, robuste și puternice, care să ofere o rată ridicată de transfer a informațiilor și să permită procesarea rapidă a datelor. Laboratoarele de Cercetare sunt principalele locații unde sunt disponibile sisteme performante pentru achiziția semnalelor EEG de înaltă acuratețe într-un mediu favorabil realizării configurațiilor tehnice și experimentării în scopul evitării producerii incidentelor în timpul familiarizării și antrenamentului utilizatorilor cu tehnologia BCI.

De asemenea, în cadrul laboratoarelor de specialitate, se dispune de programe software performante, bazate pe tehnici avansate de inteligență artificială, astfel că sunt alcătuite diferite scenarii pentru testarea sistemului și antrenamentul utilizatorilor, însă toate acestea se fac în detrimentul unor costuri care depășesc puterea financiară a unei persoane individuale. Din cauza echipamentelor voluminoase, efortului ridicat și intervalului de timp îndelungat pentru antrenament, utilizatorii percep un disconfort psihologic, nerăbdare și frustrare. Rezultă variabilitatea conexiunilor de la nivel cerebral, aflate în continuă evoluție în funcție de experiențele trăite de fiecare persoană, și abilitățile cognitive care determină gradul de reușită privind realizarea sarcinilor mentale: imaginarea motorie a deplasării membrelor, efectuarea calculelor matematice sau recitarea poemelor în gând, concentrarea atenției pe un singur aspect sau capacitatea de a ne elibera mintea de orice fel de gând.

O alternativă la aceste inconveniente o reprezintă utilizarea sarcinilor corelate cu potențialele evocate, care se individualizează printr-un tipar specific la nivelul semnalului EEG. Totuși, sunt necesare programe software costisitoare, versatile, bazate pe tehnici avansate de inteligență artificială, care să asigure procesarea semnalului achiziționat, identificarea trăsăturilor caracteristice și clasificarea acestora în vederea delimitării momentului în care utilizatorul a transmis o comandă în mod intenționat.

2.3.3.6. Concluzii privind perspectivele interfețelor creier-computer

Având în vedere dezavantajele anterior menționate, este necesară proiectarea, realizarea și dezvoltarea unui prototip de tip interfață creier-computer, care să le ofere utilizatorilor posibilitatea de a-l testa și a efectua experimente la domiciliul personal sau în alt mediu familiar, unde nu sunt asigurate condițiile dintr-un laborator de cercetare. O astfel de perspectivă de viitor este explorată în cadrul acestei Teze de Doctorat, considerând următoarele criterii de implementare a unei soluții viabile:

- Achiziția simplă și rapidă a semnalelor EEG, cu ajutorul unor seturi de căști portabile;
- Eliminarea artefactelor inerente semnalului EEG cu filtrele încorporate de căștile portabile;
- Confortul în timpul utilizării și simplitatea montajului/instalării inițiale, design-ul ergonomic;
- Evitarea utilizării soluțiilor chimice suplimentare pentru îmbunătățirea valorilor de acuratețe;
- Controlul unor dispozitive mecatronice de asistare (braț robotic [531], mână robotică, robot mobil [187]) cu platforme de dezvoltare, precum: Arduino, Raspberry Pi, NI myRIO, Micro:Bit;
- Performanță ridicată la un preț convenabil, astfel fiind posibilă utilizarea la domiciliul personal;
- Posibilitatea de dezvoltare a unor aplicații diverse în domeniul mecatronicii/ingineriei medicale;
- Regăsirea pe Internet a unei multitudini de programe simple care asigură funcționalități de bază;
- Implementarea unor programe software în diferite limbaje de programare (C, Python sau Javascript) sau medii de dezvoltare (LabVIEW sau Node-RED), astfel încât să se asigure comunicația dintre componentele hardware anterior menționate;

- LabVIEW oferă diverse kituri de funcții predefinite, fiind un mediu intuitiv și atractiv de dezvoltare, având în vedere că se bazează pe metodele de programare grafică specifice limbajului G;
- LabVIEW [451] facilitează proiectarea simplă și rapidă a interfețelor grafice utilizator, ele având un aspect prietenos și atrăgător;
- LabVIEW facilitează achiziția, procesarea și clasificarea semnalelor electroencefalografice [472];
- Node-RED este un mediu de programare online care oferă numeroase pachete de funcții predefinite și permite scrierea de cod în limbaj Javascript pentru aplicații din domeniul Internet of Things, specific automatizării locuințelor personale;
- Python este un limbaj de programare foarte popular, necesar la implementarea aplicațiilor, acoperind diverse domenii de utilizare;
- C este un limbaj de programare fundamental, necesar la implementarea aplicațiilor dezvoltate cu ajutorul platformei Arduino.

CAPITOLUL 3

MOTIVAȚIA ABORDĂRII TEMEI ȘI OBIECTIVELE TEZEI

3.1. MOTIVAȚIA ABORDĂRII TEMEI ȘI OBIECTIVELE TEZEI

Interfața creier-computer (BCI = Brain-Computer Interface) reprezintă un domeniu de cercetare provocator și atrăgător, fiind considerat deopotrivă captivant prin diversitatea, respectiv utilitatea aplicațiilor, cât și complex prin inter/multi-disciplinaritatea sub-domeniilor implicate. Interfața creier-computer permite controlul dispozitivelor externe de asistare sau comunicare prin translatarea intențiilor mentale în comenzi îndeplinite de roboții mobili, neuroprotezele sau prin deplasarea unor fotolii rulante. Prin urmare, datorită tehnicilor avansate de procesare și clasificare a semnalelor neuronale, sunt generate comenzi pentru controlul sistemelor externe (braț bionic, exoschelet, platforme multimedia) necesare la dobândirea independenței persoanelor cu dizabilități neuromotorii.

În ceea ce privește motivația abordării unei astfel de teme științifice privind parcurgerea ciclului de studii doctorale, se constată pasiunea, interesul deosebit, implicarea activă, dedicarea profundă, compatibilitatea și entuziasmul, manifestate de autoarea acestei tezei, încă din timpul studiilor de Licență la specializarea *Inginerie Medicală* și mai târziu, pe parcursul studiilor de Masterat la specializarea *Sisteme Mecatronice pentru Industrie și Medicină*. Începând cu anul 2014, doctoranda a conceput, a dezvoltat, a implementat și a realizat o varietate de aplicații, mai simple sau mai complexe, de tip *Interfață Creier-Computer*, bazate pe simulări în mediul de programare grafică LabVIEW, controlul unor modele 3D virtuale (demonstrația video se regăsește pe YouTube [354]) și comanda unor roboți mobili cu ajutorul setului portabil de electroencefalografie NeuroSky Mindwave Mobile. Prin urmare, proiectele, lucrările și prezentările create în anii 2014 – 2017 au fost valorificate prin premiile obținute de doctorandă la diferite manifestări științifice: sesiuni de comunicări, concursuri de realizări studentești și conferințe naționale. Motivația intrinsecă, atracția lăuntrică spre inovațiile științifico-fantastice din domeniul tehnologiei avansate, pasiunea reală pentru interfețele creier-computer, precum și obținerea rezultatelor de succes privind aplicațiile BCI implementate, au reprezentat fundamentul solid și premisele pe baza cărora s-a decis asupra temei principale – Interfața Creier-Computer – în jurul căreia s-au concentrat activitățile de la Doctorat, în perioada anilor 2017 – 2024.

În ultimele două decenii, numeroase echipe de cercetători, renumite la nivel internațional pentru activitatea lor științifică elaborată, au investit resurse considerabile de timp și efort intelectual în vederea atingerii unor performanțe ridicate în domeniul interfețelor creier-computer, astfel încât să fie posibilă valorificarea rezultatelor promițătoare, obținute în cadrul laboratoarelor dotate cu echipamente de ultimă generație, masive și costisitoare, bazate pe diverse tehnici de investigație medicală (rezonanță magnetică nucleară, spectroscopie în infraroșu apropiat, electroencefalografie, electrooculografie, electrocorticografie și altele) pentru realizarea experimentelor în condiții optime.

Cu toate că din punct de vedere experimental s-a înregistrat un progres rapid, respectiv o evoluție covârșitoare, la momentul actual încă nu există o soluție optimă sau un sistem portabil/mobil de tip interfață creier-computer, care să permită utilizarea eficientă la domiciliul persoanei cu dizabilități neuromotorii, astfel încât aceasta să redevină independentă, să interacționeze cu mediul

exterior asemenea unui om având toate capacitățile fizice intacte, și să comunice în mod natural cu cei care îi pot acorda sprijin, care îi înțeleg propriile dorințe, îngrijorări ori alte necesități.

Prin urmare, treptat, numeroși cercetători din domenii științifice multi-disciplinare (știința calculatoarelor, mecatronică, inginerie medicală, inteligență artificială, achiziția și prelucrarea semnalelor, neuroștiințe, psihologie) și-au adus contribuția privind încercarea de a dezvolta un sistem portabil de tip interfață creier-computer, compatibil cu utilizarea la domiciliul personal al celor care au fost diagnosticați cu afecțiuni neuromotorii (sindrom Locked-In, scleroză laterală amiotrofică și tetraplegie) sau au suferit un accident vascular cerebral ori au avut leziuni severe la nivelul măduvei spinării, astfel că se confruntă cu tetraplegie sau diverse forme de paralizie.

Având în vedere aspectele anterior menționate, rezultă că domeniul sistemelor de tip interfață creier-computer este încă insuficient explorat, ascensiunea acestuia fiind totodată influențată de performanțele obținute în cadrul ariilor tehnico-științifice conexe, care au permis spre exemplu, dezvoltarea unor platforme portabile cu microcontroller (Arduino și Raspberry Pi) sau tehnologie FPGA (NI myRIO) sau a unor seturi portabile de achiziție a semnalelor electroencefalografice (NeuroSky, Muse, Emotiv, GTEC Unicorn și altele). Astfel se evidențiază faptul că electroencefalografia este singura tehnică de investigație medicală care permite ca monitorizarea simplă și rapidă a biopotențialelor neuronale să se realizeze la domiciliul persoanei cu dizabilități.

Prin urmare, nu numai că sunt necesare descoperiri solide atât la nivel teoretic/analitic, cât și din punct de vedere experimental, dar mai mult decât atât, sunt binevenite contribuțiile aduse inițial prin identificarea, respectiv implementarea soluțiilor de integrare a subsistemelor hardware anterior menționate cu diverse medii software de dezvoltare sau limbaje de programare (LabVIEW, Matlab, Python și altele) și ulterior, prin experimentarea, testarea și optimizarea acestor sisteme. Privind din perspectiva domeniului de aplicabilitate al sistemelor de tip interfață creier-computer, se constată posibilitatea aprofundării cercetărilor, atât din necesitatea de a concepe dispozitive versatile cu o structură mecanică robustă, fiabilă, compactă cât și din utilitatea realizării unor modele experimentale de tip braț robotizat, mână robotică sau robot mobil, care să răspundă corespunzător cerințelor persoanelor aflate în suferință.

Aspectele anterior enumerate reflectă totodată direcția cercetărilor teoretice și experimentale din cadrul acestei teze de doctorat, care își propune ca principal obiectiv: proiectarea, realizarea și implementarea unui sistem portabil de tip interfață creier-computer pentru extinderea funcționalității sistemelor bio-mecatronice.

În vederea îndeplinirii obiectivului principal, s-au stabilit următoarele obiective specifice:

1. Proiectarea, realizarea și implementarea unor soluții eficiente de interfațare între platformele hardware (NI myRIO, Arduino, Raspberry Pi, Micro:Bit), mediile software de dezvoltare (LabVIEW, Matlab, Arduino, Python, NodeRED) și seturile portabile (NeuroSky, Emotiv Insight, GTEC Unicorn) pentru achiziția semnalelor electroencefalografice;
2. Proiectarea, realizarea și implementarea unor instrumente software pentru achiziția, procesarea și clasificarea, online (în timp real) și offline, a semnalelor electroencefalografice, utilizând atât tehnici bazate pe rețelele neuronale artificiale cât și metode de tip Fuzzy Logic;
3. Proiectarea, realizarea și implementarea unor instrumente software pentru aplicații de scriere și comunicare, care să permită redactarea unor texte de la nivelul unei tastaturi virtuale, a unor sisteme virtuale de afișare cu LED-uri, transferul unor mesaje de chat la nivelul unei aplicații

Android sau platformei ChatGPT bazate pe inteligența artificială generativă, respectiv căutarea de informații pe Internet, utilizând semnalul de control determinat de clipirile oculare voluntare sau de biopotențialele evocate vizuale de tip P300;

4. Proiectarea, realizarea și implementarea unor soluții eficiente de comandă și control a unor dispozitive experimentale de tip mână robotică, braț robotizat și robot mobil;
5. Proiectarea, realizarea și implementarea unor instrumente software pentru demonstrarea principiului de funcționare a interfeței creier-computer și crearea aplicațiilor de simulare sau realizarea unor medii de antrenament pentru controlul unor modele virtuale, precum un braț robotizat, o mână robotică și mini-roboți cu aspect umanoid.

3.2. PERSPECTIVĂ GENERALĂ PRIVIND APLICAȚIILE DEZVOLTATE

Capitolul 7 se concentrează asupra cercetărilor experimentale și prezintă succint rezultatele obținute la testarea aplicațiilor de tip interfață creier-computer dezvoltate în vederea îndeplinirii obiectivelor specifice anterior enunțate. Aceste aplicații au presupus realizarea componentelor integrate (hardware și software), metodologia cercetărilor fiind descrisă în capitolul 5, iar implementările doctorandei reprezentate de algoritmi și secvențele originale de programare sunt prezentate în capitolul 6, având în vedere următoarele aspecte: scopul propus, componentele hardware și software, principiul de funcționare, modul de utilizare, gradul de noutate, respectiv posibilitățile anterior considerate și evidențierea soluției optime destinate sprijinului persoanelor cu dizabilități.

Pe de-o parte, aplicațiile dezvoltate în cadrul acestei Teze de Doctorat au oferit mediul necesar demonstrării principiului de funcționare a unui sistem de tip interfață creier-computer și experimentării modului de utilizare, la domiciliul personal, a unui astfel de dispozitiv portabil.

Pe de altă parte, aplicațiile dezvoltate în cadrul acestei Teze de Doctorat au asigurat condițiile desfășurării activităților de cercetare, care au presupus studiul realizărilor din acest domeniu până la momentul actual, identificarea provocărilor care trebuie depășite, enunțarea unor ipoteze, confirmarea sau respingerea acestora, dezvoltarea și optimizarea instrumentelor necesare pentru efectuarea experimentelor, analiza și interpretarea rezultatelor obținute și formularea unor concluzii.

Îndeplinirea primului obiectiv specific, enunțat anterior, înglobează următoarele aplicații integrate (software și hardware) de tip interfață creier-computer, dezvoltate în cadrul tezei de doctorat:

1. Aplicație BCI bazată pe integrarea în LabVIEW dintre NeuroSky și NI myRIO;
2. Aplicație BCI bazată pe integrarea în Matlab dintre NeuroSky și Arduino Nano 33 IoT;
3. Aplicație BCI bazată pe integrarea în Python dintre NeuroSky și Raspberry Pi;
4. Aplicație BCI bazată pe integrarea în NodeRED dintre Emotiv și Micro:Bit;
5. Aplicație BCI bazată pe integrarea în Python dintre Emotiv și Arduino;
6. Aplicație BCI bazată pe integrarea în LabVIEW dintre Unicorn și Arduino.

Îndeplinirea celui de-al doilea obiectiv specific, enunțat anterior, înglobează următoarele aplicații integrate (software și hardware) de tip interfață creier-computer, dezvoltate în cadrul tezei de doctorat:

1. Aplicație LabVIEW pentru monitorizarea și analiza datelor EEG de la NeuroSky;
2. Aplicație Python pentru monitorizarea și analiza datelor EEG de la NeuroSky;
3. Aplicație LabVIEW de tip BCI bazată pe Logica Fuzzy.

Îndeplinirea celui de-al treilea obiectiv specific, enunțat anterior, înglobează următoarele aplicații integrate (software și hardware) de tip interfață creier-computer, dezvoltate în cadrul tezei de doctorat:

1. Aplicație BCI pentru controlul unei tastaturi virtuale;
2. Aplicație BCI pentru transferul mesajelor chat la smartphone cu Android;
3. Aplicație BCI pentru afișarea mesajelor text la nivelul sistemelor cu LED-uri;
4. Aplicație BCI pentru comunicarea cu Chat GPT utilizând P300 Speller;
5. Aplicație BCI pentru accesarea resurselor de Internet utilizând P300 Speller.

Îndeplinirea celui de-al patrulea obiectiv specific, enunțat anterior, înglobează următoarele aplicații integrate (software și hardware) de tip interfață creier-computer, dezvoltate în cadrul tezei:

1. Aplicație BCI pentru controlul unei mâini robotice utilizând NeuroSky și Arduino;
2. Aplicație BCI pentru controlul unui braț robotic utilizând NeuroSky;
3. Aplicație BCI pentru controlul unui robot mobil utilizând NeuroSky și Arduino;
4. Aplicație BCI pentru controlul unui sistem mecatronic utilizând P300 Speller.

Îndeplinirea celui de-al cincilea obiectiv specific, enunțat anterior, înglobează următoarele aplicații integrate (software și hardware) de tip interfață creier-computer, dezvoltate în cadrul tezei:

1. Aplicație BCI pentru controlul unei mâini robotice 3D utilizând NeuroSky;
2. Aplicație BCI pentru controlul hologramelor cu Yoda utilizând NeuroSky;
3. Aplicație BCI pentru controlul unui braț robotic 3D utilizând P300 Speller;
4. Aplicație BCI pentru controlul unui scaun cu roțile 3D utilizând P300 Speller;
5. Aplicație BCI pentru controlul unui scooter 3D utilizând P300 Speller;
6. Aplicație BCI pentru simularea Juice Vending Machine utilizând P300 Speller.

CAPITOLUL 4

CONSIDERAȚII TEORETICE PRIVIND SISTEMELE DE TIP INTERFAȚĂ CREIER-COMPUTER

4.4. TIPURI DE SEMNALE ELECTROENCEFALOGRAFICE UTILIZATE ÎN INTERFEȚELE CREIER-COMPUTER

Sistemele de tip interfață creier-computer se bazează pe semnale de control care provin de la nivelul creierului. Unele dintre aceste tipuri de semnale prezintă trăsături care pot fi recunoscute, respectiv extrase în mod simplu. Totuși, celelalte ritmuri EEG, care cuprind caracteristici mai dificil de identificat, necesită tehnici suplimentare de pre-procesare. Semnalele de control destinate unui sistem BCI se clasifică în trei categorii: semnale evocate, semnale spontane și semnale hibride (Figura 4.4.1).

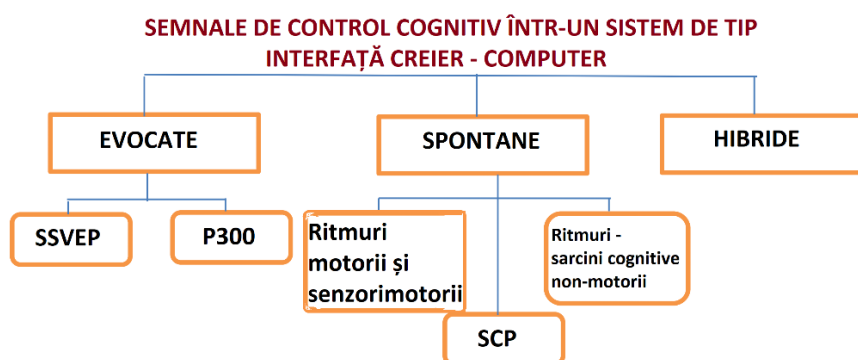


Figura 4.4.1. Clasificarea semnalelor de control cognitiv utilizate într-un sistem de tip interfață creier-computer.

Traducere - [331].

Semnalele evocate, cunoscute și sub denumirea de semnale evocate de tip vizual (VEP = Visual Evoked Potentials), sunt generate, în mod inconștient, atunci când subiectul recepționează stimuli externi. Cele mai cunoscute tipuri de semnale evocate sunt: SSEP (Steady State Evoked Potentials = Potențiale Evocate de Stare Staționară) și P300. Semnalele evocate sunt determinate de stimuli externi, care i-ar putea declanșa subiectului senzația de extenuare, iritabilitate și uneori, solicitare psihică ridicată.

Semnalele SSEP sunt generate atunci când utilizatorii unei interfețe creier-computer percep un stimul periodic [331], determinat de: afișarea intermitentă (cu efect de tip flickering – aprindere și stingere) a unei imagini, un sunet modulat în frecvență, sau o vibrație specifică. Astfel, la nivelul creierului, se manifestă un răspuns specific în momentul în care subiectul sesizează o anumită modificare sau variație, caracterizat printr-o frecvență particulară. Nivelul semnalelor corticale se va amplifica în conformitate cu frecvența stimulului.

În funcție de regiunea cerebrală care reacționează la stimulul perceput de utilizator, se disting următoarele tipuri de potențiale evocate: vizuale, somatosenzoriale și auditive. Semnalele EEG evocate

vizuale de regim permanent (SSVEPs = Steady – State Visual Evoked Potentials), generate la nivelul cortexului vizual, sunt cele mai întâlnite modalități de control în cadrul aplicațiilor BCI. Ritmul SSVEP (figura 4.4.2) declanșat este caracterizat prin valori de frecvență (între 6 – 30 Hz) similare cu frecvența efectului de tip flickering al imaginii afișate.

Frecvența de transfer a semnalelor evocate de tip SSVEP poate fi: redusă, având valori de 30 bits/minut în cazul t-VEP (potențiale evocate vizuale modulate în timp); moderată, având valori între 30 – 60 bits/minut în cazul f-VEP (potențiale evocate vizuale modulate în frecvență); ridicată, rezultând valori care depășesc 100 bits/minut în cazul c-VEP (potențiale evocate vizuale modulate în cod pseudo-aleator). Înainte de experimentarea sistemelor BCI bazate pe SSVEP, utilizatorii participă la o sesiune de antrenament mental, redus ca dificultate, în scopul familiarizării cu modalitatea de control. Aplicațiile specifice semnalelor SSVEP se bazează pe selecția unei singure opțiuni dintr-o multitudine de butoane virtuale, asociate cu diverse comenzi. Fiecare buton sau opțiune este iluminată cu o anumită frecvență (exemplu: 7 Hz, 10 Hz, 14 Hz, 21 Hz), iar utilizatorul va privi cu atenție zona aferentă răspunsului dorit, astfel încât la nivelul cortexului său vizual să se genereze oscilația corespunzătoare stimulului luminos [100]. Potențialul SSVEP determină multiple opțiuni de control în cadrul unui sistem BCI și poate fi utilizat la aplicațiile care implică numeroase grade de libertate.

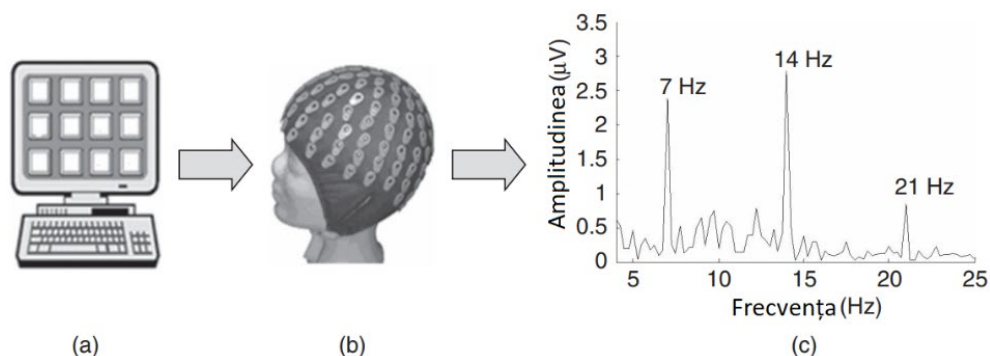


Figura 4.4.2. Potențial SSVEP bazat pe codificarea frecvenței: (a) Stimularea vizuală constă în elemente-țintă având diferite frecvențe intermitente de aprindere/stingere; (b) subiectul; (c) Potențialul SSVEP, declanșat prin stimularea la 7 Hz, prezintă componente caracteristice de frecvență cu vârfuri determinate de valorile frecvențelor armonice și fundamentale obținute de la electrodul plasat în poziția O2 [496].

Potențialul evocat P300 se generează în regiunea corticală parietală la aproximativ 300 milisecunde după ce subiectul este expus unei sarcini mai puțin frecvente în cadrul paradigmei „odd-ball” reprezentate sub forma unei tastaturi virtuale [331], [100]. Răspunsul P300 se activează prin concentrarea atenției subiectului [100] asupra unui stimul specific (litera de interes – punctul „țintă”) din întregul set de stimuli (setul de caractere). Atunci când stimulul acesta (considerat „rar”) devine relevant pentru subiect, se declanșează potențialul evocat P300 (Figura 4.4.3).

Cea mai frecvent utilizată paradigmă pentru generarea răspunsului evocat P300 [100] într-un sistem de tip interfață creier-computer este matricea de ortografiere concepută de Farwell și Donchin în anul 1988. Această matrice conține literele alfabetului, iar subiectul trebuie să-și concentreze atenția asupra unei litere specifice. Răspunsul P300 se generează atunci când rândul și coloana corespunzătoare literei vizate sunt iluminate în mod repetat.

Sistemele BCI bazate pe semnalele evocate P300 nu necesită un program intens de antrenament mental, cu excepția sesiunii inițiale de calibrare a răspunsului P300 caracteristic fiecărui utilizator, generat atunci când el privește un stimul luminos (rar), având o frecvență neregulată. Cu toate acestea,

modalitatea de control BCI bazată pe declanșarea potențialelor evocate P300 implică stimuli repetitivi, care pot determina o stare de oboseală sau diminuarea interesului arătat de subiect. Numeroase grupuri de cercetători au investigat și experimentat soluțiile optime de prezentare a stimulilor, obținându-se valori superioare privind acuratețea unui sistem BCI bazat pe semnalul P300. Cercetările din acest domeniul sunt direcționate înspre obținerea unui număr cât mai redus de flash-uri luminoase în scopul recunoașterii răspunsului P300 dintr-o singură încercare, într-un interval de timp succint.

CAPITOLUL 5

METODOLOGIA CERCETĂRIILOR

5.1. PERSPECTIVĂ DE ANSAMBLU - CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE

Autoarea acestei teze de doctorat a desfășurat cercetări teoretice prin parcurgerea etapelor privind evaluarea stadiului actual al realizărilor, dezvoltărilor, respectiv evoluției interfețelor creier-computer, culminând cu implementarea unor algoritmi originali, respectiv a metodelor noi de analiză a semnalelor EEG și a unor tehnici particularizate de control prin comenzile determinate de clipirile oculare voluntare sau biopotențialele evocate P300. Totodată, doctoranda a întreprins cercetări experimentale prin conceperea unor aplicații inovatoare de tip interfață creier-computer (BCI), care au fost ulterior optimizate și testate de subiecți prin parcurgerea unor sarcini având ca scop evaluarea performanței în utilizare. Dezvoltarea acestor aplicații BCI a necesitat integrarea funcționalităților complete prin realizarea secvențelor de programare (LabVIEW, Python, Matlab, NodeRED) pentru a facilita etapele integrale bazate pe achiziția și prelucrarea semnalelor provenite de la kit-urile cu senzori EEG, respectiv generarea comenzilor la nivelul platformelor de dezvoltare (Arduino, NI myRIO, Raspberry Pi, Micro:Bit) pentru controlul sistemelor (prototipuri mecatronice, simulări virtuale, modele 3D) concepute în cadrul stagiului doctoral desfășurat între anii 2017 – 2024.

Conform tabelului din Figura 5.1.1, autoarea acestei teze de doctorat a proiectat, a realizat, a implementat, a testat și a optimizat un număr de 25 aplicații de tip interfață creier-computer pentru controlul diferitelor sisteme (dispozitive experimentale, modele virtuale 3D, simulări multimedia interactive) utilizând diverse platforme hardware de dezvoltare cu microcontroller sau tehnologie FPGA, platforme software pentru programarea funcționalităților integrale și kit-uri de căști electroencefalografice (NeuroSky, Emotiv, GTEC Unicorn).

Nr.	Sistemul Controlat de tip Interfață Creier-Computer	Tehnica de Control prin Interfața Creier-Computer	Platforme Hardware	Platforme Software	Casca EEG	Lucrare - Conferință/Jurnal	Publicație	Tip Autor
1	Robot Mobil	Clipiri Oculare - Numărare	NI myRIO	LabVIEW	NeuroSky - 1 Senzor	CEMD China, 2017 ACME Iași, 2018	BDI - ASME Press Web of Science	Co-Autor Prim-Autor
2	Tastatura Virtuală	Clipiri Oculare - Divide et Impera	Arduino Uno	LabVIEW - Arduino	NeuroSky - 1 Senzor	PRASIC Brașov, 2018	BDI - IOP Science	Prim-Autor
3	Braț Robotic 3D	Biopotențiale Evocate P300 Ritmuri EEG - Delta, Theta, Alpha, Beta, Gamma	Nu este necesară	LabVIEW	GTEC Unicorn - 8 Senzori	PRASIC Brașov, 2018 ICNBME Chișinău, 2023 Hackathon GTEC BRAIN.IO Aprilie 2023	BDI - IOP Science BDI - Springer	Prim-Autor Unic-Autor
4	Mână Robotică	Clipiri Oculare - Switch & Select	Arduino Uno	LabVIEW - Arduino	NeuroSky - 1 Senzor	EHB Iași, 2019	Web of Science	Prim-Autor
5	Mână Robotică - Model 3D	Clipiri Oculare - Switch & Select	Nu este necesară	LabVIEW	NeuroSky - 1 Senzor	EHB Iași, 2019	Web of Science	Prim-Autor
6	Robot Mobil	Clipiri Oculare - Switch & Select	Arduino Uno	LabVIEW - Arduino	NeuroSky - 1 Senzor	ACME Iași, 2020	Web of Science	Prim-Autor
7	Aplicație - Mesaje Chat	Clipiri Oculare - Switch & Select	Telefon Android	LabVIEW - MIT App Inventor	NeuroSky - 1 Senzor	EHB Iași, 2020	Web of Science	Prim-Autor
8	Motocicletă Miniaturală	Clipiri Oculare - Numărare	Arduino Uno 33 IoT	Matlab	NeuroSky - 1 Senzor	ICISIL Brașov, 2020	SCIENDO	Prim-Autor
9	Monitorizare Date EEG	Semnal EEG Brut - Achiziție, Procesare, Clasificare Rețele Neuronale Artificiale	Nu este necesară	LabVIEW	NeuroSky - 1 Senzor	Jurnal IJDE, AUSTRIA, 2023 Preprint - 2 Versiuni	Web of Science FI = 1.3	Unic-Autor
10	Braț Robotic	Clipiri Oculare - Switch & Select	NI myRIO	LabVIEW	NeuroSky - 1 Senzor	EHB Iași, 2021	Web of Science	Unic-Autor
11	Robot Mobil	Clipiri Oculare - Fuzzy Logic	Arduino Uno	LabVIEW	NeuroSky - 1 Senzor	INTER-ENG Târgu Mureș, 2021	Web of Science	Unic-Autor
12	Monitorizare Date EEG	Semnal EEG Brut - Achiziție, Procesare, Clasificare Rețele Neuronale Artificiale	Nu este necesară	Python	NeuroSky - 1 Senzor	ICNBME Chișinău, 2021	BDI - Springer	Unic-Autor
13	Robot Mobil	Clipiri Oculare - Algoritm Optimizat Analiza Semnal EEG Brut	Raspberry Pi	Python	NeuroSky - 1 Senzor	ICNBME Chișinău, 2021	BDI - Springer	Unic-Autor
14	Robot Umanoid - Model 3D	Simulare Date EEG	Nu este necesară	LabVIEW	Nu este necesară	REV EGIPT, 2022	BDI - Springer	Prim-Autor
15	Sisteme de Alipare Matrice 8x8 LED-uri - LCD TEXT 2x16	Clipiri Oculare - Switch & Select	Arduino Uno	LabVIEW	NeuroSky - 1 Senzor	ACME Iași, 2022	BDI - IOP Science	Unic-Autor
16	Holograme Yoda	Clipiri Oculare - Coduri Binare	Telefon Android	LabVIEW - MIT App Inventor	NeuroSky - 1 Senzor	ICL SPANIA, 2023	BDI - Springer	Prim-Autor
17	Simulare Automat Sucuri	Biopotențiale Evocate P300	Nu este necesară	LabVIEW - Unicorn P300 Speller	GTEC Unicorn - 8 Senzori	INTER-ENG Târgu Mureș, 2022	BDI - Springer	Unic-Autor
18	Casă Inteligentă - LED RGB	Clipiri Oculare - Numărare	Arduino Mega	Python	Emotiv Insight - 5 Senzori	EHB Iași, 2022	BDI - IEEE Xplore	Unic-Autor
19	Sisteme de Alipare - Matrice 4x4 LED-uri	Închidere/Deschidere Ochi Ritm EEG Alpha	Micro:Bit - Raspberry Pi	Python - NODE-Red	Emotiv Insight - 5 Senzori	REV GRECIA, 2023	BDI - Springer	Unic-Autor
20	Accesare Resurse Internet	Biopotențiale Evocate P300	Nu este necesară	LabVIEW - Unicorn P300 Speller	GTEC Unicorn - 8 Senzori	ICL SPANIA, 2023	BDI - Springer	Unic-Autor
21	Aplicație - Chat GPT	Biopotențiale Evocate P300	Nu este necesară	LabVIEW - Python - Unicorn P300 Speller	GTEC Unicorn - 8 Senzori	IMCL GRECIA, 2023	BDI - Springer	Unic-Autor
22	Prototip Automat Sucuri	Biopotențiale Evocate P300	Arduino Mega	LabVIEW - Arduino - Unicorn P300 Speller	GTEC Unicorn - 8 Senzori	INTER-ENG Târgu Mureș, 2023	BDI - Springer	Unic-Autor
23	Braț Robotic & Robot Mobil	Biopotențiale Evocate P300	Arduino - Wifi	LabVIEW - Arduino - Unicorn P300 Speller	GTEC Unicorn - 8 Senzori	EHB București, 2023 Hackathon GTEC BRAIN.IO Octombrie 2023	BDI - Springer	Unic-Autor
24	Scaun cu Rotile - Model 3D	Biopotențiale Evocate P300	Nu este necesară	LabVIEW - Unicorn P300 Speller	GTEC Unicorn - 8 Senzori	STE FINLANDA, 2024	BDI - Springer	Unic-Autor
25	Scooter Driver - Model 3D (1oc)	Biopotențiale Evocate P300	Nu este necesară	LabVIEW - Unicorn P300 Speller	GTEC Unicorn - 8 Senzori	Hackathon GTEC BRAIN.IO Aprilie 2024	Încă NU	Unic-Autor

Figura 5.1.1. Perspectivă de ansamblu privind desfășurarea cercetărilor teoretice și experimentale.

Doctoranda a implementat algoritmi originali pentru controlul interfețelor creier-computer, astfel că a elaborat un număr de 28 lucrări științifice, pe care le-a susținut și publicat în cadrul Conferințelor și Jurnalelor. Prin urmare, sistemele controlate de autoarea tezei utilizând interfețe creier-computer sunt:

- ❖ Roboții mobili;
- ❖ Brațele robotice;
- ❖ Motocicleta miniaturală;
- ❖ Sistemele de afișare (matricea cu 8x8 LED-uri și LCD TEXT 2x16);
- ❖ Casa inteligentă (iluminare cu LED RGB);
- ❖ Automatul programabil de sucuri;
- ❖ Simulările bazate pe modele 3D (braț robotic, mână robotică, robot umanoid, scaun cu roțile);
- ❖ Aplicații multimedia (tastatură virtuală, transfer de mesaje Chat pe Android, Chat GPT, accesul la resursele de Internet, redarea hologramelor cu Yoda);

Comenzile pentru controlul sistemelor anterior enumerate au fost îndeplinite la nivelul următoarelor platforme: Arduino (Uno, Mega, Nano 33 IoT), NI myRIO, Raspberry Pi și Micro:Bit.

De asemenea, semnalele EEG au fost achiziționate de la multiple kit-uri de căști, precum: NeuroSky (Mindwave, Mindwave Mobile, Force Trainer) cu un singur senzor, Emotiv Insight cu 5 senzori, GTEC Unicorn cu 8 senzori. Algoritmii implementați de doctorandă, pentru controlul interfețelor creier-computer s-au bazat pe:

- ❖ Detectarea clipirilor oculare voluntare prin apelarea funcțiilor predefinite;
- ❖ Identificarea clipirilor oculare voluntare prin implementări optimizate;
- ❖ Numărarea clipirilor oculare voluntare;
- ❖ Tranziții și Selecții (Switch& Select) printre comenzi cu ajutorul clipirilor oculare voluntare;
- ❖ Tehnica Divide et Impera pentru selecții multiple determinate de clipirile oculare voluntare;
- ❖ Determinarea amplitudinii clipirilor oculare prin metode bazate pe Logica Fuzzy;
- ❖ Achiziția, procesarea și clasificarea semnalului EEG brut pe baza Rețelelor Neuronale Artificiale;
- ❖ Generarea codurilor binare utilizând clipirile oculare voluntare;
- ❖ Detectarea și utilizarea biopotențialelor evocate P300;
- ❖ Monitorizarea ritmului EEG Alpha în timpul închiderii și deschiderii globilor oculari;

Totodată, doctoranda a utilizat următoarele medii de dezvoltare și programare în vederea implementării algoritmilor anterior menționați pentru controlul interfețelor creier-computer: LabVIEW, Matlab, Python, Node-RED, Arduino și MIT App Inventor.

CAPITOLUL 6

IMPLEMENTĂRI ORIGINALE. ALGORITMI. SECVENȚE DE PROGRAMARE. APLICAȚII BCI

6.1. UTILIZAREA CLIPIRII OCULARE VOLUNTARE CA SEMNAL DE CONTROL BCI

Clipirea oculară voluntară reprezintă un artefact proeminent detectat la nivelul semnalului electroencefalografic brut. Cu toate că majoritatea cercetărilor din neuroștiințe vizează eliminarea artefactelor generate de clipirile oculare, aplicațiile bazate pe interfața creier-computer pot utiliza în mod eficient semnalul de control precis obținut cu ajutorul clipirilor oculare voluntare [476], [484], [527], [532]. Astfel, această teză de doctorat valorifică potențialul determinat de gestul facial simplu al execuției clipirilor intenționate de către utilizatorii cu dizabilități neuromotorii, care nu își mai pot deplasa membrele superioare și inferioare. Conform studiilor anterioare, existând inclusiv cazul renumit al cercetătorului Steve Hawking, care suferea de scleroză laterală amiotrofică, controlul voluntar privind efectuarea clipirilor oculare se păstrează pentru un interval de timp îndelungat ulterior pierderii celorlalte posibilități neuromotorii.

Figura 6.1.1 prezintă tiparul de semnal EEG aferent clipirilor oculare voluntare, imaginea fiind inclusă de doctorandă în lucrarea publicată la Conferința ICNBME Chișinău, 2021: [401].

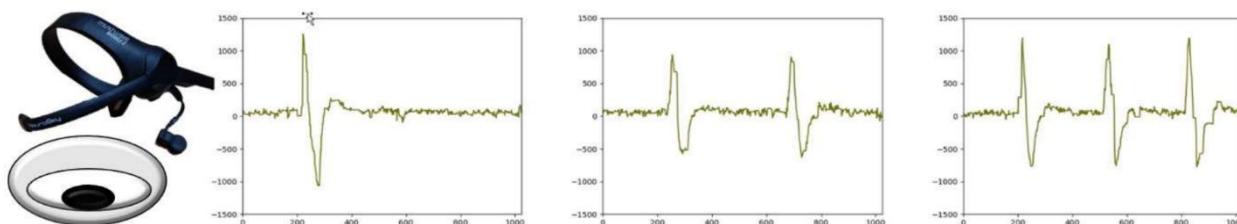


Figura 6.1.1. Reprezentarea grafică a formelor de undă pentru diferitele tipuri de clipire – simplă, dublă, triplă detectate la nivelul biosenzorului căștii EEG NeuroSky Mindwave.

Considerând argumentul conform căruia clipirea oculară voluntară reprezintă un semnal de control precis, eficient, simplu de efectuat, ușor evidențiable, cercetările din această teză de doctorat s-au concentrat asupra studiului, explorării, implementării, experimentării, testării și optimizării tehnicilor de detectare și cuantificare sau numărare a clipirilor oculare voluntare, acestea îndeplinind rolul de comenzi în sistemele de tip interfață creier-computer.

Astfel, următoarele 10 aplicații interactive, dezvoltate în cadrul acestei teze, s-au fundamentat pe utilizarea semnalului de control determinat de detectarea clipirilor oculare voluntare, prin valorificarea unei funcții oferite de toolkit-ul ThinkGear al căștii EEG NeuroSky:

- ✚ Subcapitolul 7.3.2. Aplicație LabVIEW de tip Interfață Creier-Computer bazată pe integrarea dintre sistemul de dezvoltare NI myRIO și casca NeuroSky pentru controlul unui robot mobil;
- ✚ Subcapitolul 7.3.3. Aplicație Matlab de tip Interfață Creier-Computer bazată pe integrarea dintre casca EEG NeuroSky și platforma Arduino Nano 33 IoT pentru controlul motocicletei;
- ✚ Subcapitolul 7.5.2. Aplicație LabVIEW de tip Interfață Creier-Computer pentru controlul unei tastaturi virtuale care facilitează comunicarea la persoanele cu dizabilități;

- ✚ Subcapitolul 7.5.3. Aplicații integrate LabVIEW – Android destinate comunicării prin mesaje chat pe baza unei interfețe creier-computer controlate cu ajutorul căștii EEG NeuroSky;
- ✚ Subcapitolul 7.5.4. Aplicații LabVIEW de tip interfață creier-computer bazate pe simularea animațiilor grafice și transmiterea mesajelor text la nivelul sistemelor virtuale de afișare cu led-uri și dispozitivelor conectate la platforma Arduino Uno;
- ✚ Subcapitolul 7.6.2. Aplicație LabVIEW de tip interfață creier-computer pentru controlul unui model fizic experimental de mână robotică utilizând casca EEG NeuroSky;
- ✚ Subcapitolul 7.6.3. Aplicație LabVIEW de tip interfață creier-computer pentru controlul unui braț robotic și a unui sistem mobil pentru deplasare pe diferite direcții;
- ✚ Subcapitolul 7.6.4. Aplicație LabVIEW de tip interfață creier-computer pentru controlul unui robot mobil utilizând platforma Arduino Mega și casca EEG NeuroSky Mindwave;
- ✚ Subcapitolul 7.7.2. Aplicație LabVIEW de tip interfață creier-computer pentru controlul unui model virtual de mână robotică 3D;
- ✚ Subcapitolul 7.7.3. Aplicație LabVIEW de tip interfață creier-computer pentru activități de antrenament cognitiv prin controlul hologramelor cu Yoda conform unei paradigme de tip joc digital bazat pe coduri binare.

6.2. DETECTAREA ȘI CUANTIFICAREA CLIPIRILOR OCULARE VOLUNTARE

6.2.1. Detectarea clipirilor oculare voluntare cu funcția ThinkGear

Algoritmul pentru detectarea clipirilor oculare voluntare a presupus parcurgerea unor etape prin care s-a evaluat amplitudinea sau intensitatea unei clipiri oculare determinate cu ajutorul funcției ThinkGear dedicate căștii EEG NeuroSky Mindwave.

Prima etapă a constat în achiziția semnalului EEG, provenit de la biosenzorul integrat de casca portabilă NeuroSky, prin apelarea subprogramelor LabVIEW oferite de pachetul/driver-ul de instrumente NeuroSky [289]. Această bibliotecă de funcții .dllThinkGear [108] a permis: configurarea inițială a comunicației wireless dintre setul NeuroSky și computer, evaluarea calității semnalului EEG, activarea sau dezactivarea funcției de detectare a amplitudinii clipirilor oculare, citirea valorii amplitudinii clipirilor, achiziția semnalului EEG brut/raw sau clasificarea acestuia în ritmurile EEG specifice (Figura 6.2.1.1).

A doua etapă a presupus o operație de comparație dintre amplitudinea clipirilor oculare detectate și o valoare de prag definită pentru fiecare utilizator. Scopul unui astfel de algoritm implementat în LabVIEW, Python sau Matlab constă în evaluarea acestei condiții pentru a determina dacă amplitudinea clipirilor oculare a depășit pragul stabilit. În caz afirmativ, rezultă detectarea unei clipiri oculare voluntare. În caz negativ, se consideră o clipire oculară involuntară sau o acțiune reflexă.

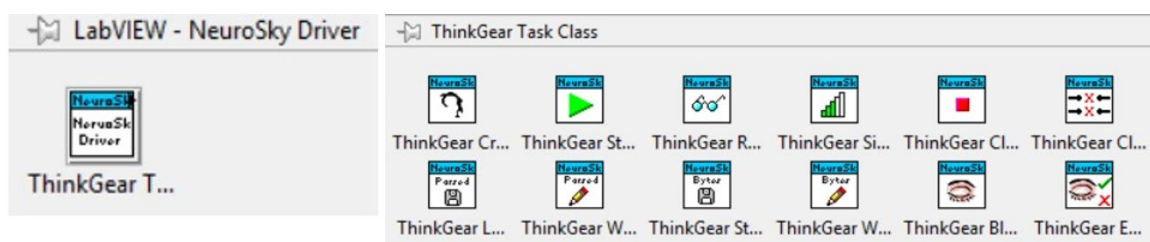


Figura 6.2.1.1. Paleta de funcții NeuroSky aferentă toolkit-ului ThinkGear dedicat mediului LabVIEW.

6.2.3. Tranziții și selecții la nivelul comenzilor bazate pe clipirile oculare voluntare

În cadrul acestei teze de doctorat, numărarea sau cuantificarea clipirilor oculare voluntare este realizată prin implementarea algoritmului de tip state-machine. Clipirile oculare, executate în mod intenționat, sunt caracterizate prin amplitudinii având valori superioare comparativ cu valoarea de prag, inițial setată în interfața grafică din LabVIEW. Valoarea de prag poate fi reglată inclusiv în timpul rulării aplicației LabVIEW, susținând capacitatea diferită a fiecărui utilizator de a executa clipiri oculare voluntare, având o intensitate mai redusă (clipiri mai domoale) sau mai ridicată (clipiri mai puternice).

Doctoranda a implementat un algoritm în LabVIEW pentru a facilita tranzițiile și selecțiile la nivelul comenzilor generate prin efectuarea clipirilor oculare voluntare necesare la aplicațiile originale de tip interfață creier-computer, dezvoltate în cadrul tezei, pentru a controla diferite sisteme: tastatură virtuală, aplicație destinată transferului de mesaje chat, sisteme de afișare cu LED-uri, mână robotică (reală și virtuală), braț robotic, și robot mobil.

Algoritmul implementat este compus din patru stări: Init, Tranziție (Switch), Selecție (Select) și Finalizat (Ready). Fiecare dintre cele patru stări include câte o secvență similară de instrucțiuni, exceptând o instrucțiune alternativă (prin apelarea unei structuri cauzale în mediul de programare LabVIEW) pentru evaluarea condiției care verifică dacă s-a efectuat o clipire oculară, caracterizată printr-o amplitudine superioară valorii de prag prestabilite.

Starea de Tranziție (Switch) este echivalentă cu detectarea unei singure clipiri oculare voluntare, iar starea de Selecție (Select) reprezintă numărarea a două clipiri oculare, executate în mod intenționat. Prin urmare, prin efectuarea unei singure clipiri de la nivelul ochilor, rezultă tranziția, trecerea sau deplasarea la nivelul comenzilor reprezentate prin butoane virtuale sau alte opțiuni (emoticoane). De asemenea, prin execuția a două clipiri oculare, se realizează selecția și transmiterea comenzii dorite, la nivelul căreia utilizatorul a încetat/oprit procesul de tranziție.

Informații suplimentare privind secvențele de programare din LabVIEW pentru implementarea algoritmului care determină tranzițiile și selecțiile la nivelul comenzilor bazate pe clipirile oculare voluntare în interfețele creier-computer se regăsesc la **Anexe – Secțiunea 6.2.3**.

6.2.4. Algoritmul Divide et Impera utilizând clipirile oculare voluntare multiple

Autoarea acestei teze de doctorat a dezvoltat o aplicație de tip interfață creier-computer pentru a facilita comunicarea în cazul persoanelor cu dizabilități neuromotorii. Prin urmare, doctoranda a implementat algoritmul Divide et Impera (Dezbina și Cucerește) în mediul LabVIEW în scopul generării

comenzilor multiple necesare la controlul unei tastaturi virtuale cu ajutorul clipirilor oculare voluntare. De asemenea, o astfel de abordare a reprezentat punctul de pornire pentru proiectarea unor tastaturi virtuale asemănătoare, bazate pe interfața creier-computer [247], [103]. Conform literaturii de specialitate [330], [68], cercetătorii au utilizat mai rar mediul LabVIEW pentru a crea un algoritm logic destinat unor astfel de interfețe creier-computer.

Implementarea algoritmului Divide et Impera s-a bazat pe paradigma state-machine, caracterizându-se prin următoarele trăsături:

- ❖ Numărarea clipirilor oculare voluntare caracterizate printr-o amplitudine superioară valorii de prag;
- ❖ Activarea comenzii Switch pentru tranziția la nivel de rânduri, jumătăți de rânduri sau caractere (taste), atunci când s-a executat o singură clipire oculară voluntară;
- ❖ Activarea comenzii Select în vederea selectării unui anumit rând, a unei jumătăți specifice de rând sau a unui caracter (tastă) particular, atunci când s-au efectuat două clipiri oculare voluntare;
- ❖ Opțiunea HIGHLIGHT pentru a indica/evidenția/”colora” rândul curent, jumătatea de rând sau tasta selectat la momentul actual, urmând inserarea caracterului aferent în caseta text;
- ❖ Activarea comenzii Cancel - Anulare, asociate cu execuția a trei clipiri oculare voluntare pentru anularea selecției curente. Mai departe, este posibilă selecția unui anumit rând de taste;
- ❖ Comanda Delete –Ștergere, declanșată atunci când s-au înregistrat patru clipiri oculare voluntare;
- ❖ Comanda Space –Spațiu, determinată prin execuția unui număr de cinci clipiri oculare voluntare.

Informații suplimentare privind secvențele de programare din mediul LabVIEW pentru implementarea fiecărei etape aferente algoritmului de tip Divide et Impera pentru controlul tastaturii virtuale cu ajutorul clipirilor oculare voluntare se regăsesc la **Anexe – Secțiunea 6.2.4.**

6.3. ACHIZIȚIA, ANALIZA ȘI CLASIFICAREA SEMNALELOR EEG UTILIZÂND METODE BAZATE PE REȚELELE NEURONALE ARTIFICIALE DIN LABVIEW ȘI PYTHON

6.3.1. Aspecte generale

Pe parcursul studiilor doctorale, autoarea acestei teze a proiectat, a dezvoltat, a testat și a optimizat anumite aplicații LabVIEW și Python pentru achiziția, procesarea și clasificarea semnalului electroencefalografic brut provenit de la biosenzorul căștii NeuroSky în scopul identificării clipirilor oculare voluntare, care constituie semnale de control pentru sistemele de tip interfață creier-computer. Doctoranda a aplicat metode simple bazate pe rețelele neuronale artificiale în LabVIEW și Python, prezentând informații complete și particularități privind etapele parcurse în lucrările [357], pe care ea le-a publicat ca unic-autor la Jurnalul IJOE, indexat Web of Science, având factor de impact FI = 1.3, respectiv la Conferința ICNBME, desfășurată la Chișinău în anul 2021. De asemenea, versiunile extinse privind descrierea aplicațiilor BCI bazate pe tehnicile de inteligență artificială, aplicate în LabVIEW, au fost publicate sub formă de lucrări Preprint [356].

6.3.6. Generarea datelor EEG pentru antrenamentul și testarea RNA

Clasificarea clipirilor oculare voluntare se realizează prin antrenarea și testarea modelelor bazate pe rețelele neuronale artificiale utilizând seturile de date EEG alcătuite din multiple combinații între semnalele EEG selectate și trăsăturile extrase. Fiecare dintre cei 12 vectori bidimensionali cuprind 40 de rânduri și 1024 de coloane, conținând numărul total de 40960 valori EEG brute. Cei 12 vectori bidimensionali au fost divizați în mod egal (6 – domeniul Timp și 6 – domeniul Frecvență) și utilizați la reprezentările grafice ale ritmurilor EEG Raw, Delta, Theta, Alpha, Beta și Gamma.

Aplicația LabVIEW din această secțiune s-a bazat pe implementarea trei subprograme pentru generarea setului de date EEG.

Primul subprogram LabVIEW transformă cei 12 vectori bidimensionali într-un singur vector tridimensional. Acest vector include 12 pagini corespunzătoare semnalelor EEG, 40 de rânduri asociate secvențelor temporale și 1024 coloane aferente valorilor EEG.

Al doilea subprogram extrage vectorii bidimensionali corespunzători semnalelor anterior selectate. Vectorul 3D rezultat cuprinde un număr de pagini egal cu numărul semnalelor selectate, respectiv 40 de rânduri și 1024 de valori EEG.

Al treilea subprogram calculează trăsăturile statistice specificate pentru semnalele selectate și creează un vector 4D care conține informații detaliate despre trăsături și semnale.

Cel de-al patrulea și al cincilea subprogram LabVIEW sunt destinate reorganizării și reducerii dimensiunilor datelor obținute. Aceste programe transformă datele în vectori 3D și, respectiv, 2D, pentru a facilita stocarea și analiza ulterioară. La final, se generează un vector 2D reprezentând setul de date EEG, care este salvat într-un fișier .csv pentru a fi utilizat la antrenarea și testarea modelelor de clasificare bazate pe rețelele neuronale artificiale.

Explicații suplimentare privind cele patru subprograme LabVIEW pentru generarea seturilor de date EEG se regăsesc la **Anexe – Secțiunea 6.3.6.**

6.3.7. Antrenarea modelelor de clasificare RNA prin setarea parametrilor

Această etapă implică utilizarea setului de date EEG generat la etapele anterioare. Clasificarea, bazată pe rețelele neuronale artificiale (ANN), se realizează cu ajutorul instrumentelor virtuale standardizate incluse în pachetul de funcții LabVIEW AML - 'Analytics and Machine Learning' [185].

Instrumentul virtual 'Aml_Read CSV File.vi' este necesar la deschiderea fișierului CSV și citirea setului de date de antrenament. 'Load Training Data (2D Array).vi' este apoi utilizat pentru încărcarea setului de date EEG destinat antrenării modelului ANN de clasificare.

'Normalize.vi' permite normalizarea setului de date pentru antrenament, utilizând metode precum 2-Score sau Min-Max, astfel încât valorile să fie încadrate într-un anumit interval.

'Initialize Classification Model (NN).vi' inițializează parametrii algoritmului de clasificare bazat pe NN - Neural Networks. Utilizatorul poate seta parametri precum numărul de neuroni ascunși, tipul stratului ascuns (Sigmoid, Tanh sau Rectified Linear Unit) și de ieșire (Sigmoid sau Softmax), funcția de cost (Quadratic sau Cross-Entropy), toleranța și numărul maxim de iterații.

De asemenea, utilizatorul are posibilitatea de a seta opțiunea pentru configurarea de tip validare transversală, stabilind numărul de secțiuni în care se vor divide datele de antrenament și configurând metricile (prin setarea metodelor de mediere: micro, macro, ponderată, binară).

'Train Classification Model. vi' este utilizat la antrenarea modelului de clasificare, iar 'Aml_save Model to JSON.vi' este necesar la salvarea modelului în format JSON.

Informații suplimentare privind secvențele de programare LabVIEW pentru antrenarea modelelor de clasificare, bazate pe rețelele neuronale artificiale, prin setarea parametrilor specifici, se regăsesc la **Anexe – Secțiunea 6.3.7.**

6.3.8. Antrenarea modelelor de clasificare RNA prin generarea parametrilor optimi

În procesul de clasificare bazat pe căutarea parametrilor optimi, se utilizează aceleași instrumente și principii ca în procesul de clasificare bazat pe setarea parametrilor specifici, prezentat anterior. Cu toate acestea, există o excepție importantă referitoare la modul în care sunt setați parametrii pentru inițializarea modelului de clasificare. Prin urmare, utilizatorul trebuie să specifice multiple valori pentru fiecare parametru în instrumentul virtual 'Initialize Classification Model (NN).vi', pentru a permite instrumentului 'Train Classification Model. vi' să efectueze o căutare de tip grilă (grid search) și să identifice setul de parametri optim.

Această strategie de căutare a parametrilor optimi este utilizată în cadrul cercetării din actuala teză, deoarece oferă un grad sporit de încredere și este mai eficientă. Opțiunea de căutare exhaustivă (Exhaustive Search) determină metricile (acuratețea, precizia, recall și scorul F1) pentru toate combinațiile posibile de parametri specificați. În cazul activării căutării aleatorii (Random Search), este testat un număr limitat de combinații posibile dintre parametri specificați.

În cadrul studiului de cercetare din această teză de doctorat, s-au analizat 50 de modele de clasificare, bazate pe rețelele neuronale artificiale, generate cu ajutorul aplicației LabVIEW prezentate. Durata antrenării fiecărui model s-a situat între 1 și 3 ore. În total, au fost necesare între 50 și 150 de ore pentru antrenarea tuturor modelelor.

Informații suplimentare privind programarea în mediul LabVIEW a etapelor de antrenare a modelelor de clasificare bazate pe RNA, prin generarea parametrilor optimi, se regăsesc la **Anexe – Secțiunea 6.3.8.**

CAPITOLUL 7

CERCETĂRI EXPERIMENTALE. REZULTATE ȘI DISCUȚII

7.1. ASPECTE GENERALE PRIVIND EXPERIMENTAREA BCI

7.1.1. Eșantionul de subiecți voluntari la experimentarea BCI

Informații privind eșantionul de subiecți voluntari participanți la experimentarea aplicațiilor BCI

Testarea aplicațiilor de tip interfață creier-computer (BCI) din cadrul tezei de doctorat s-a realizat prin implicarea numărului total de 129 subiecți, care și-au exprimat acordul scris, totodată semnând pentru participarea voluntară la activitățile de experimentare. Distribuția în funcție de gen a celor 129 subiecți a avut loc astfel: 39– gen feminin și 90– gen masculin. Printre cei 129 voluntari, s-au regăsit 3 tineri cu vârste cuprinse între 28-31 ani, care activează în următoarele domenii profesionale: testare software, management financiar și muzică instrumentală. De asemenea, cei 129 subiecți au inclus 79 tineri cu vârste cuprinse între 21-22 ani, ei fiind studenți în anul III la programul de studii Calculatoare și 42 tineri cu vârste de aproximativ 23 ani, reprezentând studenți în anul IV la programul de Licență Tehnologia Informației în cadrul Facultății de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor (IESC), Universitatea Transilvania din Brașov (UnitBV). Totodată, un aspect esențial îl constituie amplificarea motivației celor 121 studenți privind implicarea lor activă la experimentarea aplicațiilor de tip interfață creier-computer prin recompensarea lor cu punctaj bonus acordat la evaluarea activităților de la orele de laborator pentru disciplina Instrumentație Virtuală (LabVIEW).

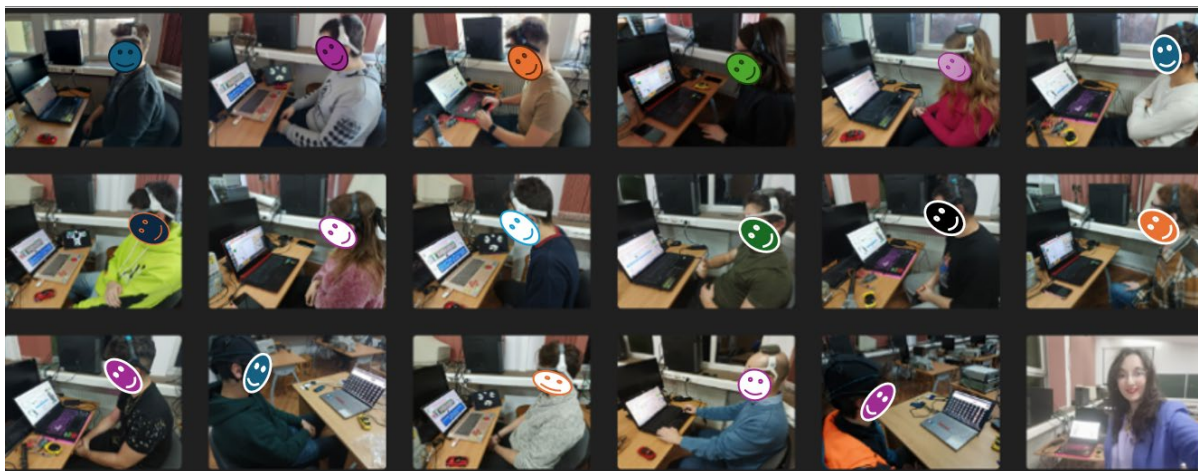


Figura 7.1.1.1. Prima sesiune experimentală organizată în Decembrie 2022, la care au participat studenții de la specializarea Calculatoare, Anul III, Facultatea IESC, UnitBV.

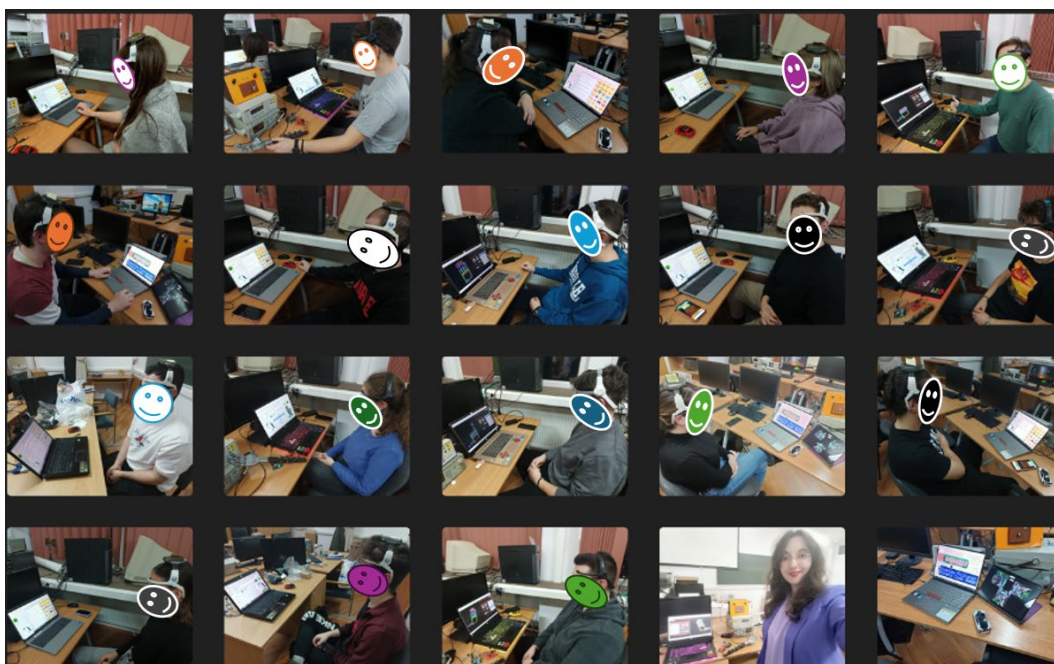


Figura 7.1.1.2. A doua sesiune experimentală organizată în Ianuarie 2023, la care au participat studenții de la specializarea Calculatoare, Anul III, Facultatea IESC, UnitBV.

Primele două serii de sesiuni experimentale (figura 7.1.1.1 și figura 7.1.1.2) privind aplicațiile de tip interfață creier-computer destinate comunicării prin transmiterea mesajelor scrise și simulărilor virtuale bazate pe modelele 3D, care a implicat 39 studenți de la Calculatoare, s-au organizat în lunile Decembrie, anul 2022 și Ianuarie, anul 2023. Cea de-a treia și cea de-a patra serie de sesiuni experimentale (figura 7.1.3.1 și figura 7.1.3.2) privind aplicațiile de tip interfață creier-computer pentru controlul sistemelor mecatronice (roboți mobili, motocicletă miniaturală, mână robotică), care a implicat alți 40 studenți de la Calculatoare, s-au organizat în lunile Decembrie, anul 2023 și Ianuarie, anul 2024.

Cea de-a cincea și cea de-a șasea serie de sesiuni experimentale (figura 7.1.3.3 și figura 7.1.3.4) privind aplicațiile de tip interfață creier-computer bazate pe utilizarea tehnicilor specializate (biopotențiale evocate P300 sau clasificarea clipirilor oculare voluntare pe baza modelelor de rețele neuronale artificiale), la care au participat 42 studenți de la Tehnologia Informației, s-au desfășurat în luna Aprilie, anul 2024. În plus, pe parcursul stagiului doctoral, între anii 2017 – 2024, aplicațiile BCI dezvoltate de doctorandă au fost experimentate inclusiv de ceilalți 7 subiecți, care au inclus persoane din familia ei, având vârste de aproximativ 58 – 59 ani, respectiv 82 – 83 ani. Totodată, aplicațiile implementate și propuse în cadrul acestei teze de doctorat au fost inițial testate și experimentate de doctorandă.

7.1.2. Standurile EEG-HW-SW utilizate la experimentarea BCI

Descrierea standului experimental aferent aplicațiilor de tip interfață creier-computer

Standurile experimentale, pe care autoarea tezei l-a pus la dispoziția subiecților în cadrul întâlnirilor organizate la Universitate, au inclus următoarele sisteme hardware și software:

- 6 laptop-uri cu performanțe acceptabile (Windows 7/8.1/10 Home/Professional 64-Bit, Procesor Intel Core i5/i7/i9, 8/16/32 GB RAM, 512 SSD sau 1 TB Hard Disk);
- 6 căști portabile cu un singur senzor EEG (diverse versiuni: Mindwave, Mindwave Mobile, Force Trainer) bazate pe tehnologia NeuroSky, având chip integrat ThinkGear;
- 2 căști portabile Emotiv Insight cu 5 senzori EEG;
- O cască GTEC Unicorn cu 8 senzori EEG;
- 10 sisteme mecatronice - prototipuri experimentale: roboți mobili, braț robotizat, mână robotică, casă miniaturală, bazate pe componente mecanice și electronice (servomotoare, motoare de curent continuu, modul Bluetooth, driver de motoare, modul WiFi);
- 7 platforme de dezvoltare – Arduino (Uno, Nano 33 IoT, Mega, ESP8266), Raspberry Pi, NI myRIO, Micro:Bit;
- Tabletă Lenovo Yoga 10 – rularea aplicației Android pentru afișarea hologramelor cu Yoda;
- Telefon Inteligent Samsung – rularea aplicației Android pentru transmiterea mesajelor Chat;
- Aplicațiile/programele software bazate pe mediile/limbajele de programare LabVIEW, Python, Matlab, NodeRED, MIT App Inventor, Arduino.

7.1.3. Etapele preliminare experimentării BCI

Pregătirea preliminară a subiecților în vederea experimentării interfețelor creier-computer

Anterior efectuării sarcinilor de experimentare a aplicațiilor propuse de tip interfață creier-computer, subiecții au parcurs etapa preliminară destinată deopotrivă familiarizării cu modul de atașare, reglare, conectare, utilizare sau purtare a căștilor EEG NeuroSky, Emotiv Insight, respectiv GTEC Unicorn și deprinderii cu modalitatea de execuție a clipirilor oculare voluntare, respectiv tehnica concentrării atenției asupra simbolurilor luminoase pentru generarea biopotențialelor P300, considerate comenzi pentru controlul sistemelor mecatronice bazate pe platformele Arduino, Raspberry Pi, Micro:Bit, NI myRIO sau interacțiunea cu simulările virtuale bazate pe modelele 3D.

Prin urmare, autoarea tezei s-a implicat în coordonarea și îndrumarea subiecților astfel încât le-a arătat cum să fixeze fiecare cască portabilă astfel încât senzorii EEG să fie plasați corect în pozițiile corespunzătoare conform cu Sistemul Internațional 10-20, în vederea captării cu acuratețe ridicată a semnalului EEG raw (brut) generat atunci când se contractă mușchii oculari pentru efectuarea clipirii oculare sau a biopotențialelor evocate P300 transmise atunci când persoana își concentrează atenția și își orientează privirea asupra unui simbol luminos care apare cu o frecvență neregulată. Totodată, este importantă poziționarea corectă, la nivelul urechii, a elementelor care reprezintă referința sau masa pentru închiderea circuitului de măsurare a semnalului EEG. Componentele fixe din structura căștilor trebuie dispuse la nivelul craniului conform cu documentația oficială. Elementele flexibile, cuprinzând senzorii EEG, sunt ajustate în funcție de structura anatomică a craniului fiecărui subiect. De asemenea, majoritatea căștilor EEG portabile permit reglarea lor în funcție de dimensiunile circumferinței craniului.

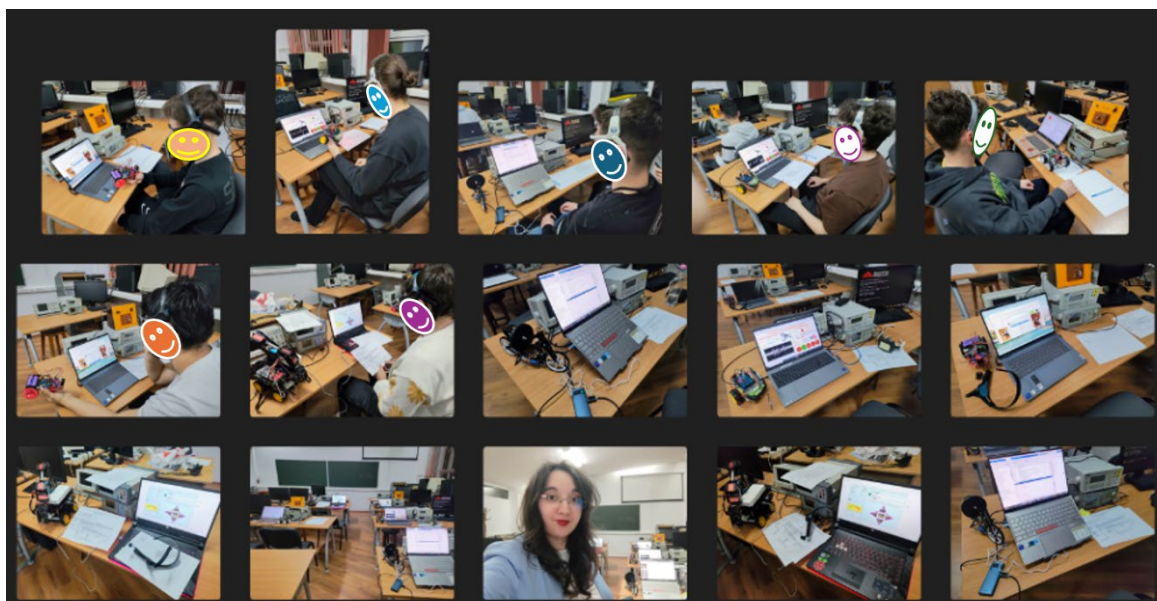


Figura 7.1.3.1. A treia sesiune experimentală organizată în Decembrie 2023, la care au participat studenții de la specializarea Calculatoare, Anul III, Facultatea IESC, UnitBV.

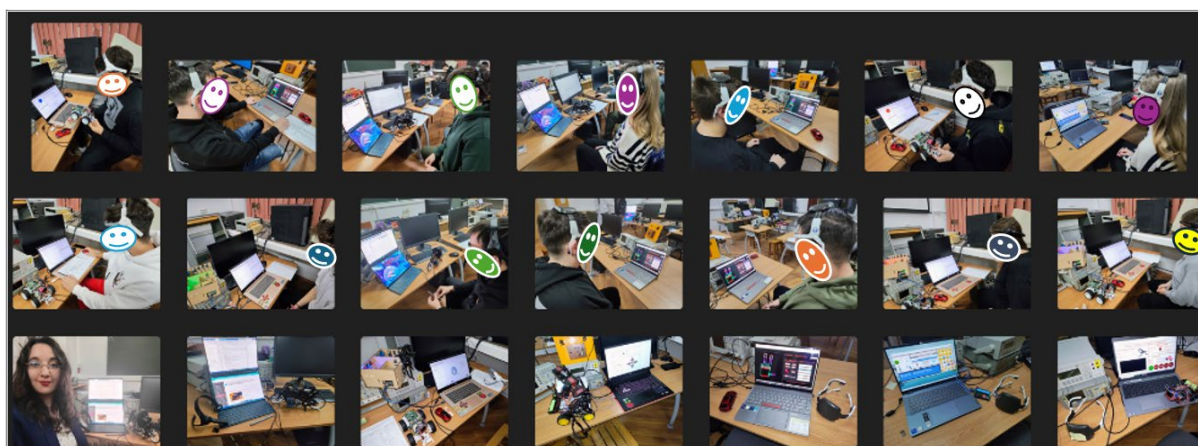


Figura 7.1.3.2. A patra sesiune experimentală organizată în Ianuarie 2024, la care au participat studenții de la specializarea Calculatoare, Anul III, Facultatea IESC, UnitBV.

Pe de altă parte, autoarea tezei și-a adus contribuția privind instruirea subiecților explicându-le, în mod clar și oferindu-le suplimentar o demonstrație practică, prezentată în timp real, prin includerea completă a tuturor etapelor de experimentare a aplicațiilor de tip interfață creier-computer. Inițial, doctoranda a parcurs, alături de studenți, etapele destinate conectării wireless dintre laptop și platformele de dezvoltare, respectiv conexiunii Bluetooth dintre laptop și cască. Astfel, exceptând rolul lor de subiecți, studenții au avut oportunitatea de a învăța noi aspecte generale privind interfațarea eficientă a acestor sisteme hardware. Ulterior, doctoranda le-a oferit subiecților sprijin să își atașeze și ajusteze casca pe cap, într-o poziție corespunzătoare. După aceea, doctoranda le-a explicat succint și le-a demonstrat practic subiecților pașii necesari lansării tuturor aplicațiilor software, rulate pe PC cu Windows 10 și pe Raspberry Pi cu Linux.

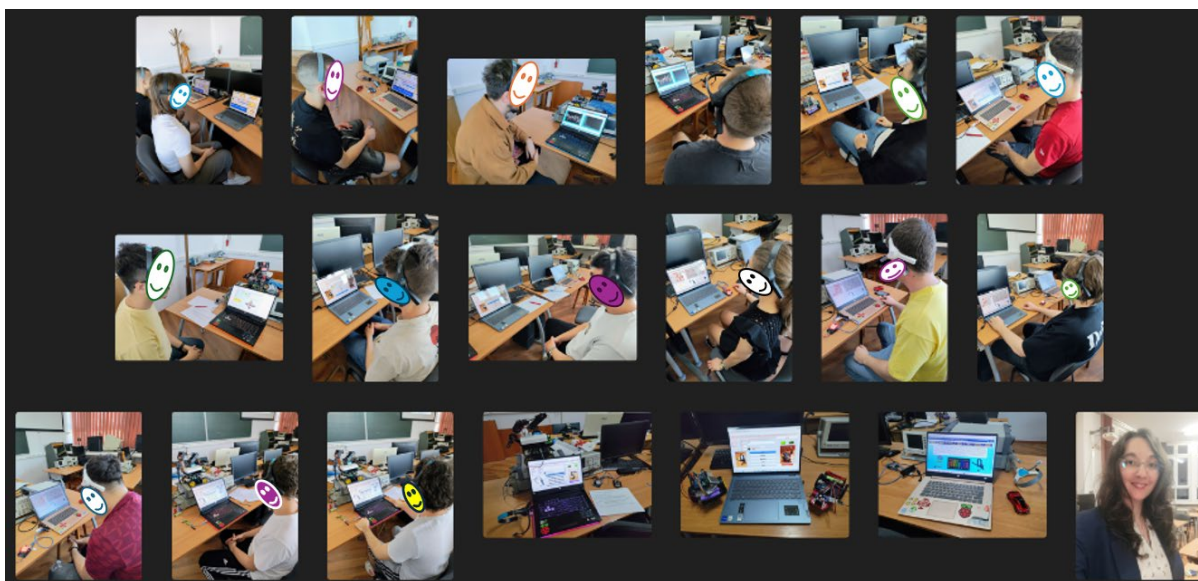


Figura 7.1.3.3. A cincea sesiune experimentală organizată în Aprilie 2024, la care au participat studenții de la specializarea Tehnologia Informației, Anul IV, Facultatea IESC, UnitBV.

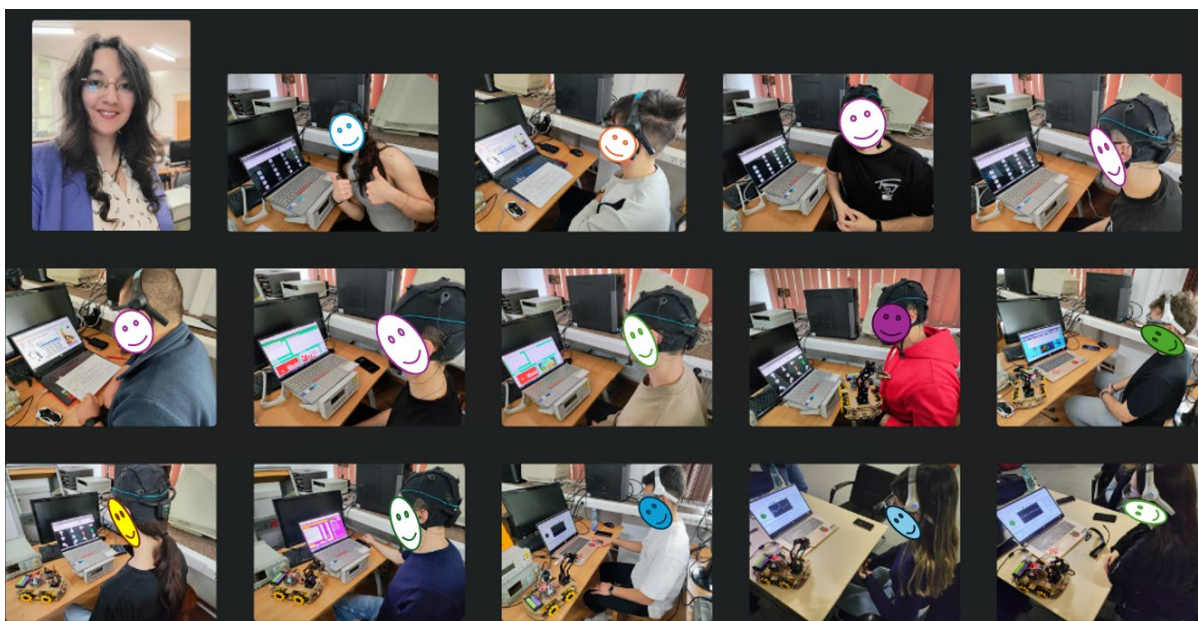


Figura 7.1.3.4. A șasea sesiune experimentală organizată în Aprilie 2024, la care au participat studenții de la specializarea Tehnologia Informației, Anul IV, Facultatea IESC, UnitBV.

De asemenea, doctoranda și studenții au verificat împreună faptul că s-a reușit cu succes comunicația Bluetooth dintre casca EEG și laptop, iar datele EEG au fost achiziționate în timp real, ceea ce este necesar pentru algoritmul de detectare a clipirilor oculare voluntare, respectiv de recunoaștere a biopotențialelor evocate P300. Prin urmare, inițial doctoranda a efectuat individual o secvență de comenzi pentru controlul prototipurilor experimentale propuse, iar ulterior autoarea tezei i-a asistat pe subiecți într-o sesiune de familiarizare privind execuția clipirilor oculare voluntare, respectiv generarea comenzilor bazate pe biopotențiale P300, ambele variante fiind însoțite de feedback vizual. Această sesiune de inițiere, aferentă utilizării aplicației de tip interfață

creier-computer, s-a desfășurat pe o durată de aproximativ 5 minute, scopul constând în inducerea încrederii în sine a subiecților, acomodarea lor cu purtarea căștii EEG NeuroSky, monitorizarea sistemelor controlate, deprinderea abilității de a efectua clipiri oculare voluntare, dobândirea capacității de concentrare a atenției și orientare a privirii pentru generarea biopotențialelor P300 și observarea modalității specifice de feedback vizual.

Prezentarea sarcinilor de lucru necesare experimentării interfețelor creier-computer

Autoarea tezei a creat fișe de experimentare (**ANEXE – Secțiunea 7.1.3**) cuprinzând informații esențiale privind sarcinile de lucru propuse, pe care le-a distribuit, le-a prezentat și le-a exemplificat subiecților. Prin urmare, în cazul experimentelor bazate pe utilizarea căștii EEG NeuroSky, fișa respectivă a inclus următoarele aspecte principale: descrierea celor două tipuri de clipiri oculare voluntare (puternice sau domoale), enumerarea și explicarea comenzilor individuale, și exemplificarea celor trei niveluri progresive (începător, intermediar, avansat) de parcurgere a secvențelor alcătuite din comenzi multiple.

Exemplificând, fișa de experimentare specifică în mod clar diferența dintre clipirea oculară voluntară puternică și clipirea oculară voluntară domoală prin îndeplinirea condiției determinate de comparația dintre intensitatea clipirii oculare efectuate de utilizator și intensitatea prag sau limita definită inherent în programul LabVIEW, Matlab sau Python, pe baza analizei semnalului EEG brut achiziționat de la senzorul căștii EEG NeuroSky. Dacă subiectul efectuează, în mod voluntar, o clipire oculară având o intensitate superioară valorii limită, atunci se consideră că subiectul a executat o clipire oculară voluntară puternică. Dacă subiectul a efectuat, în mod voluntar, o clipire oculară caracterizată printr-o intensitate inferioară valorii prag, înseamnă că el a realizat o clipire oculară voluntară domoală. Comenzile necesare aplicațiilor de tip interfață creier-computer pentru controlul prototipurilor experimentale, utilizând casca EEG NeuroSky, sunt reprezentate de clipiri oculare voluntare puternice, executate în mod succesiv.

OBSERVAȚIE: Intensitatea de prag sau valoarea limită s-a determinat în mod automat, fiind personalizată pentru fiecare subiect în parte. Prin urmare, s-a implementat o aplicație în mediul de programare grafică LabVIEW în vederea detectării unui număr total de 20 valori de intensitate a clipirii pe baza a 20 de execuții de tip clipire oculară voluntară puternică, de către fiecare subiect. Rolul programului LabVIEW a constat în generarea valorii aferente intensității de prag prin aplicarea unei formule de calcul matematic, bazate pe determinarea mediei aritmetice și a deviației standard a celor 20 de valori, stocate într-un vector numeric.

7.1.5. Etapele de experimentare și parametrii de performanță BCI

Etapele de experimentare BCI utilizând clipirile oculare voluntare

Aplicații BCI pentru controlul sistemelor robotice - Robot Mobil (Arduino, Rapsberry, NI myRIO) și Motocicletă Miniaturală – prin numărarea clipirilor oculare voluntare

Această secțiune descrie etapele (comenzile propuse, modalitatea de cuantificare a clipirilor oculare voluntare, calculul mărimilor de evaluare a performanței în utilizare a interfeței creier-computer) parcurse la experimentarea aplicației BCI pentru controlul robotului mobil bazat pe

Arduino Uno, utilizând casca EEG NeuroSky Mindwave. Particularitatea acestei aplicații BCI constă în determinarea amplitudinii clipirii oculare prin aplicarea tehnicilor bazate pe Logică Fuzzy. Toate informațiile prezentate în următoarele secțiuni sunt valabile inclusiv la experimentarea aplicației BCI pentru controlul robotului mobil comandat cu ajutorul clipirilor oculare voluntare, utilizând sistemul NI myRIO și casca EEG NeuroSky. Mai mult decât atât, etapele descrise se aplică inclusiv la experimentarea aplicației BCI pentru controlul robotului mobil comandat prin implementarea unui algoritm personalizat de detectare și numărare a clipirilor oculare voluntare, utilizând sistemul Raspberry Pi și casca EEG NeuroSky Mindwave. De asemenea, aceleași etape și un algoritm similar de evaluare a performanței în utilizare, dar considerând un număr diferit de comenzi, se aplică la experimentarea aplicației BCI pentru controlul deplasării motocicletei miniaturale, utilizând platforma Arduino 33 IoT și casca EEG NeuroSky Mindwave.

Cel dintâi aspect semnificativ, specificat în fișa de experimentare, se referă la prezentarea condițiilor privind efectuarea unei clipiri oculare voluntare puternice, respectiv unei clipiri oculare voluntare domoale. Prin urmare, îndeplinirea condiției *Amplitudinea detectată a Clipirii Oculare > Intensitatea de Prag a Clipirii Oculare (inițială stabilită)* semnifică o clipire oculară voluntară puternică. De altfel, îndeplinirea condiției alternative *Amplitudinea detectată a Clipirii Oculare < Intensitatea de Prag a Clipirii Oculare (inițială stabilită)* semnifică o clipire oculară voluntară domoală. Modalitățile prin care utilizatorul poate efectua o clipire oculară voluntară puternică sunt următoarele: mișcarea energică, bruscă și rapidă a pleoapelor sau contracția cu o forță mai ridicată a mușchilor de la nivelul globilor oculari. Modalitățile prin care utilizatorul poate efectua o clipire oculară voluntară domoală sunt următoarele: mișcarea lentă, ușoară și delicată a pleoapelor sau orientarea privirii în altă direcție, ori o anumită distragere a atenției.

Intensitatea de prag pentru detectarea unei clipiri oculare voluntare puternice sau domoale este caracteristică, personalizată pentru fiecare utilizator și este setată în mod automat prin rularea unui program LabVIEW. Intensitatea de prag este variabilă în funcție de capacitatea individuală, preferința proprie, obișnuința naturală a utilizatorului de clipi mai puternice sau mai domole, ceea ce se corelează, totodată, cu starea psihologică (emoții, liniște interioară, agitație, alertă, siguranță, relaxare), momentul zilei (dimineața, seara), sau nivelul de oboseală energie.

O observație importantă din fișa de experimentare, care completează informațiile din Tabelul 7.1.5.1 și Tabelul 7.1.5.2, privind descrierea comenzilor individuale, este: pentru transmiterea comenzii, după execuția numărului de clipiri oculare puternice, se va efectua suplimentar o clipire oculară voluntară domoală. Prin urmare, pentru descrierea etapelor de experimentare din următoarele secțiuni, se va considera această observație și pentru simplitate, se preferă utilizarea termenului *clipire oculară voluntară*, renunțându-se la cuvântul suplimentar *puternică*.

Exemplificând, fișa de experimentare cuprinde Tabelul 7.1.5.1 în care sunt enumerate și prezentate cele 5 comenzi individuale (stop, înainte, înapoi, stânga, dreapta). Prima comandă (stop sau oprirea deplasării) presupune execuția unei singure clipiri oculare voluntare. Cea de-a doua comandă (deplasare pe direcția înainte) se referă la execuția a două clipiri oculare voluntare succesive. Continuând, a treia comandă (deplasare pe direcția înapoi) este echivalentă cu efectuarea a trei clipiri oculare voluntare succesive. Pentru cea de-a patra comandă (virare la stânga) sunt necesare patru clipiri oculare voluntare. Cea de-a cincea comandă (virare la dreapta) a fost

determinată de execuția a cinci clipiri oculare succesive. Prin urmare, este necesar ca subiectul să încerce să execute fiecare dintre cele 5 comenzi iar ulterior, completând rezultatele în tabel cu: OK, în cazul în care subiectul a reușit să efectueze corect numărul clipiri și NOK, dacă utilizatorul nu a generat comanda prin execuția numărului aferent de clipiri.

Tabel 7.1.5.1 Descrierea comenzilor necesare la experimentarea aplicațiilor de tip interfață creier-computer bazate pe numărarea clipirilor oculare voluntare pentru controlul sistemelor robotice.

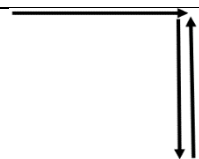
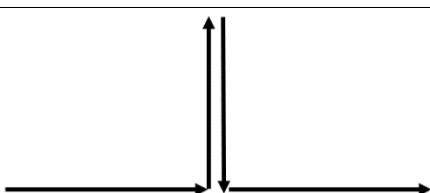
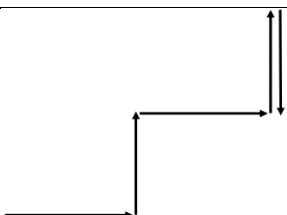
COMENZI INDIVIDUALE	DESCRIERE
STOP	1 clipire oculară voluntară
Deplasare – ÎNAINTE	2 clipiri oculare voluntare
Deplasare – ÎNAPOI	3 clipiri oculare voluntare
Virare la – STÂNGA	4 clipiri oculare voluntare
Virare la – DREAPTA	5 clipiri oculare voluntare

Exemplificând, fișa de experimentare prezintă Tabelul 7.1.5.2, unde sunt dispuse cele trei niveluri – Începător, intermediar, avansat – iar pentru fiecare, se specifică numărul de comenzi (6, 9, 13) și este descrisă secvența aferentă de comenzi multiple. Prin parcurgerea nivelului Începător, subiectului i se solicită să execute corect, în ordinea stabilită, următoarea secvență alcătuită din 6 comenzi de control a robotului mobil pe diferite direcții de deplasare: Înainte, Stop, Dreapta, Înainte, Stop, Înapoi. Continuând, prin parcurgerea nivelului Intermediar, este necesar ca subiectul să execute corect, în ordinea dată, următoarea secvență alcătuită din 9 comenzi de control a robotului mobil pe diferite direcții de deplasare: Înainte, Stop, Stânga, Înainte, Stop, Înapoi, Stânga, Înainte, Stop. În final, prin parcurgerea nivelului Avansat, subiectul are ca sarcină transmiterea următoarelor 13 comenzi privind controlul robotului mobil pe diferite direcții de deplasare, precum: Înainte, Stop, Stânga, Înainte, Stop, Dreapta, Înainte, Stop, Stânga, Înainte, Stop, Înapoi, Stop.

Tabel 7.1.5.2 Prezentarea nivelurilor de dificultate pentru experimentarea interfeței creier-computer.

NIVEL	NUMĂR COMENZI	SECVENȚĂ DE COMENZI MULTIPLE
ÎNCEPĂTOR	6	Înainte – Stop – Dreapta – Înainte – Stop – Înapoi
INTEREDIAR	9	Înainte – Stop – Stânga – Înainte – Stop – Înapoi – Stânga – Înainte – Stop
AVANSAT	13	Înainte – Stop – Stânga – Înainte – Stop – Dreapta – Înainte – Stop – Stânga – Înainte – Stop – Înapoi – Stop

Tabel 7.1.5.3 Traseele aferente direcțiilor de deplasare a robotului mobil conform secvenței de comenzi.

ÎNCEPĂTOR	INTEREDIAR	AVANSAT
		

Totodată, referitor la cele trei niveluri de experimentare – începător, intermediar, avansat – a interfețelor creier-computer propuse, fișa de experimentare ilustrează Tabelul 7.1.5.3 cu traseele schematice, bazate pe secvențele aferente comenzilor multiple determinate de direcțiile de deplasare anterior menționate.

În ceea ce privește completarea rezultatelor pe fișa experimentală, subiectul scrie numărul de comenzi corect detectate de interfața creier-computer, conform intenției sale și sarcinilor incluse de fiecare nivel de dificultate (începător, intermediar, avansat). De asemenea, un aspect esențial privind experimentarea aplicațiilor propuse pentru controlul sistemelor mecatronice constă în faptul că subiectul a avut posibilitatea de executa anumite secvențe de comenzi în mod repetat, rezultând maximum 3 încercări pentru fiecare nivel. Dacă subiectul obține performanță maximă, parcurgând corect toate cele 9 comenzi după prima încercare de transmitere a secvenței aferente nivelului intermediar, atunci subiectul va continua cu execuția comenzilor aferente ultimului nivel – avansat. De altfel, dacă subiectul nu obține performanță maximă după prima încercare, atunci i se oferă posibilitatea să repete întreaga secvență de comenzi, iar în tabel se va specifica atât faptul că au existat 2 încercări de execuție pentru nivelul respectiv, cât și numărul de comenzi corect detectate la încercarea cu performanța superioară. În funcție de propria preferință, subiectul poate efectua maximum 3 încercări pentru parcurgerea comenzilor aferente fiecărui nivel de dificultate.

Parametrii principali măsurați în timpul experimentării aplicațiilor de tip interfață creier-computer

În timpul experimentării aplicațiilor propuse de tip interfață creier-computer pentru controlul sistemelor mecatronice și simulărilor virtuale bazate pe modele 3D cu ajutorul căștii EEG NeuroSky, subiecții au fost monitorizați astfel că s-au determinat numărul de clipiri oculare, executate în mod voluntar, conform cu sarcinile de lucru specificate în fișa primită pentru fiecare nivel de dificultate. Așa cum se arată în Figura 7.1.5.1, inițial s-a definit numărul optim de clipiri oculare voluntare succesive necesare a fi executate pentru a îndeplini fiecare comandă de control a prototipului experimental hardware sau modelului 3D, conform secvenței aferente fiecărui nivel – începător, intermediar și avansat. De asemenea, s-a considerat inclusiv numărul optim de non-clipiri, care reprezintă absența clipirilor oculare voluntare, suplimentare celor solicitate, astfel încât să se evite transmiterea eronată a comenzilor de control pentru sistemele fizice sau virtuale.

Prin determinarea a numărului de clipiri oculare voluntare efectuate în mod corect (în realitate) sau eronat, de către fiecare subiect, în funcție de sarcina de lucru din fișa de experimentare, s-a generat numărul de cazuri adevărat-pozitive TP (true-positive), adevărat-negativ TN (true-negative), fals-pozitive FP (false-positive), respectiv fals-negativ FN (false-negative). După aceea, pe baza valorilor aferente cazurilor TP – TN – FP – FN, s-au calculat mărimile – sensibilitatea, specificitatea, acuratețea, precizia – necesare la evaluarea eficacității și performanței aplicației de tip interfață creier-computer. Tabelul 7.1.5.4 descrie în mod detaliat cazurile TP – TN – FP – FN, iar tabelul 7.1.5.5. prezintă formulele matematice pentru calculul acestor mărimi.

Figura 7.1.5.1. Determinarea numărului optim de clipiri oculare voluntare succesive și numărului optim de non-clipiri necesare parcurgerii secvențelor de comenzi multiple aferente fiecărui nivel de dificultate.

Tabel 7.1.5.5 Prezentarea formulelor matematice aferente mărimilor calculate pentru evaluarea aplicațiilor de tip interfață creier-computer.

Mărimea	Formula matematică	Descriere
Sensibilitatea	$\frac{TP}{TP + FN}$	Sensibilitatea determină proporția clipirilor oculare voluntare corect identificate de aplicația BCI. Sensibilitatea aplicației BCI se va mări dacă se va reduce numărul cazurilor FN.
Specificitatea	$\frac{TN}{TN + FP}$	Specificitatea determină proporția non-clipirilor corect identificate de aplicația BCI
Precizia	$\frac{TP}{TP + FP}$	Precizia măsoară capacitatea aplicației BCI de a clasifica în mod corect clipirile oculare voluntare. Precizia aplicației BCI se va mări dacă se va reduce numărul cazurilor FP.
Acuratețea	$\frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$	Acuratețea determină corectitudinea integrală a rezultatelor returnate de aplicația BCI.

Calculul cazurilor TP – TN – FP – FN pentru determinarea mărimilor Sensibilitatea-Specificitatea-Precizia-Acuratețea privind evaluarea performanței în utilizare a interfețelor creier-computer

Exemplificând, se consideră că un subiect voluntar, participant la experimentarea interfeței creier-computer pentru controlul robotului mobil prin comenzile bazate pe clipirile oculare voluntare, a obținut următoarele rezultate:

- Nivel începător (cuprinzând numărul total de 6 comenzi):
 - o 4 comenzi reușite și 2 comenzi eșuate la prima încercare;
 - o 6 comenzi reușite la a doua încercare;
- Nivel intermediar (cuprinzând numărul total de 9 comenzi):
 - o 5 comenzi reușite și 4 comenzi eșuate la prima încercare;
 - o 6 comenzi reușite și 3 comenzi eșuate la a doua încercare;
 - o 7 comenzi reușite și 2 comenzi eșuate la a treia încercare;
- Nivel avansat (cuprinzând numărul total de 13 comenzi):
 - o 7 comenzi reușite și 6 comenzi eșuate la prima încercare;
 - o 9 comenzi reușite și 4 comenzi eșuate la a doua încercare;
 - o 11 comenzi reușite și 2 comenzi eșuate la a treia încercare.

Având în vedere informațiile din tabelul ilustrat în Figura 7.1.5.1, se va calcula numărul optim al cazurilor adevărat-pozitive (TP) și adevărat negative (TN), aplicând formula matematică:

Suma Cazurilor TP (Optime) = *Nr. Clipiri pt. Nivel Începător x Nr. Încercări pt. Nivel Începător + Nr. Clipiri pt. Nivel Intermediar x Nr. Încercări pt. Nivel Intermediar + Nr. Clipiri pt. Nivel Avansat x Nr. Încercări pt. Nivel Avansat* = $14 \times 2 + 20 \times 3 + 29 \times 3 = 175$ clipiri voluntare, corect detectate.

Suma Cazurilor TN (Optime) = *Nr. NonClipiri pt. Nivel Începător x Nr. Încercări pt. Nivel Începător + Nr. NonClipiri pt. Nivel Intermediar x Nr. Încercări pt. Nivel Intermediar + Nr. NonClipiri pt. Nivel Avansat x Nr. Încercări pt. Nivel Avansat* = $6 \times 2 + 9 \times 3 + 13 \times 3 = 78$ non-clipiri oculare voluntare, corect detectate.

Pentru obținerea cazurilor fals-pozitive (FP) și fals-negative (FN), se va determina numărul total al comenzilor eșuate pentru fiecare nivel de dificultate, efectuat de subiect la experiment:

- Nivel începător: 2 comenzi eșuate
- Nivel intermediar: 9 comenzi eșuate
- Nivel avansat: 12 comenzi eșuate

Prin monitorizarea subiectului, se poate observa faptul că execuția unei comenzi a eșuat din două posibile cauze:

- În realitate, subiectul nu a executat o clipire oculară voluntară (puternică), însă interfața creier-computer a detectat, în mod eronat, clipirea respectivă.
 - o În această situație, va crește numărul cazurilor false-pozitive (FP).
- În realitate, subiectul a executat o clipire oculară voluntară (puternică), însă interfața creier-computer nu a detectat, în mod incorect, clipirea respectivă.
 - o În această situație, se va mări numărul cazurilor false-negative (FN).

Prin urmare, se vor aplica următoarele formule matematice pentru calculul cazurilor FP și FN, în funcție de cele două cauze enunțate mai sus:

- ❖ Suma Cazurilor FP = *Nr. Clipiri pt. Comenzi Eșuate la Nivel Începător* + *Nr. Clipiri pt. Comenzi Eșuate la Nivel Intermediar* + *Nr. Clipiri pt. Comenzi Eșuate la Nivel Avansat*.
- ❖ Suma Cazurilor FN = *Nr. NonClipiri pt. Comenzi Eșuate la Nivel Începător* + *Nr. NonClipiri pt. Comenzi Eșuate la Nivel Intermediar* + *Nr. NonClipiri pt. Comenzi Eșuate la Nivel Avansat*.

Prin urmare, este necesar să se specifice comenzile eșuate pentru fiecare nivel:

- Începător: Forward/Înainte, Backward/Înapoi;
- Intermediar: Left, Forward, Backward, Left, Stop, Left/Stânga, Forward, Stop, Backward;
- Avansat: Forward, Stop, Left, Right/Dreapta, Forward, Backward, Stop, Left, Forward, Stop, Left, Backward.

Aplicând formulele matematice de mai sus, în funcție de cele două cauze care au determinat, în practică, comenzile eșuate, rezultă suma cazurilor FP și FN:

- ❖ Suma Cazurilor FP = 2 (pt. Nivel Începător) + 4 + 3 + 4 + 2 + 1 (pt. Nivel Intermediar) + 4 + 5 + 2 + 1 + 2 + 1 + 4 (pt. Nivel Avansat) = 35
- ❖ Suma Cazurilor FN = 1 (pt. Nivel Începător) + 1 + 1 + 1 + 1 (pt. Nivel Intermediar) + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 (pt. Nivel Avansat) = 10

În final, se vor actualiza numărul cazurilor TP și TN, din care se vor scădea cazurile FP și FN:

Suma Cazurilor TP = Suma Cazurilor TP (Optime) – Suma Cazurilor FP = 175 – 35 = 140

Suma Cazurilor TN = Suma Cazurilor TN (Optime) – Suma Cazurilor FN = 78 – 10 = 68

Prin urmare, au rezultat următoarele valori: TP = 140; FP = 35; TN = 68; FN = 10.

Prin aplicarea formulelor matematice din Tabelul 7.1.5.5, se calculează cele patru mărimi de evaluare privind performanța în utilizare a unei interfețe creier-computer:

- ❖ Sensibilitatea: $\frac{TP}{TP+FN} = \frac{140}{140+10} = 0,93 = 93\%$
- ❖ Specificitatea: $\frac{TN}{TN+FP} = \frac{68}{68+35} = 0,66 = 66\%$
- ❖ Precizia: $\frac{TP}{TP+FP} = \frac{140}{140+35} = 0,80 = 80\%$
- ❖ Acuratețea: $\frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} = \frac{140+68}{140+68+35+10} = 0,82 = 82\%$

Prin urmare, la evaluarea tuturor aplicațiilor originale de tip interfață creier-computer, dezvoltate și experimentate în cadrul acestei teze de doctorat, s-a considerat algoritmul de calcul descris mai sus pentru identificarea numărului de cazuri TP – FP – TN – FN și determinarea mărimilor aferente (sensibilitatea, specificitatea, precizia) fiecăruia dintre cei 129 de subiecți.

Etaple descrise mai sus privind definirea secvențelor de comenzi aferente celor trei niveluri de dificultate (începător, intermediar, avansat), respectiv algoritmul de calcul al mărimilor Sensibilitatea – Specificitatea – Precizia – Acuratețea pentru evaluarea performanței interfețelor creier-computer, pe baza determinării numărului de cazuri TP – TN – FP – FN, se aplică în mod similar la experimentarea celorlalte aplicații implementate de doctorandă în vederea controlului următoarelor sisteme robotice: roboți mobili, braț robotic, mână robotică (prototip real și model virtual), motocicletă miniaturală. Totuși, singurele diferențe sunt reprezentate de numărul, ordinea și tipul comenzilor (deplasare sau poziționare) stabilite pentru fiecare nivel de dificultate.

arătător, și mic. Exemplificând pentru nivelul avansat, comanda generală, bazată pe ridicarea/extensia degetelor mare, arătător și mic, se realizează prin efectuarea a două comenzi secundare: contracția degetului mijlociu și flexia degetului inelar.

Determinarea cazurilor TP – TN – FP – FN la experimentarea controlului mâinii robotice

Numărul optim de clipiri oculare voluntare reprezentând cazurile adevărat-pozitive (true-positive), conform Tabelului din Figura 7.1.5.2, rezultă prin aplicarea următoarei formule matematice pentru fiecare nivel de dificultate (începător, intermediar, avansat):

Număr Clipiri (Cazuri True-Positive) = Suma Comenzi Secundare x 2 Clipiri (Selecții) + Suma Comenzi Generale x 4 Clipiri (Tranziții).

În ceea ce privește numărul optim de non-clipiri reprezentând cazurile adevărat-negative (true-negative), conform tabelului din Figura 7.1.5.2, se aplică următorul calcul: pentru prima comandă generală – închiderea mâinii – prin execuția celor 4 comenzi secundare de contracție a celor 4 degete, aferente nivelului începător, după efectuarea fiecăreia dintre cele 4 selecții, utilizatorul nu trebuie să mai clipească, astfel rezultând 4 non-clipiri, iar după efectuarea fiecăreia dintre cele 4 tranziții, utilizatorul nu va mai clipi, astfel fiind contorizate încă 4 non-clipiri. Un calcul similar se aplică pentru celelalte comenzi, conform formulei matematice:

Număr Non-Clipiri (Cazuri True-Negative) = Suma Clipirilor (Tranziții) + Suma Clipirilor (Selecții)/2.

Totodată, se consideră următoarele condiții: pentru selecția unei comenzi (flexia sau extensia unui deget) se execută două clipiri oculare voluntare, iar tranziția/deplasarea printre opțiuni/comenzi, se realizează prin efectuarea unei singure clipiri oculare voluntare. Numărul de clipiri executate în vederea tranziției depinde de poziționarea, respectiv distanța dintre butoanele situate în interfața grafică a aplicației BCI dezvoltate în LabVIEW.

Numărul cazurilor FP (fals-pozitive) crește atunci când utilizatorul selectează, în mod eronat, neintenționat, o comandă de flexie/extensie a unui deget, diferită de sarcina primită sau scopul inițial stabilit. Totodată, din numărul cazurilor TP, se scad 2 clipiri (aferente unei selecții) x numărul de comenzi eronate.

Numărul cazurilor FN (fals-negative) crește atunci când utilizatorul omite, în mod nedorit, greșit, să selecteze o anumită comandă de flexie/extensie a unui deget, ceea ce nu coincide cu sarcina primită sau scopul inițial stabilit. Astfel, din numărul cazurilor TN, se scade 1 clipire (aferentă unei tranziții) x numărul de comenzi omise în mod eronat.



Figura 7.1.5.3. Pozițiile intermediare care constituie comenzile necesare la experimentarea aplicației BCI pentru controlul mâinii robotice utilizând casca EEG NeuroSky și Arduino.

Figura 7.1.5.3 și Figura 7.1.5.4 prezintă atât degetele robotice reale/virtuale, cât și gesturile obținute sau poziționarea mâinii prin îndeplinirea comenzilor bazate pe clipirile oculare voluntare.

În mod similar, are loc stabilirea comenzilor, respectiv numărarea clipirilor oculare voluntare, în funcție de nivelul de dificultate, la experimentarea aplicației BCI pentru controlul mâinii robotice 3D, considerând o singură diferență: nivelul începător cuprinde 10 comenzi secundare: 5 contracții/flexii pentru închiderea mâinii (degetul mare este mobil la modelul 3D) și 5 extensii pentru deschiderea mâinii. Exemplificând, pentru prima comandă generală de la nivelul intermediar, referitoare la extensia degetelor mare (mobil) și arătător, respectiv flexia celorlalte trei degete, se execută 3 comenzi de selecție echivalente cu 3 x 2 clipiri oculare voluntare, respectiv 4 comenzi de tranziție, aferente celor 4 degete printre care se face trecerea/deplasarea.

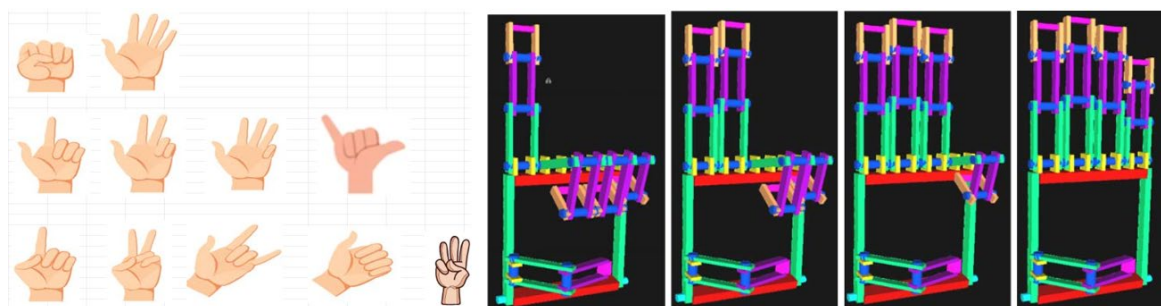


Figura 7.1.5.4. Pozițiile intermediare care constituie comenzile necesare la experimentarea aplicației BCI pentru controlul mâinii robotice 3D utilizând casca EEG NeuroSky.

Aplicații BCI pentru controlul sistemelor de comunicare – tastatura virtuală – prin metoda Divide et Impera utilizând clipirile oculare voluntare

Comenzile implementate în aplicația LabVIEW de tip interfață creier-computer, bazată pe metoda Divide et Impera pentru facilitarea comunicării prin transferul mesajelor cu ajutorul unei tastaturi virtuale, utilizând clipirile oculare voluntare, sunt descrise în Tabelul 7.1.5.7.

Tabel 7.1.5.7 Descrierea comenzilor necesare la experimentarea aplicațiilor de tip interfață creier-computer bazate pe metoda Divide et Impera cu ajutorul clipirilor oculare voluntare.

COMENZI INDIVIDUALE	DESCRIERE
TRANZIȚIA printre rânduri, jumătăți/porțiuni de rând, respectiv taste	1 clipire oculară voluntară
SELECȚIA unui rând, a unei jumătăți de rând, a unei taste	2 clipiri oculare voluntare
ANULAREA selecției unui rând, unei jumătăți de rând, unei taste	3 clipiri oculare voluntare
ȘTERGEREA ultimului caracter introdus	4 clipiri oculare voluntare
SPAȚIU – introducerea unui caracter de tip spațiu	5 clipiri oculare voluntare.

Experimentarea aplicației BCI pentru comunicare, utilizând tastatura virtuală, s-a realizat prin îndeplinirea următoarelor trei sarcini, bazate pe introducerea următoarelor trei cuvinte: EYE, BRAIN și COMPUTER. Figurile 7.1.5.6, 7.1.5.7, 7.1.5.8 și 7.1.5.9 prezintă numărul optim de clipiri oculare voluntare pe care un subiect ar trebui să le execute în mod ideal astfel încât să redacteze eficient fiecare dintre cele trei cuvinte solicitate, anterior menționate, având în vedere dispunerea tuturor caracterelor necesare la nivelul tastaturii virtuale din interfața grafică utilizator – Figura 7.1.5.5.

Informații, explicații și detalii suplimentare, privind determinarea numărului de clipiri pentru fiecare cuvânt, se regăsesc la **ANEXE – Secțiunea 7.1.5**.

Numărul total al clipirilor oculare voluntare, corect detectate de aplicația LabVIEW BCI pentru comunicare, constituie suma tuturor cazurilor adevărat-pozitive (TP), iar numărul total al non-clipirilor, corect identificate de instrumentul LabVIEW pentru controlul tastaturii virtuale, reprezintă suma tuturor cazurilor adevărat-negative (TN).

De altfel, clipirile oculare voluntare nedetectate, în mod eronat de aplicația LabVIEW, determină suma cazurilor fals-negative (FN), care se incrementează atunci când utilizatorul efectuează clipiri pentru tranziții sau selecții, însă acestea nu sunt recunoscute, iar la nivelul tastaturii virtuale nu se observă acțiunile respective. Suma cazurilor FN se incrementează atunci când amplitudinea de prag pentru detectarea clipirilor oculare voluntare prezintă o valoare foarte ridicată, pe care utilizatorul nu o poate obține la experimentarea reală.

Totodată, evenimentele de tip non-clipire (artefacte musculare, vibrații, zgomote), incorect identificate drept clipiri oculare voluntare, la nivelul aplicației LabVIEW, determină suma cazurilor fals-pozitive (FP), care se incrementează atunci când utilizatorul nu efectuează în mod intenționat clipiri în scopul realizării tranzițiilor sau selecțiilor, cu toate că la nivelul tastaturii virtuale, în mod eronat, se observă acțiunile aferente. Suma cazurilor FP se incrementează atunci când amplitudinea de prag pentru detectarea clipirilor oculare voluntare prezintă o valoare foarte scăzută, pe care utilizatorul o depășește în mod neintenționat la experimentarea reală.

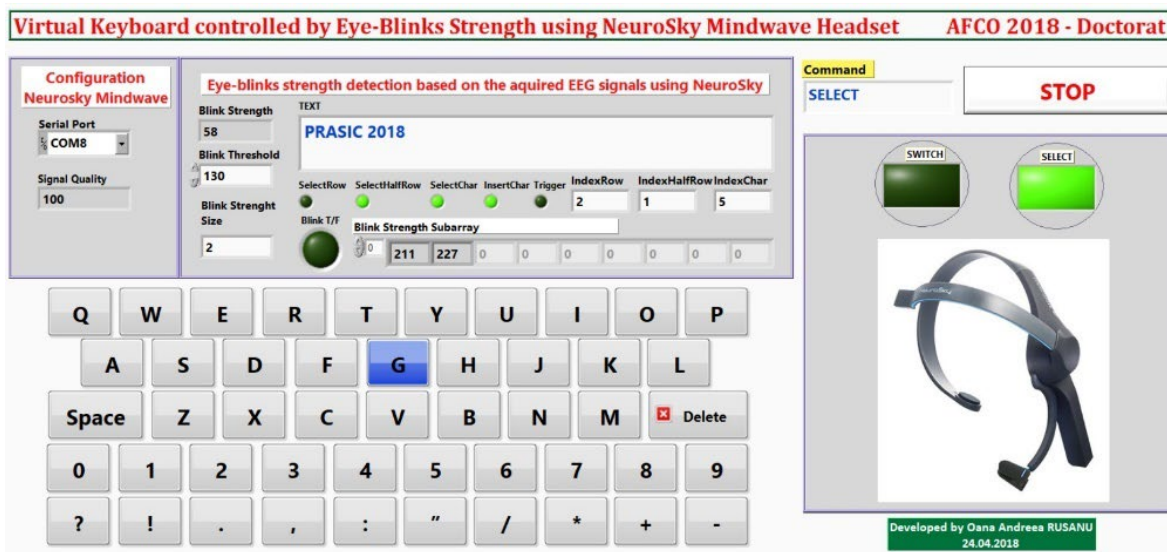


Figura 7.1.5.5. Panoul Frontal (Interfața Grafică Utilizator) al aplicației LabVIEW pentru controlul tastaturii virtuale utilizând clipirile oculare voluntare detectate la nivelul semnalului EEG de la casca NeuroSky.

EYE	2 clipiri selectie rand 1	3 clipiri - CANCEL	3 clipiri - CANCEL	1+1+1+1 clipiri - SPACE - introducere caracter spatiu	
	2 clipiri selectie prima jumătate	2 clipiri selectie rand	2 clipiri selectie rand		
	1+1 clipiri tranziție pana la E	1 clipire - switch jumătatea a 2-a	1 clipire - tranziție la prima jumătate		
	2 clipiri selectie E	2 clipiri selectie a doua jumătate	2 clipiri selectie prima jumătate		
		2 clipiri selectie Y	1+1 clipiri tranziție la E		
			2 clipiri selectie E		
	total: 4 non-clipiri	total: 5 non-clipiri	total: 6 non-clipiri	total: 1 non-clipire	TOTAL: 16 non-clipiri
	total: 8 clipiri - Caracter E	total: 10 clipiri - Caracter Y	total: 12 clipiri - Caracter E	total: 4 clipiri - Caracter Space	
TOTAL: 8 + 10 + 12 + 4 = 34 clipiri pt. EYE					

Figura 7.1.5.6 Redactarea cuvântului EYE la nivelul tastaturii virtuale utilizând clipirile oculare voluntare.

COMPUTER	3 clipiri - CANCEL actiune anterioara	3 clipiri - CANCEL/anulare rand 3	3 clipiri - CANCEL/anulare rand 1	3 clipiri - CANCEL/anulare rand 3	3 clipiri - CANCEL/anulare actiune anterioara
	2 clipiri - selectie rand 3	1+1+1 clipiri - tranzitie/revenire la rand 1	1+1 clipiri - tranzitie la rand 3	1+1 clipiri - tranzitie la rand 1	2 clipiri - selectie rand 1
	1 clipiri - tranzitie la prima jumătate	2 clipiri - selectie rand 1	2 clipiri - selectie rand 3	2 clipiri - selectie rand 1	1+1 clipiri - tranzitie la caracter U
	2 clipiri - selectie prima jumătate	1 clipiri - tranzitie la a doua jumătate	1 clipiri - tranzitie la a doua jumătate	1 clipiri - tranzitie la a doua jumătate	2 clipiri - selectie caracter U
	1+1 clipiri - tranzitie la caracter C	2 clipiri - selectie a doua jumătate	1+1 clipiri - tranzitie la caracter M	1+1+1 clipiri - tranzitie la caracter P	
	2 clipiri - selectie caracter C	1+1+1 clipiri - tranzitie la caracter O	2 clipiri - selectie caracter M	2 clipiri - selectie caracter P	
		2 clipiri - selectie caracter O			
	total: 6 non-clipiri	total: 7 non-clipiri	total: 6 non-clipiri	total: 6 non-clipiri	total: 4 non-clipiri
	total: 12 clipiri - Caracter C	total: 17 clipiri - Caracter O	total: 12 clipiri - Caracter M	total: 15 clipiri - Caracter P	total: 9 clipiri - Caracter U
				TOTAL: 12 + 17 + 12 + 15 + 9 + 14 + 10 + 8 = 97 clipiri pt. COMPUTER	

3 clipiri - CANCEL/anulare actiune anterioara	3 clipiri - CANCEL/anulare actiune anterioara	3 clipiri - CANCEL/anulare actiune anterioara	
2 clipiri - selectie rand 1	2 clipiri - selectie rand 1	2 clipiri - selectie rand 1	
1 clipire - tranzitie la prima jumatate	1+1+1 - tranzitie la caracter E	1 clipire - tranzitie la caracter R	
2 clipiri - selectie prima jumatate	2 clipiri - selectie caracter E	2 clipiri - selectie caracter R	
1+1+1+1 clipiri - tranzitie la caracter T			
2 clipiri - selectie caracter T			
total: 6 non-clipiri	total: 4 non-clipiri	total: 4 non-clipiri	TOTAL: 43 non-clipiri
total: 14 clipiri - Caracter T	total: 10 clipiri - Caracter E	total: 8 clipiri - Caracter R	

Figura 7.1.5.10 prezintă, în mod succint, informațiile anterior relevate în Figurile 7.1.5.6, 7.1.5.7, 7.1.5.8 și 7.1.5.9, cumulate în cadrul celor trei tabele aferente nivelurilor de dificultate (începător, intermediar, avansat), rezultând numărul total, optim al cazurilor TP – adevărat-pozitive (clipiri oculare voluntare), respectiv numărul total, optim al cazurilor TN – adevărat-negative (non-clipiri oculare), determinate pentru îndeplinirea fiecărei sarcini: introducerea unui anumit caracter din alcătuirea cuvintelor EYE – BRAIN – COMPUTER.

ÎNCEPĂTOR			
Nr. Crt.	Comanda	Clipiri Oculare	Non-Clipiri
1	E	8	4
2	Y	10	5
3	E	12	6
4	SPAȚIU	4	1
	TOTAL	34	16

INTERMEDIAR			
No.	Comanda	Clipiri Oculare	Non-Clipiri
1	B	12	6
2	R	15	6
3	A	10	5
4	I	16	7
5	N	13	7
6	SPAȚIU	4	1
	TOTAL	70	32

AVANSAT			
No.	Comanda	Clipiri Oculare	Non-Clipiri
1	C	12	6
2	O	17	7
3	M	12	6
4	P	15	6
5	U	9	4
6	T	14	6
7	E	10	4
8	R	8	4
9	SPACE	4	1
	TOTAL	101	44

Aplicații BCI pentru controlul sistemelor de afișare (Holograme Yoda și Matrice 8x8 LED) utilizând coduri binare generate prin efectuarea clipirilor oculare voluntare

54

clipirile domoale, a căror amplitudine este inferioară valorii de prag. Valoarea binară 1 caracterizează o clipire oculară voluntară puternică. Valoarea binară 0 reprezintă o clipire oculară voluntară domoală. Astfel s-au determinat cazurile TP – FP – TN – FN, conform descrierii:

- Cazurile TP (adevărat-pozitive): clipirile oculare voluntare puternice, corect detectate;
- Cazurile FP (fals-pozitive): clipirile oculare voluntare puternice, incorect detectate;
- Cazurile TN (adevărat-negative): clipirile oculare voluntare domoale, corect detectate;
- Cazurile FN (fals-negative): clipirile oculare voluntare domoale, incorect detectate.

Numărul cazurilor FP crește atunci când amplitudinea de prag a clipirii prezintă o valoare redusă, astfel că, în mod eronat, se înregistrează clipiri oculare voluntare puternice suplimentare celor executate în realitate. De asemenea, cazurile FP se incrementează atunci când, la experimentare, utilizatorul generează o valoare 1 binar (clipire oculară voluntară puternică), în locul valorii 0 binar (clipire oculară voluntară domoală). Numărul cazurilor FN se mărește atunci când amplitudinea de prag a clipirii prezintă o valoare ridicată, astfel că, în mod eronat, rezultă clipiri voluntare domoale suplimentare celor realizate în realitate. Totodată, cazurile FN se incrementează atunci când, la experimentare, utilizatorul generează o valoare 0 binar (clipire oculară voluntară domoală), în locul valorii 1 binar (clipire oculară voluntară puternică).

Figura 7.1.5.11 ilustrează trei tabele, cuprinzând numărul total optim al cazurilor TP (clipirile oculare voluntare puternice) și numărul total optim al cazurilor TN (clipirile oculare voluntare domoale) aferente sarcinilor propuse pentru fiecare nivel de dificultate (începător, intermediar, avansat), reprezentate prin obținerea celor 16 coduri binare la experimentarea aplicației de tip interfață creier-computer pentru controlul sistemului de afișare a hologramelor Yoda, utilizând casca EEG NeuroSky și o aplicație Android.

ÎNCEPĂTOR			
Nr. Crt.	Cod Binar	Clipiri Puternice	Clipiri Domoale
0	0000	0	4
1	0001	1	3
2	0010	1	3
TOTAL		2	10

INTERMEDIAR			
Nr. Crt.	Cod Binar	Clipiri Puternice	Clipiri Domoale
3	0011	2	2
4	0100	1	3
5	0101	2	2
6	0110	2	2
7	0111	3	1
TOTAL		10	10

AVANSAT			
Nr. Crt.	Cod Binar	Clipiri Puternice	Clipiri Domoale
8	1000	1	3
9	1001	2	2
10	1010	2	2
11	1011	3	1
12	1100	2	2
13	1101	3	1
14	1110	3	1
15	1111	4	0
TOTAL		20	12

Figura 7.1.5.11. Tipul, numărul și ordinea comenzilor bazate pe cuantificarea optimă a clipirilor oculare voluntare la experimentarea aplicației BCI pentru controlul sistemului de afișare Holograme cu NeuroSky.

ÎNCEPĂTOR			
Nr. Crt.	Cod Binar	Clipiri Puternice	Clipiri Domoale
0	00000001	1	7
TOTAL		1	7

INTERMEDIAR			
Nr. Crt.	Cod Binar	Clipiri Puternice	Clipiri Domoale
3	00000011	2	6
4	00000111	3	5
5	00001111	4	4
TOTAL		9	15

AVANSAT			
Nr. Crt.	Cod Binar	Clipiri Puternice	Clipiri Domoale
8	00011111	5	3
9	00111111	6	2
10	01111111	7	1
11	11111111	8	0
TOTAL		26	6

Figura 7.1.5.12. Tipul, numărul și ordinea comenzilor bazate pe cuantificarea optimă a clipirilor oculare voluntare la experimentarea aplicației BCI pentru controlul matricei cu 8x8 LED cu NeuroSky și Arduino.

Figura 7.1.5.12 prezintă rezultatele optime bazate pe generarea celor 12 coduri alcătuite fiecare din câte 8 valori binare în vederea generării comenzilor necesare la controlul aplicației de tip interfață creier-computer pentru redarea animațiilor grafice la nivelul matricelor cu 8x8 LED-uri conectate la platforma Arduino. Cele trei tabele prezintă numărul optim al cazurilor TP (clipirile

oculare voluntare puternice) și TN (clipirile oculare voluntare domoale) calculate pentru fiecare sarcină/cod binar și nivel de dificultate (începător, intermediar, avansat).

Etapele de experimentare BCI utilizând biopotențialele evocate P300

Etapa de experimentare a aplicațiilor de tip interfață creier-computer pentru controlul diverselor sisteme de asistare presupune transmiterea comenzilor prin identificarea corectă a simbolurilor acoperite de flash-uri luminoase, în vederea detectării biopotențialelor evocate P300. Prin urmare, în cadrul etapei de testare sau experimentare BCI, s-a stabilit un anumit număr de comenzi sau simboluri P300, asupra fiecăruia proiectându-se câte 16 flash-uri. Într-un interval de aproximativ 10 secunde, ulterior afișării celor 16 flash-uri, poate fi selectat un singur simbol, rezultând comanda corespunzătoare, în funcție de profunzimea atenției și orientarea privirii subiectului. Aplicația software P300 Speller nu poate genera două selecții simultane.

De aceea, dacă intenția utilizatorului (conform comenzii inițial stabilite) este corect generată de instrumentul Unicorn P300 Speller, atunci se vor incrementa numărul cazurilor TP (true-positive sau adevărat-pozitive) și numărul cazurilor TN (true-negative sau adevărat-negative). Cazurile TP se referă la detectarea corectă a simbolurilor țintă (target) dorite. Cazurile TN se referă la detectarea corectă a simbolurilor non-țintă (non-target) nedorite. S-au incrementat inclusiv cazurile TN deoarece nu s-a selectat în mod eronat un alt simbol non-țintă (nedorit). Având în vedere că nu pot fi selectate mai multe simboluri simultan, pentru simplitate, incrementarea cazurilor TN constă în adăugarea unei singure unități (+1) în cazul majorității aplicațiilor BCI, bazate pe detectarea biopotențialelor evocate P300, dezvoltate și experimentate în cadrul acestei teze de doctorat.

Dacă intenția utilizatorului (determinată de comanda propusă la experimentarea BCI) nu este corect generată de aplicația Unicorn P300 Speller, atunci se vor incrementa numărul cazurilor FP (false-positive sau fals-pozitive) și numărul cazurilor FN (false-negative sau fals-negative). Un simbol alternativ, selectat în mod eronat, reprezintă un rezultat fals-pozitiv deoarece a fost ales în mod greșit (neintenționat). Simbolul țintă a rămas neselectat în mod eronat, ceea ce determină un rezultat fals-negativ. Evident, cazurile TP și TN nu se incrementează, rămânând nemodificate.

7.1.6. Chestionar de feedback adresat subiecților voluntari ulterior experimentării BCI

Parametrii secundari măsurați în timpul experimentării aplicațiilor BCI

Totodată, experimentarea aplicațiilor propuse de tip interfață creier-computer pentru controlul sistemelor mecatronice sau sarcinile de comunicare, cu ajutorul comenzilor determinate de clipirile oculare voluntare sau biopotențialele P300 (concentrarea atenției și privirii) a presupus monitorizarea subiecților în vederea determinării următorilor parametrii secundari:

- numărul total de încercări efectuate pentru a obține performanță maximă;
- intervalul de timp acordat sesiunii de experimentare;
- nivelul de motivație (intrinsecă sau extrinsecă) al subiecților privind participarea la activitățile de testare a aplicației BCI propuse;
- momentul zilei la care subiectul a realizat experimentul;

- gradul de înțelegere al instrucțiunilor explicate și etapelor exemplificate;
- gradul de claritate a sarcinilor primite;
- nivelul perceput de subiecți privind dificultatea execuției clipirilor oculare voluntare sau concentrării atenției/orientării privirii asupra flash-urilor luminoase;
- gradul de acomodare al subiecților cu utilizarea căștilor EEG;
- nivelul de stres resimțit de fiecare subiect în timpul desfășurării experimentului BCI.

La finalul sesiunii de experimentare a interfeței creier-computer, autoarea tezei le-a solicitat participanților să completeze un chestionar (**ANEXE – Secțiunea 7.1.6**) alcătuit din 28 de întrebări: 11 având caracter obligatoriu, solicitând un răspuns din partea subiecților, o întrebare fiind opțională, iar dintre celelalte 14 întrebări, era necesar ca subiectul să răspundă numai la cele referitoare la aplicațiile testate de el. Chestionarul a fost încărcat pe platforma educațională – Moodle Elearning a Universității Transilvania din Brașov, astfel că studenții au completat formularul în format electronic.

7.2. ANALIZA GENERALĂ A REZULTATELOR OBȚINUTE LA EXPERIMENTAREA BCI

7.2.1. Analiza descriptiv-calitativă

Cei 129 de subiecți voluntari, reprezentând cei 121 studenți de la programele de studii Calculatoare, anul III (două generații – 79 tineri cu vârste de 21 – 22 ani) și Tehnologia Informației, anul IV (42 tineri cu vârste de 23 – 24 ani), precum și o doctorandă (fată – 31 ani) alături de 7 persoane din mediul non-academic (un băiat – 28 ani; o fată – 30 ani; doi bărbați – 58 și 83 ani; trei femei – 58, 80 și 83 ani), au experimentat cel puțin una dintre cele 25 de aplicații de tip interfață creier-computer (BCI), bazate pe utilizarea căștilor EEG NeuroSky (1 senzor), Emotiv Insight (5 senzori), sau GTEC Unicorn (8 senzori), controlul cu ajutorul platformelor Arduino, Raspberry Pi, Micro:Bit, NI myRIO și pe implementarea de către autoarea tezei a instrumentelor software în LabVIEW, Python, Matlab, NodeRED, în timpul stagiului doctoral. Dintre cei 129 subiecți implicați la experimentele de tip interfață creier-computer, 110 persoane au utilizat casca EEG NeuroSky, 4 participanți au purtat casca EEG Emotiv, executând clipiri oculare voluntare pentru controlul aplicațiilor, iar 15 voluntari au folosit casca EEG GTEC Unicorn, concentrându-și privirea și atenția asupra platformei P300 Speller.

Această secțiune descrie și analizează, din punct de vedere calitativ, totalitatea rezultatelor experimentale obținute de cei 129 de subiecți, prin particularizări în funcție de casca utilizată și evidențierea percepției persoanelor implicate la activitatea de testare a aplicațiilor BCI privind gradul de înțelegere a instrucțiunilor primite, performanța avută, dificultatea execuției modalității de control a interfeței creier-computer, acuratețea semnalelor EEG, acomodarea cu dispozitivul de achiziție date EEG, nivelul de parcurgere a sarcinilor de lucru, respectiv starea lăuntrică.

Anexele – Secțiunea 7.2.1 prezintă răspunsurile favorabile și constructive, oferite de studenți la întrebarea referitoare la motivul pentru care au acceptat să participe la experimentarea de tip interfață creier-computer. Ei au arătat interes și curiozitate privind activitățile propuse.

Figura 7.2.1.1 prezintă răspunsurile subiecților la întrebarea referitoare la măsura în care doctoranda le-a prezentat instrucțiunile generale necesare experimentării aplicației BCI.

Procentajul de 91% sau 117 din cei 129 subiecți implicați au confirmat faptul că au primit informații generoase, detalii care le-au facilitat experimentarea BCI corectă. Un număr de 12 studenți (în proporție de 9%) au înțeles instrucțiunile într-o măsură rezonabilă. Referitor la claritatea sarcinilor de lucru, 96% sau 124 din cei 129 subiecți voluntari au raportat faptul că totul a fost clar, încă de la început știind ce rezultate trebuie să obțină la finalul experimentului, iar 4% sau 5 dintre cei 129 de participanți au constatat că au înțeles aproape complet sarcinile, rămânând unele neclarități.

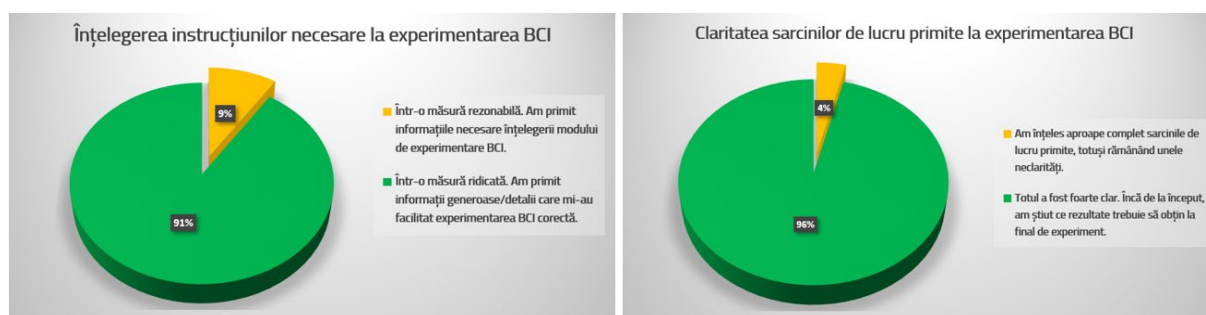


Figura 7.2.1.1. Răspunsurile subiecților privind nivelul de înțelegere a instrucțiunilor și claritatea sarcinilor de lucru primite la experimentarea BCI.

Figura 7.2.1.2 prezintă răspunsurile subiecților la întrebarea referitoare la nivelul de dificultate al modalității de control prin execuția clipirilor oculare voluntare pentru controlul aplicațiilor de tip interfață creier-computer prin utilizarea căștilor NeuroSky cu un singur senzor EEG și Emotiv Insight cu 5 senzori EEG. Chestionarul completat de subiecți a raportat următoarele rezultate privind performanța obținută: redusă – 3% (3 subiecți); medie – 54% (62 subiecți); ridicată – 43% (49 subiecți). Conform figurii 7.2.1.2, în cazul modalității de control prin concentrarea atenției, respectiv orientării privirii asupra flash-urilor luminoase pentru detectarea biopotențialelor evocate P300 necesare la controlul aplicațiilor BCI prin utilizarea căștii Unicorn cu 8 senzori EEG, s-a obținut performanță: ridicată - 86% (13 subiecți), medie – 7% (1 subiect); redusă – 7% (1 subiect).

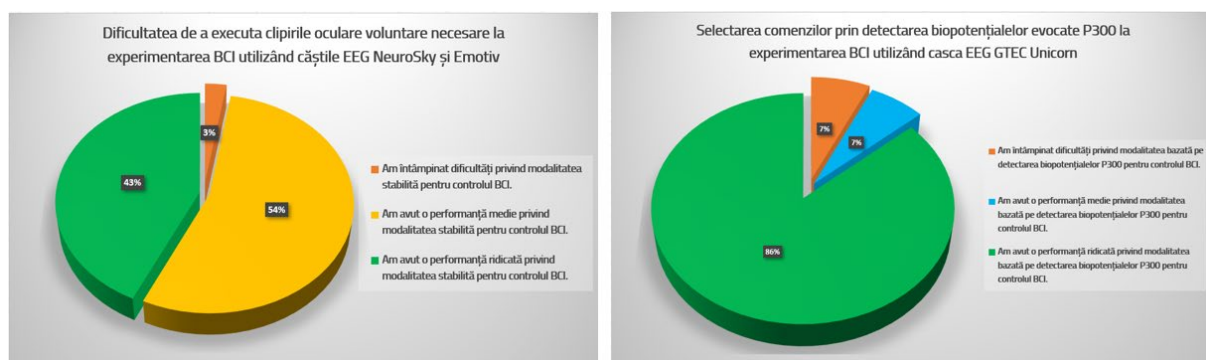


Figura 7.2.1.2. Răspunsurile subiecților privind nivelul de dificultate al modalității de control (clipirile oculare sau privirea flash-urilor luminoase) la experimentarea BCI.

Figura 7.2.1.3 prezintă răspunsurile studenților la întrebarea referitoare la percepția lor lăuntrică sau la modul în care ei s-au simțit în timpul experimentării aplicațiilor de tip interfață creier-computer, rezultând: 38% (49 subiecți) s-au distrat, fiind încântați și complet dedicați activității experimentale; 36% (47 subiecți) s-au simțit relaxați, liniștiți, neavând nicio constrângere, grijă sau temere; 12% (15 subiecți) au fost mai precauți/atenți/concentrați privind îndeplinirea sarcinii primite; 9% (12 subiecți) au fost ușor emoționați, însă curioși privind modalitatea de control BCI; 3% (4 subiecți) au fost destul de solicitați din cauza presiunii de a executa corect sarcina de lucru; 2% (2 subiecți) au manifestat trăiri personale percepute ca fiind preponderent pozitive.

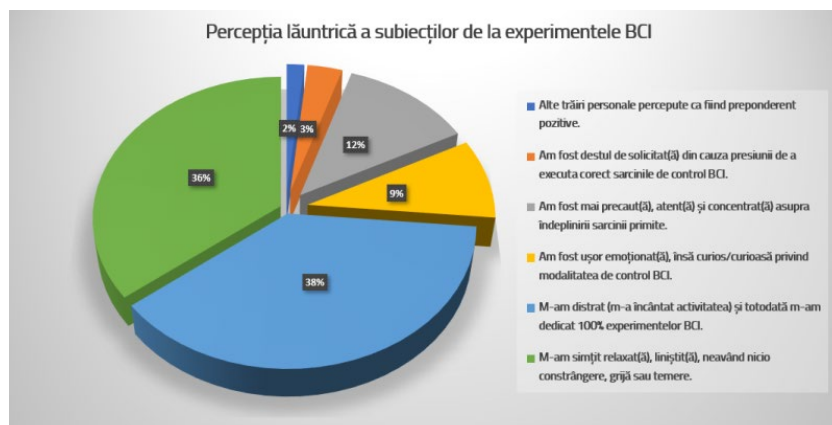


Figura 7.2.1.3. Răspunsurile subiecților privind modul în care ei s-au simțit în timpul experimentării aplicațiilor de tip interfață creier-computer.

Conform figurii 7.2.1.4, referitor la întrebarea privind acomodarea cu seturile EEG NeuroSky și Emotiv (pentru detectarea clipirilor oculare) în timpul experimentelor BCI, subiecții au raportat următoarele rezultate: 78% (90 subiecți) – *totul a fost în regulă, acomodarea realizându-se în aproximativ 5 minute*; 17% (19 subiecți) – *au întâmpinat mici probleme tehnice (soluționate rapid), dar nu au perceput disconfort*; 4% (4 subiecți) – *au întâmpinat dificultăți, necesitând un interval de timp mai mare pentru montarea căștii EEG pe scalp*; 1% (1 subiect) – *nu s-a acomodat cu purtarea căștii, resimțind disconfort*. În ceea ce privește acomodarea cu setul EEG GTEC Unicorn (pentru detectarea biopotențialelor evocate P300) în timpul experimentelor BCI, subiecții au raportat următoarele rezultate: 73% (11 subiecți) – *calitatea semnalului EEG a fost maximă la configurare* și 27% (4 subiecți) – *calitatea semnalului EEG a fost medie la configurare*.

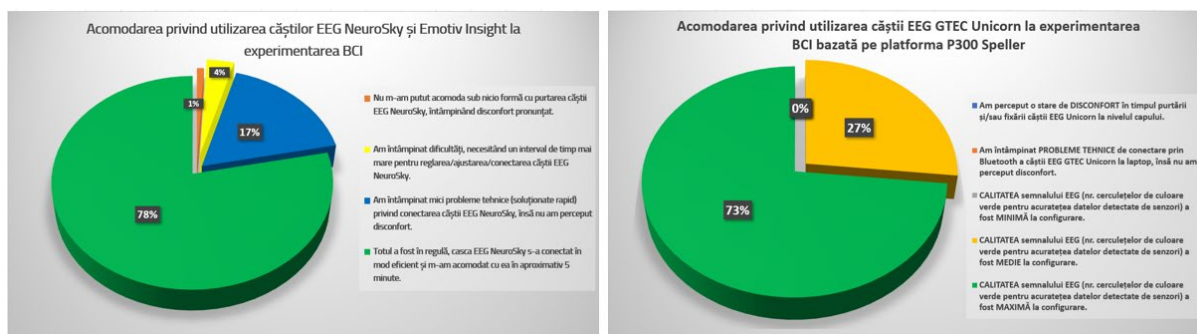


Figura 7.2.1.4. Răspunsurile subiecților privind acomodarea cu utilizarea căștilor EEG la experimentarea BCI.

Conform figurii 7.2.1.5, referitor la întrebarea privind performanța obținută la testarea aplicațiilor de tip interfață creier-computer prin utilizarea căștilor EEG NeuroSky și Emotiv Insight, subiecții au raportat următoarele rezultate: nivelul avansat – 67% (103 subiecți); nivelul intermediar – 26% (40 subiecți); nivelul începător – 7% (10 subiecți). În ceea ce privește performanța avută de subiecți la testarea aplicațiilor de tip interfață creier-computer prin utilizarea căștii EEG GTEC Unicorn, s-au obținut următoarele rezultate: nivelul avansat – 72% (21 subiecți); nivelul intermediar – 21% (6 subiecți); nivelul începător – 7% (2 subiecți). Rezultatele obținute sunt justificate prin următoarea observație: graficele din figura 7.2.1.5 au fost concepute prin acumularea datelor de la cei 182 subiecți multipli sau cele 182 de observații experimentale, ceea ce arată că un subiect a testat, experimentat sau evaluat mai multe aplicații BCI – Interfață Creier-Computer.

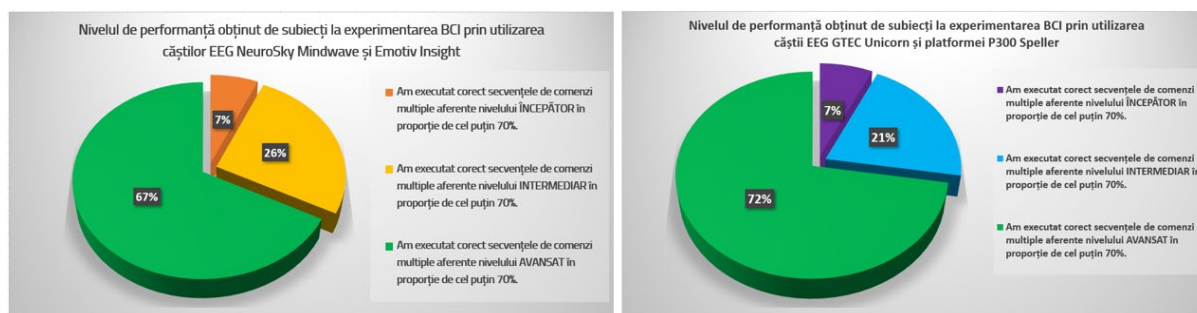


Figura 7.2.1.5. Răspunsurile subiecților privind nivelul de performanță obținut de subiecți la experimentarea BCI prin utilizarea căștilor EEG NeuroSky, Emotiv Inaight și GTEC Unicorn integrată cu P300 Speller.

7.2.2. Analiza descriptiv-cantitativă

Experimentarea celor 25 de aplicații de tip interfață creier-computer (BCI) a fost realizată de 182 subiecți multipli, dintre care 129 au reprezentat subiecți unici. Prin urmare, subiecții multipli au experimentat 2-3 aplicații BCI, iar subiecții unici au testat o singură aplicație BCI.

Graficul din Figura 7.2.2.1 arată numărul de subiecți care au experimentat fiecare dintre aplicațiile BCI dezvoltate în timpul stagiului doctoral. Astfel, numărul minimum – 2 subiecți au testat aplicațiile BCI, care au presupus monitorizarea în Python a datelor EEG utilizând casca EEG NeuroSky, respectiv controlul unui model 3D de tipul unui scaun cu roțile, folosind casca GTEC Unicorn. De asemenea, numărul maximum 13 subiecți au explorat aplicația BCI, care a presupus transferul mesajelor chat Android cu ajutorul căștii EEG NeuroSky.

Graficul din Figura 7.2.2.2 prezintă procentajul de aplicații BCI care au necesitat la experimentare o anumită cască EEG (NeuroSky Mindwave, Emotiv Insight, GTEC Unicorn). Astfel, un procent de 60% reprezentând 15 aplicații BCI au fost testate cu ajutorul căștii EEG NeuroSky Mindwave. De asemenea, un procent de 32% constituind 8 aplicații BCI au fost experimentate cu ajutorul căștii EEG GTEC Unicorn. Procentul de 8% determinat 2 aplicații BCI au fost explorate prin utilizarea căștii EEG Emotiv Insight.

Graficul din Figura 7.2.2.2 prezintă numărul de subiecți care au folosit o anumită cască EEG la activitățile experimentale BCI. Au rezultat următoarele procentaje: 80% sau 145 subiecți (multipli) au purtat casca NeuroSky, 16% sau 29 subiecți au utilizat casca GTEC Unicorn, iar 4% sau 8 subiecți au folosit casca Emotiv în timpul desfășurării experimentelor BCI. Altfel formulat, s-au înregistrat:

145 utilizări sau procentajul de 80% pentru casca NeuroSky, 29 utilizări sau procentajul de 16% pentru casca GTEC Unicorn și 8 utilizări sau procentajul de 4% pentru Emotiv.

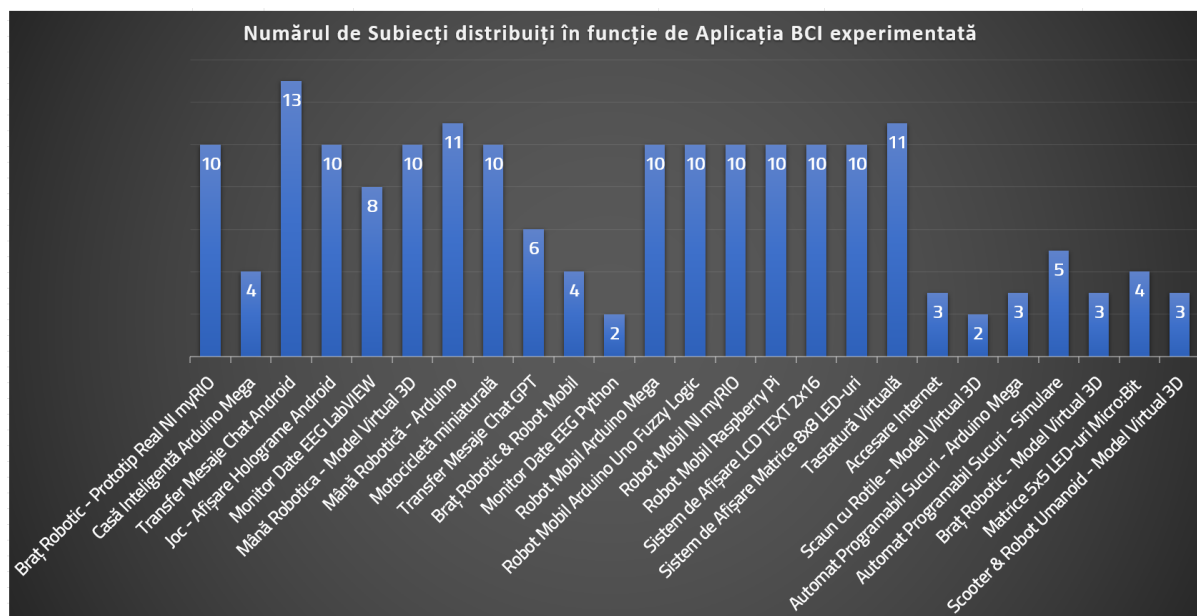


Figura 7.2.2.1. Determinarea numărului de subiecți care au experimentat fiecare dintre cele 25 aplicații BCI.

Graficul din Figura 7.2.2.3 prezintă distribuția aplicațiilor BCI în funcție de cele trei metode principale de control la experimentare de către subiecți: 64% sau 16 aplicații BCI au implicat efectuarea clipirilor oculare voluntare, 32% sau 8 aplicații BCI au presupus concentrarea atenției, respectiv orientarea privirii asupra flash-urilor luminoase, și 4% sau o singură aplicație BCI s-a bazat pe închiderea și deschiderea globilor oculari.

Graficul din Figura 7.2.2.4 prezintă distribuția aplicațiilor BCI în funcție de modalitatea specifică de control la experimentare, rezultând următoarea clasificare: 8 aplicații BCI bazate pe detectarea biopotențialelor evocate P300, 6 aplicații BCI bazate pe comenzi de tranziție și selecție determinate de clipirile oculare voluntare; 3 aplicații BCI bazate pe algoritmul de numărare a clipirilor; câte 2 aplicații BCI care au presupus generarea codurilor binare prin efectuarea clipirilor și analiza semnalului EEG brut; câte o aplicație BCI pentru care au integrat diferite tehnici – algoritm personalizat de numărare a clipirilor sau determinarea amplitudinii clipirii prin analiza datelor EEG utilizând Logica Fuzzy; algoritm de tip Divide et Impera aplicat clipirilor; analiza ritmului EEG Alpha.

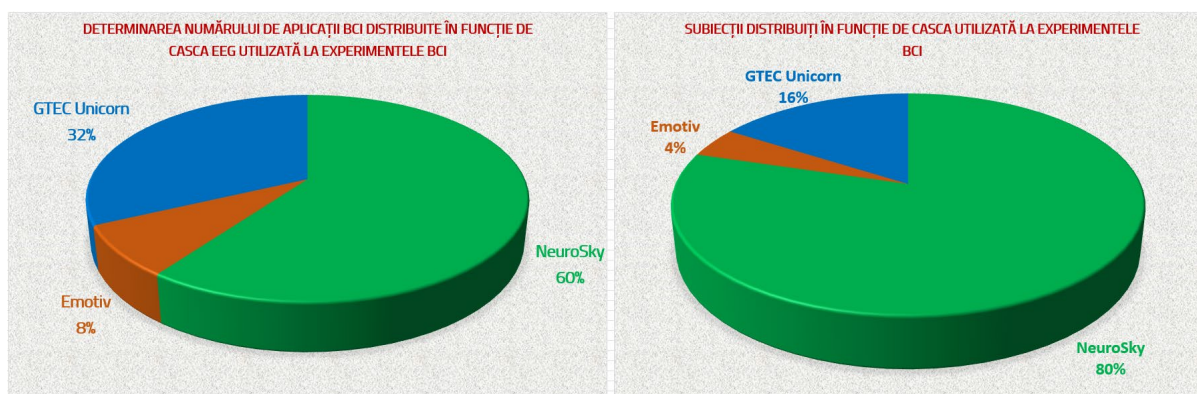


Figura 7.2.2.2. Distribuirea numărului de aplicații BCI și subiecți în funcție de casca EEG utilizată.

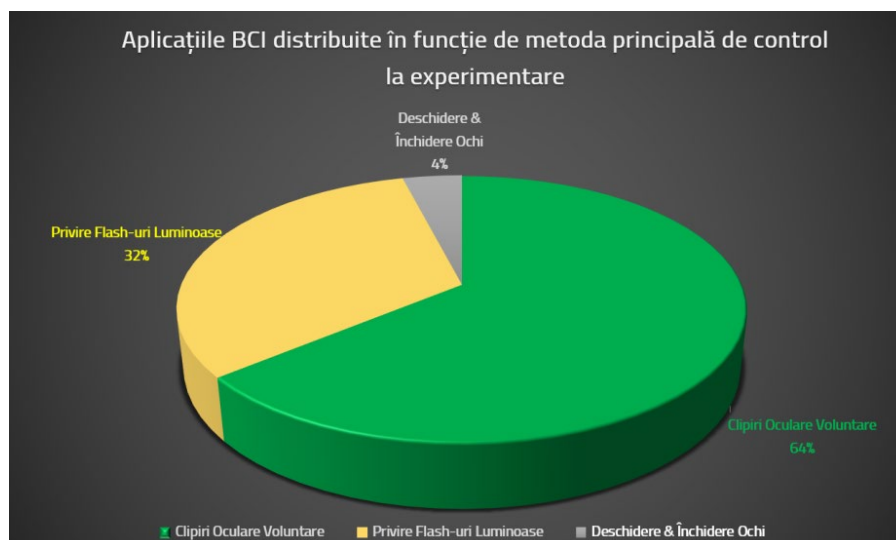


Figura 7.2.2.3. Distribuția aplicațiilor BCI în funcție de metoda principală de control la experimentare.

Graficul din Figura 7.2.2.5 prezintă distribuția aplicațiilor BCI în funcție de scopul îndeplinit la experimentare și mediul software în care au fost dezvoltate de către autoarea acestei teze de doctorat. În funcție de scopul principal sau utilitatea finală, au rezultat: câte 8 aplicații BCI pentru controlul sistemelor robotizate și controlul modelelor 3D sau simulărilor virtuale, câte 4 aplicații BCI pentru comunicare sau transferul mesajelor și implementarea soluțiilor de interfațare EEG – SW – HW, și 2 aplicații BCI realizate în scop didactic, în vederea cercetării științifice prin achiziția, procesarea și clasificarea datelor EEG. În funcție de mediul software în care au fost dezvoltate, s-au obținut: 6 aplicații BCI în LabVIEW; 5 aplicații BCI în LabVIEW și Arduino; 2 aplicații BCI – Python; LabVIEW și MIT App Inventor; câte o aplicație BCI care au integrat – LabVIEW, Arduino sau Python, Unicorn P300 Speller; Matlab; NodeRED; Python și Arduino.

Graficul din Figura 7.2.2.6 prezintă distribuția aplicațiilor BCI în funcție de platforma hardware cu ajutorul căreia au fost controlate de către autoarea acestei teze de doctorat. Prin urmare, au rezultat: câte 4 aplicații BCI dezvoltate cu Arduino Mega, respectiv Arduino Uno; 2 aplicații BCI programate cu NI myRIO; câte o aplicație implementată cu Arduino Nano 33 IoT, Raspberry Pi, respectiv Micro:Bit. Celelalte 12 aplicații BCI au implicat controlul modelelor 3D, simulărilor virtuale ori sistemelor multimedia, astfel că nu au necesitat o platformă de dezvoltare.

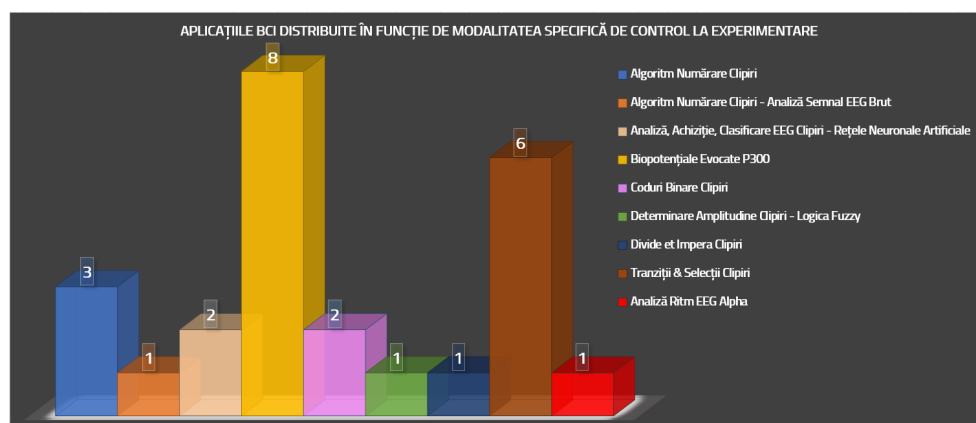


Figura 7.2.2.4. Distribuția aplicațiilor BCI în funcție de modalitatea specifică de control la experimentare.

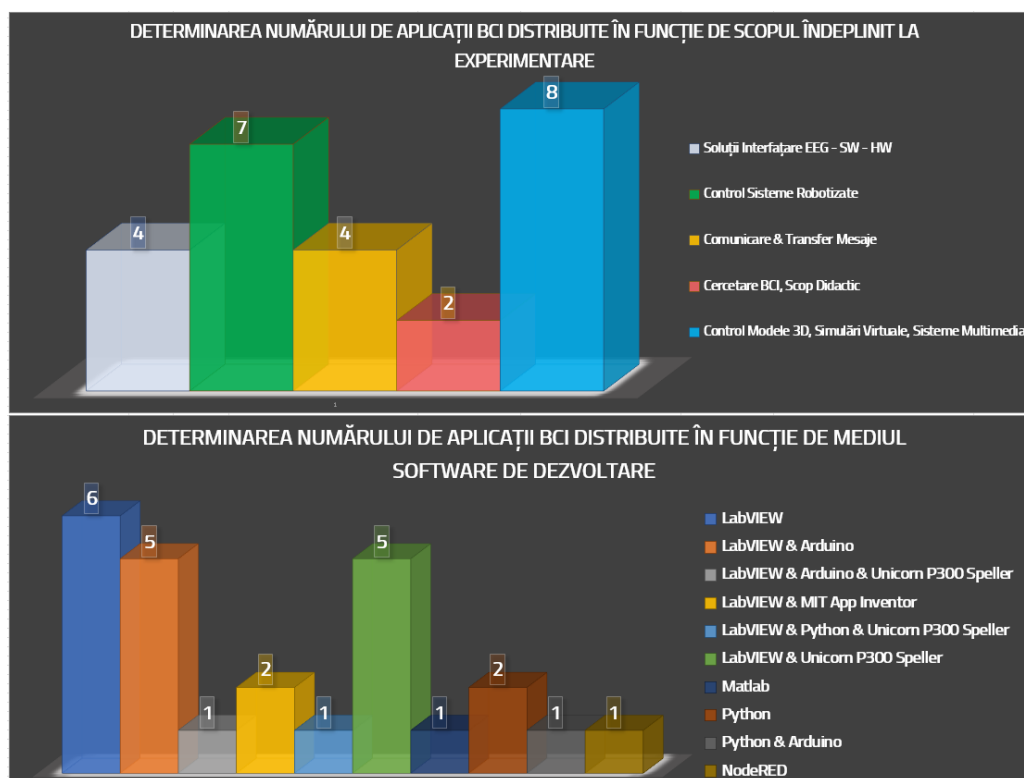


Figura 7.2.2.5. Distribuirea aplicațiilor BCI în funcție de scopul îndeplinit și mediul software de dezvoltare.

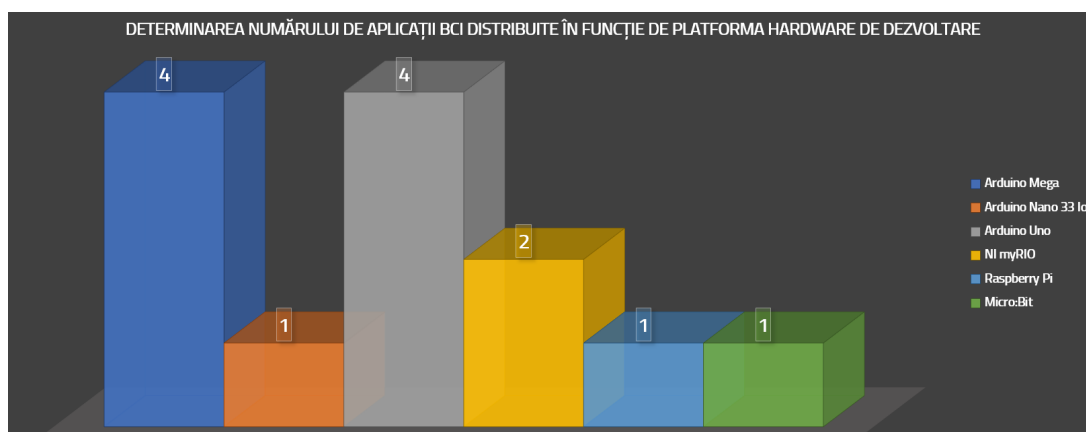


Figura 7.2.2.6. Distribuirea aplicațiilor BCI în funcție de platforma hardware de dezvoltare.

Graficul din Figura 7.2.2.7 prezintă valorile minimă – medie – maximă pentru mărimea *Sensibilitatea*, calculată pe baza rezultatelor integrale obținute de cei 182 subiecți (multipli) la experimentarea celor 25 de aplicații BCI, în vederea evaluării performanței de funcționare/utilizare. S-au determinat următoarele rezultate generale privind *Sensibilitatea*: valoarea minimă = 56%, valoarea medie = 90% și valoarea maximă = 100%.

Graficul din Figura 7.2.2.8 prezintă valorile minimă – medie – maximă pentru mărimea *Specificitatea*, calculată pe baza rezultatelor integrale obținute de cei 182 subiecți (multipli) la experimentarea celor 25 de aplicații BCI, în vederea evaluării performanței de funcționare/utilizare. S-au determinat următoarele rezultate generale privind *Specificitatea*: valoarea minimă = 51%, valoarea medie = 88% și valoarea maximă = 100%.

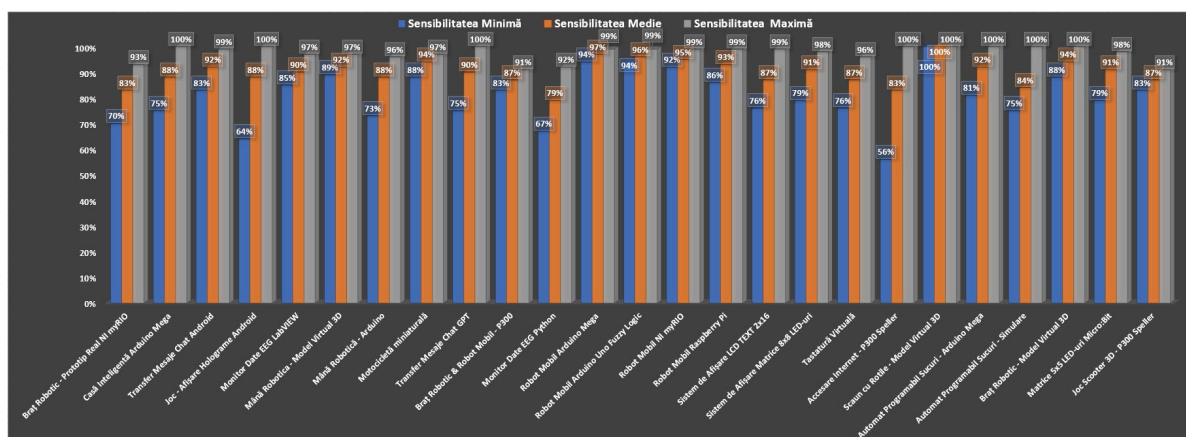


Figura 7.2.2.7. Valorile (minimă – medie – maximă) ale mărimii Sensibilitate calculată pe baza tuturor rezultatelor obținute de subiecți la experimentarea celor 25 de aplicații BCI.

Graficul din Figura 7.2.2.9 prezintă valorile minimă – medie – maximă pentru mărimea *Precizia*, calculată pe baza rezultatelor integrale obținute de cei 182 subiecți (multipli) la experimentarea celor 25 de aplicații BCI, în vederea evaluării performanței de funcționare/utilizare. S-au determinat următoarele rezultate generale privind *Precizia*: valoarea minimă = 56%, valoarea medie = 90% și valoarea maximă = 100%.

Graficul din Figura 7.2.2.10 prezintă valorile minimă – medie – maximă pentru mărimea *Acuratețea*, calculată pe baza rezultatelor integrale obținute de cei 182 subiecți (multipli) la experimentarea celor 25 de aplicații BCI, în vederea evaluării performanței de funcționare/utilizare. S-au determinat următoarele rezultate generale privind *Acuratețea*: valoarea minimă = 56%, valoarea medie = 90% și valoarea maximă = 100%.

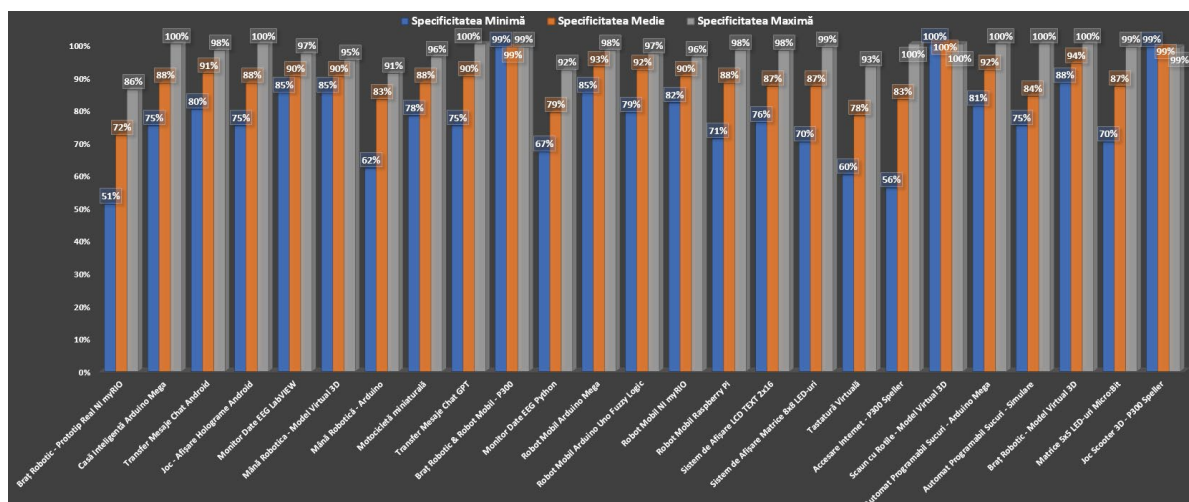


Figura 7.2.2.8. Valorile pentru Specificitate calculată pe baza experimentării celor 25 de aplicații BCI.

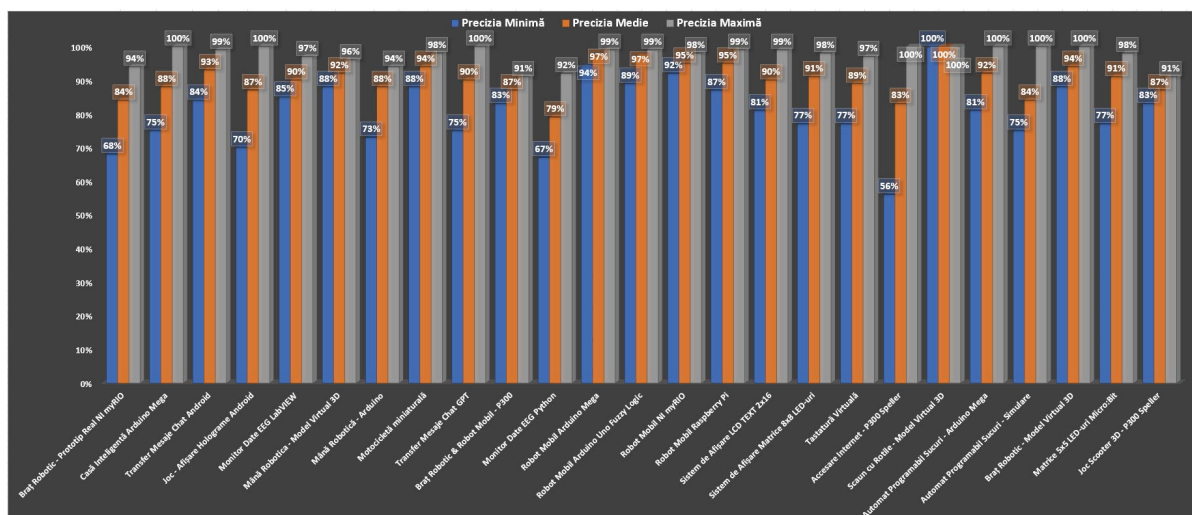


Figura 7.2.2.9. Valorile (minimă – medie – maximă) ale mărimii Precizia calculată pe baza tuturor rezultatelor obținute de studenți la experimentarea celor 25 de aplicații BCI.

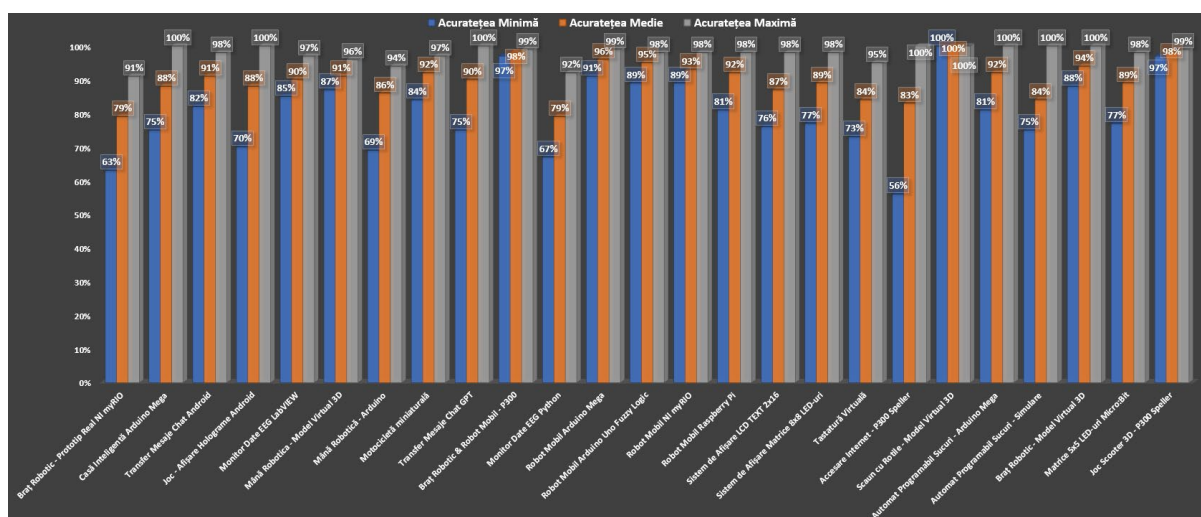


Figura 7.2.2.10. Valorile (minimă – medie – maximă) ale mărimii Acuratețea calculată pe baza tuturor rezultatelor obținute de studenți la experimentarea celor 25 de aplicații BCI.

7.2.5. Analiza SWOT

Această secțiune prezintă trei Analize SWOT necesară la evidențierea punctelor tari (Strengths), punctelor slabe (Weaknesses), oportunităților (Opportunities) și amenințărilor (Threats) privind evaluarea aplicațiilor de tip Interfață Creier-Computer (BCI) propuse, proiectate, realizate, implementate și experimentate în cadrul tezei de doctorat, clasificate/grupate după cum urmează:

- Analiza SWOT pentru evaluarea aplicațiilor BCI controlate prin clipirile oculare voluntare sau biopotențialele evocate P300, din punct de vedere al utilizatorului – Figura 7.2.5.1;
- Analiza SWOT pentru evaluarea aplicațiilor BCI controlate prin clipirile oculare voluntare sau biopotențialele evocate P300, din punct de vedere al dezvoltatorului – Figura 7.2.5.2;
- Analiza SWOT pentru evaluarea aplicațiilor BCI controlate prin clipirile oculare voluntare sau biopotențialele evocate P300, din punct de vedere al cercetătorului – Figura 7.2.5.3.

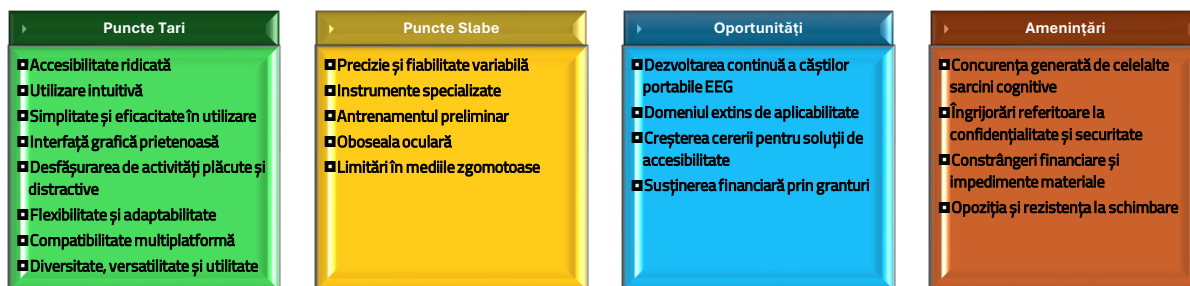


Figura 7.2.5.1 Analiza SWOT pentru evaluarea aplicațiilor BCI controlate prin clipirile oculare voluntare sau biopotențialele evocate P300, din punct de vedere al utilizatorului.

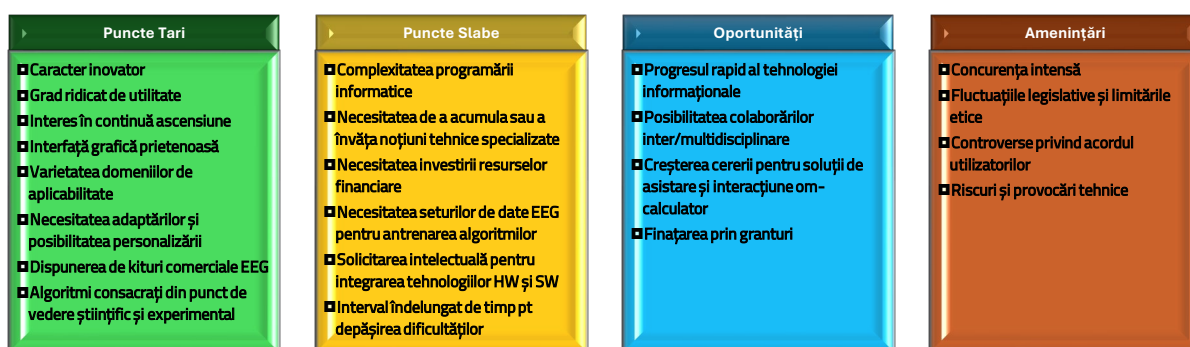


Figura 7.2.5.2 Analiza SWOT pentru evaluarea aplicațiilor BCI controlate prin clipirile oculare voluntare sau biopotențialele evocate P300, din punct de vedere al dezvoltatorului.



Figura 7.2.5.3 Analiza SWOT pentru evaluarea aplicațiilor BCI controlate prin clipirile oculare voluntare sau biopotențialele evocate P300, din punct de vedere al cercetătorului.

7.3. APLICAȚII BCI BAZATE PE INTEGRAREA DINTRE EEG - HARDWARE – SOFTWARE

7.3.1. Aspecte esențiale privind aplicațiile BCI dezvoltate și experimentate

Acest subcapitol prezintă rezultatele cercetărilor experimentale bazate pe o serie de aplicații originale software și hardware, de tip interfață creier-computer (BCI), implementate în diverse limbaje și medii de programare, prin contribuția integrală adusă de autoarea acestei teze de

doctorat. Prin urmare, rezultatele obținute prin integrarea soluțiilor de achiziție a datelor electroencefalografice, mediilor de dezvoltare software și sistemelor hardware, au determinat îndeplinirea primului obiectiv specific: *Proiectarea, realizarea și implementarea unor soluții eficiente de interfațare între platformele hardware (NI myRIO, Arduino, Raspberry Pi, Micro:Bit), mediile software de dezvoltare (LabVIEW, Matlab, Arduino, Python, NodeRED) și seturile portabile (NeuroSky, Emotiv Insight, GTEC Unicorn) pentru achiziția semnalelor electroencefalografice.*

Aplicație BCI bazată pe integrarea în LabVIEW dintre NeuroSky și NI myRIO

Referitor la aplicația BCI experimentată în secțiunea 7.3.2., doctoranda a publicat mai multe informații sub forma unei lucrări științifice, indexate ISI (Web of Science), în baza de date IOP Science. Începând cu anul 2018, lucrarea [411] a putut fi accesată la link-ul DOI: 10.1088/1757-899X/444/4/042014. De asemenea, lucrarea *A brain-computer interface based on the integration of NI myRIO development device and NeuroSky Mindwave headset* a fost susținută în cadrul Conferinței ACME 2018 (*The 8th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering*), organizate la Iași, România, în perioada 7 – 8 Iunie 2018.

Totodată, valorificând informațiile particularizate privind aplicația BCI experimentată în secțiunea 6.3.2, doctoranda, în calitate de co-autor, a introdus o secțiune în cadrul articolului științific [92], indexat BDI (ASME Press), care a fost susținut la Conferința CEMD 2017 (*International Conference on Control Engineering and Mechanical Design*), organizată în China. Începând cu anul 2018, lucrarea [92] a putut fi accesată la link-ul DOI: https://doi.org/10.1115/1.861677_ch23.

Mai mult decât atât, instrumentele LabVIEW de tip interfață creier-computer (BCI), experimentate în secțiunea 7.3.2, au fost inițial dezvoltate și prezentate în cadrul Lucrării de Disertație [398], concepute de autoarea acestei teze în anul 2017, în vederea finalizării studiilor de Masterat – *Sisteme Mecatronice pentru Industrie și Medicină*. Lucrarea de Disertație a constituit premisa publicării a două articole științifice pe parcursul stagiului de Doctorat și a reprezentat fundamentul pe baza căruia doctoranda a conceput aplicația BCI mai complexă, prezentată în secțiunea 7.6.3 a acestei teze, pentru controlul unui braț robotizat utilizând NI myRIO și casca EEG NeuroSky în vederea detectării clipirilor oculare voluntare.

De altfel, aplicațiile LabVIEW de tip interfață creier-computer (BCI), experimentate în secțiunea 7.3.2, s-au bucurat de un succes răsunător în anul 2017, reflectat atât prin premiile importante obținute de doctorandă în cadrul concursurilor de proiecte studențești desfășurate la evenimentele precum AFCO (Absolvenți în Fața Companiilor – organizat la Universitatea Transilvania din Brașov) și ZEM (Zilele Educației Mecatronice – prin participarea studenților cu profil de mecatronică proveniți de la facultățile din toată țara), cât și prin mediatizarea la nivel local, inclusiv prin prezentarea în cadrul manifestărilor științifice de la *Noaptea Cercetătorilor*.

Aplicație BCI bazată pe integrarea în Matlab dintre NeuroSky și Arduino Nano 33 IoT

Referitor la aplicația BCI experimentată în secțiunea 7.3.3., doctoranda a publicat informații suplimentare sub forma unei lucrări științifice, indexate în baza de date SCIENDO. Începând cu luna Decembrie 2021, lucrarea [422] a putut fi accesată la link-ul DOI: <https://doi.org/10.2478/9788395815065-033>. De asemenea, această lucrare a fost susținută în

cadrul Conferinței ICISIL 2021 (*The 11th International Conference on Information Science and Information Literacy*), organizate la Brașov, România, în perioada 11 – 12 Martie 2021. Totodată, un clip video cuprinzând demonstrația video parțială a modului de utilizare a acestei aplicații BCI se regăsește pe YouTube și poate fi vizualizată accesând adresa [391].

Aplicație BCI pentru integrarea în Python dintre Neurosky și Raspberry Pi

Referitor la aplicația BCI experimentată în secțiunea 7.3.4., doctoranda a publicat informații suplimentare sub forma unei lucrări științifice, indexate în baza de date BDI – Springer. Începând cu data de 1 Ianuarie 2022, lucrarea [399] a putut fi accesată la link-ul DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-92328-0_31. De asemenea, această lucrare a fost susținută în cadrul Conferinței Internaționale ICNBME 2021 (*The 5th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering*), organizată la Chișinău, Moldova, în perioada 3-5 Noiembrie 2021. Înregistrarea video cuprinzând susținerea live, din timpul conferinței, poate fi vizualizată la acest link YouTube: [353] (fiind încărcată de IDSI TV).

Clipurile video cuprinzând demonstrațiile, în timp real, a principiului de funcționare și modului de utilizare ale aplicației Python propuse, pot fi vizualizate pe YouTube, la următoarele adrese: [358], [359] și [537].

Aplicație BCI bazată pe integrarea în NodeRED dintre Emotiv și Micro:Bit

Referitor la aplicația BCI experimentată în secțiunea 7.3.5., doctoranda a publicat informații suplimentare sub forma unei lucrări științifice [409], indexate în baza de date BDI – Springer. Începând cu data de 1 Ianuarie 2024, lucrarea [409], [410] a putut fi accesată la link-ul DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-42467-0_82. Această lucrare a fost susținută în cadrul Conferinței Internaționale REV 2023 (*The 20th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation*), organizată la Thessaloniki, Grecia, în perioada 1-3 Martie 2023.

Clipurile video cuprinzând demonstrațiile, în timp real, ale principiului de funcționare și modului de utilizare ale aplicațiilor Python, NodeRED și LabVIEW propuse, pot fi vizualizate pe YouTube, la următoarele adrese: [306], [369], [370], [373] și [362].

Aplicație BCI bazată pe integrarea în Python dintre Emotiv și Arduino

Referitor la aplicația BCI experimentată în secțiunea 7.3.6., doctoranda a publicat informații suplimentare sub forma unei lucrări științifice [383], indexate în baza de date BDI – Springer. Începând cu data de 2 Ianuarie 2023, lucrarea [383] a putut fi accesată la link-ul DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-42467-0_82. Lucrarea a fost susținută în cadrul Conferinței Internaționale EHB 2022 (*The 10-th edition of the E-Health and Bioengineering Conference*), organizată la Iași, România, în perioada 17 – 18 Noiembrie 2022.

Clipul video cuprinzând demonstrația, în timp real, a principiului de funcționare și modului de utilizare ale aplicațiilor Python și Arduino propuse, pot fi vizualizate pe YouTube, la adresa: [360].

Aplicație BCI bazată pe integrarea în LabVIEW dintre Unicorn și Arduino

Referitor la aplicația BCI experimentată în secțiunea 7.3.7., doctoranda a publicat informații suplimentare sub forma unei lucrări științifice [355], indexate în baza de date BDI – Springer.

Începând cu data de 2 Aprilie 2024, lucrarea [355] a putut fi accesată la link-ul DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-42467-0_82. De asemenea, această lucrare a fost susținută în cadrul Conferinței Internaționale ICL 2023 (The 26th International Conference on Interactive Collaborative Learning), organizată în Madrid, Spania, în perioada 26 – 29 Septembrie, 2023.

Clipurile video cuprinzând demonstrațiile, în timp real, ale principiului de funcționare și modului de utilizare ale aplicațiilor Python, NodeRED și LabVIEW propuse, pot fi vizualizate pe YouTube, la următoarele adrese: [388], [384], [386].

7.4. APLICAȚII PENTRU CERCETAREA BCI BAZATĂ PE INTELIGENȚA ARTIFICIALĂ

7.4.1 Aspecte esențiale privind aplicațiile BCI dezvoltate și experimentate

Acest capitol prezintă rezultatele cercetărilor experimentale bazate pe o serie de aplicații originale software și hardware, de tip interfață creier-computer (BCI), implementate în LabVIEW și Python, prin contribuția integrală adusă de autoarea acestei teze de doctorat. Aplicațiile propuse în secțiunile următoare permit achiziția, procesarea și clasificarea, online (în timp real) și offline, a semnalelor electroencefalografice, utilizând tehnici bazate pe rețelele neuronale artificiale. De asemenea, prin metode bazate pe Logica Fuzzy, s-a determinat amplitudinea clipirilor oculare voluntare, acestea reprezentând ulterior comenzi pentru controlul unui robot mobil.

Prin urmare, rezultatele obținute în acest subcapitol au determinat îndeplinirea celui de-al doilea obiectiv specific: Proiectarea, realizarea și implementarea unor instrumente software pentru achiziția, procesarea și clasificarea, online (în timp real) și offline, a semnalelor electroencefalografice, utilizând atât tehnici bazate pe rețelele neuronale artificiale cât și metode de tip Fuzzy Logic.

Aplicație LabVIEW pentru monitorizarea și analiza datelor EEG

Aspectele prezentate în cadrul secțiunii 7.4.2, privind descrierea aplicației LabVIEW dezvoltate, se bazează pe informațiile publicate de autoarea acestei teze, sub forma unei lucrări științifice, indexate în baza de date ISI – Web of Science. Începând cu data de 27 Aprilie 2023, lucrarea [401] a putut fi accesată la link-ul DOI: <https://doi.org/10.3991/ijoe.v19i05.37857>. Prin urmare, lucrarea menționată a fost publicată în *International Journal of Online and Biomedical Engineering*, volumul 19, numărul 5, anul 2023.

Anterior, doctoranda a publicat două versiuni inițiale de tip Preprint (restrânsă, având 33 pagini și extinsă, având 44 pagini), care pot fi accesate la acest link: <https://www.preprints.org/manuscript/202106.0016/v2>.

Demonstrațiile video privind modul de funcționare a aplicației LabVIEW propuse pot fi vizualizate pe YouTube, la următoarele link-uri: [367] și [376].

Aplicație Python pentru monitorizarea și analiza datelor EEG

Aspectele prezentate în cadrul secțiunii 7.4.3, privind descrierea aplicației Python dezvoltate, se bazează pe informațiile publicate de autoarea acestei teze, sub forma unei lucrări științifice, indexate în baza de date BDI – Springer. Începând cu data de 1 Ianuarie 2022, lucrarea [401] a putut fi accesată la link-ul DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-92328-0_84. De asemenea, lucrarea menționată a fost susținută în cadrul Conferinței Internaționale ICNBME 2021 (*The 5th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering*), Chișinău, Moldova în 3-5 Noiembrie 2021. Înregistrarea video cuprinzând prezentarea live, din timpul conferinței, poate fi vizualizată la acest link YouTube: [400] (fiind încărcată de IDSI TV).

Clipurile video cuprinzând demonstrațiile, în timp real, a principiului de funcționare și modului de utilizare ale aplicației Python propuse, pot fi vizualizate pe YouTube, la următoarele adrese: [371], [372] (încărcate de autoarea acestei teze).

Aplicație LabVIEW de tip BCI bazată pe logica Fuzzy

Aspectele prezentate în cadrul secțiunii 7.4.4, privind descrierea aplicației LabVIEW pentru detectarea amplitudinii clipirii oculare prin Logica Fuzzy, se bazează pe informațiile publicate de autoarea acestei teze, sub forma unei lucrări științifice, indexate în baza de date ISI (Web of Science) – Springer. Începând cu luna Februarie 2022, lucrarea [415] a putut fi accesată la link-ul DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-93817-8_66. Lucrarea a fost susținută în cadrul Conferinței INTER-ENG 2021 (*The 15th International Conference – Interdisciplinarity in Engineering*), organizate la Târgu Mureș, România, în perioada 7 – 8 Octombrie 2021.

Totodată, clipul video cuprinzând demonstrația, în timp real, a modului de utilizare pe care se bazează aplicația LabVIEW, prezentată în acest capitol, se regăsește la link-ul YouTube: [361].

7.5. APLICAȚII BCI PENTRU COMUNICARE ȘI TRANSMITERE MESAJE

7.5.1 Aspecte esențiale privind aplicațiile BCI dezvoltate și experimentate

Acest subcapitol prezintă rezultatele cercetărilor experimentale bazate pe o serie de aplicații originale software și hardware, de tip interfață creier-computer (BCI), implementate în LabVIEW, prin contribuția integrală adusă de autoarea acestei teze de doctorat. Aplicațiile propuse în secțiunile următoare sunt destinate sarcinilor de comunicare și informare, prin transferul mesajelor chat la nivelul unui telefon mobil inteligent, respectiv utilizarea platformelor de ortografiere, afișarea textelor la nivelul sistemelor reale sau virtuale cu LED-uri, căutarea informațiilor pe Internet, adresarea de întrebări lui Chat GPT, utilizând tehnici bazate pe detectarea biopotențialelor P300 de la casca EEG GTEC Unicorn și algoritmul de numărare a clipirilor oculare voluntare cu ajutorul căștii NeuroSky Mindwave.

Prin urmare, rezultatele obținute în acest subcapitol au determinat îndeplinirea celui de-al treilea obiectiv specific, intitulat astfel: *Proiectarea, realizarea și implementarea unor instrumente software pentru aplicații de scriere și comunicare, care să permită redactarea unor texte de la*

nivelul unei tastaturi virtuale, a unor sisteme virtuale de afișare cu LED-uri, transferul unor mesaje de chat la nivelul unei aplicații Android sau platformei ChatGPT bazate pe inteligența artificială generativă, respectiv căutarea de informații pe Internet, utilizând semnalul de control determinat de clipirile oculare voluntare sau de biopotențialele evocate vizuale de tip P300.

Aplicație BCI pentru controlul unei tastaturi virtuale

Aspectele prezentate în cadrul secțiunii 7.5.2, privind descrierea aplicației LabVIEW dezvoltate, se bazează pe informațiile publicate de autoarea acestei teze, sub forma unei lucrări științifice, indexate BDI în baza de date IOP Science. Începând cu anul 2019, lucrarea [397] a putut fi accesată la link-ul DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/514/1/012020>. De asemenea, lucrarea *Virtual keyboard based on brain-computer interface* a fost susținută în cadrul Conferinței PRASIC 2018 (*Product Design, Robotics, Advanced Mechanical & Mechatronic Systems and Innovation Conference*), organizate la Brașov, România, în perioada 9 – 10 Noiembrie 2018.

Demonstrația video, care prezintă parțial modul de funcționare pe care se bazează aplicația LabVIEW, prezentate în acest capitol, poate fi vizualizată pe YouTube, la următoarea adresă: [379].

Aplicații BCI pentru transferul mesajelor chat la smartphone cu Android

Aspectele prezentate în cadrul secțiunii 7.5.3, privind descrierea aplicației LabVIEW dezvoltate, se bazează pe informațiile publicate de autoarea acestei teze, sub forma unei lucrări științifice, indexate în baza de date ISI (Web of Science)- IEEE Xplore. Începând cu data de 10.12.2020, lucrarea [414] a putut fi accesată la link-ul DOI: <https://doi.org/10.1109/EHB50910.2020.9280193>. De asemenea, lucrarea intitulată *LabVIEW and Android BCI Chat App Controlled By Voluntary Eye-Blinks Using NeuroSky Mindwave Mobile EEG Headset* a fost susținută în cadrul Conferinței EHB 2020 (International Conference on e-Health and Bioengineering), organizate la Iași, România, în perioada 28 – 30 Octombrie 2020.

De asemenea, clipul video prezentând demonstrația în timp real a aplicației de tip interfață creier-computer, propuse în acest capitol, se regăsește pe YouTube și poate fi vizualizată, accesând următoarea adresă: [365].

Aplicații BCI pentru afișarea mesajelor text la nivelul sistemelor cu led-uri

Aspectele prezentate în cadrul secțiunii 7.5.4, privind descrierea aplicației LabVIEW dezvoltate, se bazează pe informațiile publicate de autoarea acestei teze, sub forma unei lucrări științifice, acceptate spre publicare și indexare în baza de date ISI/BDI – IOP Science. Prin urmare, lucrarea intitulată *LabVIEW Instruments for Creating Brain-Computer Interface Applications by Simulating Graphical Animations and Sending Text Messages to Virtual and Physical LEDs Based Display Systems Connected to Arduino Board* a fost susținută în cadrul Conferinței ACME 2022 (The 10th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering), organizate la Iași, România, în perioada 8 – 9 Iunie 2022.

Autorul acestei teze a încărcat pe contul personal de YouTube diverse clipuri video prezentând principiul de funcționare și modul de utilizarea pe care se bazează aplicațiile LabVIEW

originale, prezentate în acest capitol: [363], [364], [404], [405], [406], [407], [408], [416], [417], [418], [419], [425], [426], [427], [428]

Aplicație BCI pentru comunicarea cu Chat GPT utilizând P300 Speller

Aspectele prezentate în cadrul secțiunii 7.5.5, privind descrierea aplicației LabVIEW dezvoltate, se bazează pe informațiile publicate de autoarea acestei teze, sub forma unei lucrări științifice, acceptate spre publicare și indexare în baza de date ISI/BDI – Springer Link. Prin urmare, lucrarea intitulată *A Brain-Computer Interface Application based on P300 Evoked EEG Potentials for Enabling the Communication between Users and Chat GPT* a fost IMCsusținută în cadrul Conferinței IMCL 2023 (The International Conference on Interactive Mobile Communication, Technologies and Learning), organizate în Thessaloniki, Grecia, în perioada 9 – 10 Noiembrie, 2023.

Autoarea acestei teze a încărcat pe contul personal de YouTube un clip video, prezentând principiul de funcționare, modul de utilizare și experimentele desfășurate în timp real, pe care se bazează aplicația BCI originală, cuprinsă în acest capitol: [380].

Aplicație BCI pentru accesarea resurselor de Internet utilizând P300 Speller

Aspectele prezentate în cadrul secțiunii 7.5.6, privind descrierea aplicației LabVIEW dezvoltate, se bazează pe informațiile publicate de autoarea acestei teze, sub forma unei lucrări științifice, acceptate spre publicare și indexare în baza de date ISI/BDI – Springer Link. Prin urmare, lucrarea intitulată *A LabVIEW Based Brain-Computer Interface for Accessing the Internet Resources by Using the Unicorn EEG Headset and the P300 Speller board* a fost susținută în cadrul Conferinței ICL 2023 (The 26th International Conference on Interactive Collaborative Learning), organizate în Madrid, Spania, în perioada 26 – 29 Septembrie, 2023. Autoarea acestei teze a încărcat pe contul personal de YouTube diverse clipuri video, prezentând principiul de funcționare, modul de utilizare și experimentele desfășurate în timp real, pe care se bazează aplicația BCI originală, cuprinsă în acest capitol: [382], [385].

7.6. APLICAȚII BCI PENTRU CONTROLUL SISTEMELOR ROBOTIZATE

7.6.1 Aspecte esențiale privind aplicațiile BCI dezvoltate și experimentate

Acest subcapitol prezintă rezultatele cercetărilor experimentale bazate pe o serie de aplicații originale software și hardware, de tip interfață creier-computer (BCI), implementate în LabVIEW, prin contribuția integrală adusă de autoarea acestei teze de doctorat. Aplicațiile propuse în secțiunile următoare sunt destinate controlului sistemelor mecatronice, precum un robot mobil, o mână robotică, un braț robotizat cu ajutorul comenzilor determinate de clipirile oculare voluntare detectate la nivelul semnalului EEG achiziționat de la chip-ul ThinkGear al căștii NeuroSky.

Prin urmare, rezultatele obținute în acest subcapitol au determinat îndeplinirea celui de-al patrulea obiectiv specific, intitulat astfel: *Proiectarea, realizarea și implementarea unor soluții eficiente de comandă și control a unor dispozitive experimentale de tip mână robotică, braț robotizat și robot mobil.*

Aplicație BCI pentru controlul unei mâini robotice utilizând NeuroSky și Arduino

Aspectele prezentate în cadrul secțiunii 7.6.2, privind descrierea aplicației LabVIEW dezvoltate, se bazează pe informațiile publicate de autoarea acestei teze, sub forma unei lucrări științifice, indexate ISI (Web of Science), în baza de date IEEE Xplore. Începând cu anul 2019, lucrarea [420] a putut fi accesată la link-ul DOI: <https://doi.org/10.1109/EHB47216.2019.8970050>. De asemenea, lucrarea *Experimental Model of a Robotic Hand Controlled by Using NeuroSky Mindwave Mobile Headset* a fost susținută în cadrul Conferinței EHB 2019 (International Conference on e-Health and Bioengineering), organizate la Iași, România, în perioada 21 – 23 Noiembrie 2019.

Demonstrația video preliminară a modului de funcționare pe care se bazează aplicația LabVIEW, propuse în acest capitol, poate fi vizualizată pe YouTube, la următoarea adresă: [390].

Aplicație BCI pentru controlul unui braț robotic și a unui sistem mobil

Aspectele prezentate în cadrul secțiunii 7.6.3, privind descrierea aplicației LabVIEW dezvoltate, se bazează pe informațiile publicate de autoarea acestei teze, sub forma unei lucrări științifice, indexate în baza de date ISI (Web of Science)- IEEE Xplore. Începând cu data de 30.12.2021, lucrarea [402] a putut fi accesată la link-ul DOI: <https://doi.org/10.1109/EHB52898.2021.9657549>. De asemenea, această lucrare a fost susținută în cadrul Conferinței EHB 2021 (International Conference on e-HealthandBioengineering), organizate la Iași, România, în perioada 18 – 19 Noiembrie 2021.

De asemenea, pe YouTube se regăsesc câteva clipuri video, încărcate de autoarea acestei teze, în vederea prezentării, în timp real, a modului de utilizare și funcționare pe care se bazează aplicația de tip interfață creier-computer, propuse în acest capitol. Astfel, pentru vizualizarea demonstrațiilor video, pot fi accesate următoarele adrese: [366], [374], [375], [377].

Aplicație BCI pentru controlul unui robot mobil utilizând NeuroSky și Arduino

Aspectele prezentate în cadrul secțiunii 7.6.4, privind descrierea aplicației LabVIEW dezvoltate, se bazează pe informațiile publicate de autoarea acestei teze, sub forma unei lucrări științifice, indexate BDI, în baza de date IOP Science. Începând cu anul 2020, lucrarea [413] a putut fi accesată la link-ul DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/997/1/012059>. De asemenea, lucrarea *Arduino based mobile robot controlled by voluntary eye-blinks using LabVIEW GUI & NeuroSky Mindwave Mobile Headset* a fost susținută în cadrul Conferinței ACME 2020 (*The 9th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering*), organizate la Iași, România, în perioada 4 – 5 Iunie 2020.

Aplicație BCI pentru controlul unui sistem mecatronic utilizând P300 Speller

Aspectele prezentate în cadrul secțiunii 7.6.5, privind descrierea aplicației LabVIEW dezvoltate, se bazează pe informațiile publicate de autoarea acestei teze, sub forma unei lucrări științifice, care urmează să fie publicată la editura Springer și indexată BDI. Prin urmare, lucrarea intitulată *A LabVIEW and P300 Speller based Brain-Computer Interface for Controlling a Robotic*

Arm and a Mobile Robot by Using the GTEC Unicorn Headset a fost susținută în cadrul Conferinței EHB 2023 (*International Conference on e-Health and Bioengineering*), organizate la București, România, în perioada 9 – 10 Noiembrie 2023.

7.7. APLICAȚII BCI PENTRU SIMULARE ȘI ANTRENAMENT BAZATE PE MODELE 3D

7.7.1. Aspecte esențiale privind aplicațiile BCI dezvoltate și experimentate

Acest subcapitol prezintă rezultatele cercetărilor experimentale bazate pe o serie de aplicații originale software și hardware, de tip interfață creier-computer (BCI), implementate în LabVIEW, prin contribuția integrală adusă de autoarea acestei teze de doctorat. Aplicațiile propuse în secțiunile următoare sunt destinate controlului modelelor 3D, reprezentând o mână robotică, un braț robotizat, un scaun cu roțile, un scooter cu ajutorul comenzilor determinate de clipirile oculare voluntare detectate la nivelul semnalului EEG achiziționat de la chip-ul ThinkGear al căștii NeuroSky.

Prin urmare, rezultatele obținute în acest subcapitol au determinat îndeplinirea celui de-al cincilea obiectiv specific, intitulat astfel: *Proiectarea, realizarea și implementarea unor instrumente software pentru demonstrarea principiului de funcționare a interfeței creier-computer și crearea aplicațiilor de simulare sau realizarea unor medii de antrenament pentru controlul unor modele virtuale, precum un braț robotizat, o mână robotică și mini-roboți cu aspect umanoid.*

Aplicație BCI pentru controlul unei mâini robotice 3D utilizând casca EEG NeuroSky

Aspectele prezentate în cadrul secțiunii 7.7.2, privind descrierea aplicației LabVIEW dezvoltate, se bazează pe informațiile publicate de autoarea acestei teze, sub forma unei lucrări științifice, indexate ISI (Web of Science), în baza de date IEEE Xplore. Începând cu anul 2019, lucrarea [412] a putut fi accesată la link-ul DOI: <https://doi.org/10.1109/EHB47216.2019.8969941>. De asemenea, lucrarea *Simulation of a BCI System Based on the Control of a Robotic Hand by Using Eye-blinks Strength* a fost susținută de doctorandă în cadrul Conferinței EHB 2019 (International Conference on e-Health and Bioengineering), organizate la Iași, România, în perioada 21 – 23 Noiembrie 2019.

Clipurile video aferente demonstrației, în timp real, a modului de utilizare și principiului de funcționare ale aplicației LabVIEW, prezentate în acest capitol, de tip interfață creier-computer, pot fi vizualizate pe YouTube, la următoarele adrese: [368] și [378].

Aplicație BCI pentru controlul hologramelor cu Yoda utilizând NeuroSky

Aspectele prezentate în cadrul secțiunii 7.7.3, privind descrierea aplicației LabVIEW dezvoltate, se bazează pe informațiile publicate de autoarea acestei teze, sub forma unei lucrări științifice, publicate și indexate în baza de date BDI/ISI – Springer. Prin urmare, lucrarea intitulată *A LabVIEW Based Brain-Computer Interface Training Environment by Controlling Yoda Holograms Using Eye-Blinks according to an Interactive Game Framework* a fost inclusă și susținută în cadrul

Conferinței ICL 2022 (The 25th International Conference on Interactive Collaborative Learning), organizate la Vienna, Austria, în perioada 27 – 30 septembrie 2022.

Clipul video cuprinzând demonstrația, în timp real, a modului de utilizare a acestei aplicații LabVIEW, de tip interfață creier-computer, prezentate în acest capitol, se regăsește pe YouTube și poate fi vizualizat accesând adresa următoare: [403].

Aplicație BCI pentru controlul unui braț robotic 3D utilizând P300 Speller

Aspectele prezentate în cadrul secțiunii 7.7.4, privind experimentarea aplicației LabVIEW dezvoltate, se bazează pe informațiile publicate de autoarea acestei teze, sub forma a două lucrări științifice, publicate și indexate în baza de date ISI/BDI – Springer. Începând cu data de 14.09.2023, lucrarea [381] a putut fi accesată la link-ul DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-42782-4_12. De asemenea, lucrarea intitulată [381] a fost susținută în cadrul Conferinței ICNBME 2023 (The 6th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering), organizate în Chișinău, Republica Moldova, în perioada 20 – 23 Septembrie 2023. În anul 2019, doctoranda a publicat prima lucrare [421], bazată pe proiectarea și realizarea modelului 3D al brațului robotic, având o structură simplă. Lucrarea intitulată *Virtual robot arm controlled by hand gestures via Leap Motion Sensor* a fost susținută în cadrul Conferinței PRASIC 2018 (Product Design, Robotics, Advanced Mechanical & Mechatronic Systems and Innovation Conference), organizate la Brașov, în perioada 9 – 10 Noiembrie 2018.

Totodată, autorul acestei teze a încărcat pe contul personal de YouTube un clip video, prezentând modul de utilizare aplicației și realizarea în timp real a experimentelor de tip interfață creier-computer, cuprinsă în acest subcapitol: [387].

Aplicație BCI pentru controlul unui scaun cu roțile 3D utilizând P300 Speller

Aspectele prezentate în cadrul secțiunii 7.7.5, privind descrierea aplicației LabVIEW dezvoltate, se bazează pe informațiile publicate de autoarea acestei teze, sub forma unei lucrări științifice, care urmează să fie publicată și indexată în baza de date ISI/BDI – Springer. Prin urmare, lucrarea intitulată *A Brain-Computer Interface for Controlling a Wheelchair based Virtual Simulation Using the Unicorn EEG Headset and the P300 Speller Board* a fost susținută în cadrul Conferinței STE 2024 (The 21st International Conference on Smart Technologies & Education), organizate în Helsinki, Finlanda, în perioada 6 – 8 Martie 2024. Prezentarea online a lucrării, susținută de doctorandă, poate fi vizionată pe YouTube, la adresa: [395].

Totodată, autoarea acestei teze a încărcat pe contul personal de YouTube un clip video, prezentând modul de utilizare aplicației și realizarea în timp real a experimentelor de tip interfață creier-computer: [381], [389] și [392].

Aplicație BCI pentru controlul unui scooter 3D utilizând P300 Speller

În cadrul unui Hackathon Internațional – BR41N.IO [396], organizat de Compania GTEC Medical Engineering Austria, în luna Aprilie 2024, autoarea acestei teze a dezvoltat integral aplicația LabVIEW de tip interfață creier-computer, experimentată în secțiunea 7.7.6, care asigură controlul unui scooter 3D, ghidat de un robot umanoid, utilizând comenzile bazate pe biopotențialele evocate

P300, detectate la nivelul semnalelor EEG achiziționate de la casca Unicorn. Prezentarea online a proiectului, susținută de doctorandă, poate fi vizionată pe YouTube, la adresa: [394].

Aplicație BCI pentru simularea Juice Vending Machine utilizând P300 Speller

Aspectele prezentate în cadrul secțiunii 7.7.7, privind descrierea aplicației LabVIEW dezvoltate, se bazează pe informațiile publicate de autoarea acestei teze, sub forma unei lucrări științifice, publicate și indexate în baza de date ISI/BDI – Springer. Începând cu data de 16.12.2022, lucrarea (Rusanu O. A., 2023) a putut fi accesată la link-ul DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-22375-4_68. De asemenea, lucrarea intitulată *A Brain-Computer Interface-Based Simulation of Vending Machine by the Integration Between Gtec Unicorn EEG Headset and LabVIEW Programming Environment Using P300 Speller and UDP Communication* a fost susținută în cadrul Conferinței INTER-ENG 2022 (The 16th International Conference Interdisciplinarity in Engineering), organizate în Târgu Mureș, România, în perioada 6 – 7 Octombrie 2022.

Totodată, autorul acestei teze a încărcat pe contul personal de YouTube un clip video, prezentând modul de utilizare aplicației și realizarea în timp real a experimentelor de tip interfață creier-computer, cuprinsă în acest subcapitol: [387].

CAPITOLUL 8

CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE, MODUL DE VALORIFICARE A REZULTATELOR ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

8.1. CONCLUZII FINALE

Teza de doctorat, intitulată „CERCETĂRI PRIVIND UTILIZAREA INTERFEȚELOR DE TIP CREIER-COMPUTER ÎN EXTINDEREA FUNCȚIONALITĂȚII SISTEMELOR BIO-MECATRONICE”, s-a fundamentat pe importanța semnificativă pe care o prezintă, la momentul actual, tehnologia inovatoare, software și hardware, de tip interfață creier-computer în vederea optimizării sistemelor bio-mecatronice de asistare a persoanelor cu dizabilități neuromotorii.

Această teză s-a concentrat asupra realizării unor sisteme portabile, mobile, având costuri reduse, oferind un mod simplu de lucru, respectiv o interfață grafică utilizator prietenoasă, fiind destinate demonstrării și experimentării principiului de funcționare, pe care se bazează interfețele creier-computer (BCI = Brain-Computer Interface), respectiv antrenamentului și testării privind sarcinile de control cognitiv.

Concluziile finale privind modalitățile de abordare și desfășurare a cercetărilor teoretice, respectiv de realizare a cercetărilor experimentale prin implementarea și dezvoltarea unor aplicații originale de tip interfață creier-computer, efectuate în timpul studiilor de doctorat și prezentate în această lucrare, s-au concentrat asupra îndeplinirii obiectivelor tezei de doctorat.

Fiecare aplicație inclusă în teză a ilustrat contribuția originală a doctorandei prin identificarea, documentarea și implementarea unor soluții fiabile, practice, complet funcționale, atractive, portabile, simple privind diversificarea aplicațiilor de tip interfață creier-computer prin integrarea acestui domeniu științific cu extinderea funcționalității sistemelor biomecatronice, în contextul în care, inclusiv pe plan internațional, domeniul multidisciplinar al interfețelor creier-computer se confruntă cu provocări importante, cauzate de costurile ridicate ale componentelor hardware, complexitatea algoritmilor informatici și tehnologia computațională performantă necesară la analiza și clasificarea dinamicii unice cerebrale și capacității fiecărui individ de a efectua activități mentale recunoscute sub forma tiparelor standardizate de semnale corticale.

Prin urmare, la nivel internațional, cercetătorii din aria interfețelor creier-computer au obținut rezultate remarcabile cu precădere în condițiile controlate din cadrul laboratoarelor specializate, dotate cu echipamente performante, masive, costisitoare, prin efectuarea experimentelor asupra subiecților diagnosticați cu afecțiuni neuromotorii severe, care anterior au suferit o intervenție chirurgicală pentru introducerea senzorilor la nivel inter/intra-cortical, în vederea obținerii unui semnal de înaltă acuratețe.

Prima etapă a tezei de doctorat o reprezintă cercetările teoretice concretizate prin conceperea celui de-al doilea capitol - Stadiul Actual al dezvoltărilor și realizărilor obținute, la

momentul curent, în domeniul interfețelor creier-computer și celui de-al patrulea capitol – Considerațiile Teoretice privind descrierea completă, în profunzime, a elementelor necesare înțelegerii și implementării unui sistem de tip interfață creier-computer (BCI).

Studiul teoretic și analiza comparativă a tuturor metodelor, componentelor software și hardware, utilizate la obținerea unor sisteme BCI, au condus la concluzia conform căreia, la momentul actual, cercetătorii pot beneficia de oportunitatea lansării și extinderii căștilor portabile, care înglobează tehnologia avansată, ce facilitează achiziția și procesarea semnalelor electroencefalografice (EEG), deși majoritatea presupun costuri ridicate. Dispunând de aceste seturi de căști EEG, rezultă necesitatea dezvoltării unor aplicații variate, versatile, creative, eficiente și atractive, de tip interfață creier-computer, capabile să ofere sprijin și speranță privind oportunitatea unui stil de viață independent, în special persoanelor cu dizabilități neuromotorii.

De aceea, teza aceasta furnizează o serie de aplicații diverse privind extinderea funcționalității sistemelor biomecatronice (roboți mobili, braț robotizat, mână robotică, motocicletă miniaturală, corelate cu simulări virtuale bazate pe modele 3D) privind utilizarea interfețelor creier-computer și mai mult decât atât, lucrarea curentă oferă și prezintă instrumente software originale, cu funcționalități complexe, implementate în LabVIEW și Python, în vederea dezvoltării unui sistem generalizat de tip interfață creier-computer, fiind destinat căștii EEG NeuroSky Mindwave, aceasta constituind opțiunea cea mai simplă, compactă, portabilă și accesibilă din punct de vedere al costurilor, comparativ cu celelalte seturi de căști.

În plus, având în vedere că instrumentele software dezvoltate în cadrul cercetărilor de la doctorat, bazate pe tehnicile de inteligență artificială, au fost testate pe sarcina de recunoaștere a celor mai simple și precise tipare EEG, respectiv clipirile oculare voluntare, au rezultat o serie de seturi de date EEG, extinse, pentru antrenamentul rețelelor neuronale artificiale destinate detectării clipirilor oculare voluntare multiple (simple, duble, triple). Conform analizei teoretice a literaturii de specialitate, realizate în cele două capitole menționate anterior, s-a constatat absența seturilor de date EEG, care să conțină tipare specifice clipirilor oculare, executate în mod voluntar, în vederea utilizării lor ca semnale de control într-o interfață creier-computer.

Totodată, un beneficiu suplimentar al aplicațiilor LabVIEW create pentru dezvoltarea unui sistem generalizat de tip interfață creier-computer, utilizând casca EEG portabilă NeuroSky, care nu vizează o anumită aplicație, constă în furnizarea unui mediu software accesibil, simplu, rapid, eficient, versatil pentru demonstrarea, experimentarea și implementarea unui sistem BCI de către cercetătorii aflați în stadiile incipiente de explorare BCI, provenind din diverse domenii științifice, fără a necesita abilități tehnice deosebite. Acest beneficiu este totodată justificat prin caracterul multidisciplinar al aplicațiilor aferente interfețelor creier-computer.

A doua etapă a tezei de doctorat o reprezintă cercetările experimentale concretizate prin conceperea celui de-al șaptelea capitol cu subcapitolele aferente aplicațiilor BCI, care au asigurat îndeplinirea obiectivelor specifice acestei teze de doctorat.

Primul obiectiv specific al acestei teze de doctorat a constatat în proiectarea, realizarea și implementarea unor soluții eficiente de interfațare între platformele hardware (NI myRIO, Arduino, Raspberry Pi, Micro:Bit), mediile software de dezvoltare (LabVIEW, Matlab, Arduino, Python,

NodeRED) și seturile portabile (NeuroSky, Emotiv Insight, GTEC Unicorn) pentru achiziția semnalelor electroencefalografice. Îndeplinirea primului obiectiv specific al tezei a fost realizată de doctorandă prin experimentarea aplicațiilor originale, de tip interfață creier-computer, în subcapitolele 7.3.2, 7.3.3, 7.3.4, 7.3.5, 7.3.6 și 7.3.7.

În acest context, **subcapitolul 7.3.2** a prezentat experimentarea aplicației LabVIEW de tip interfață creier-computer (BCI) pentru controlul unui robot mobil, utilizând setul EEG NeuroSky și platforma NI myRIO cu tehnologie FPGA. Se remarcă integrarea eficientă, în timp real, a celor trei niveluri de programare: interfața grafică de la nivelul computer-ului, care oferă feedback vizual utilizatorului și facilitează procesarea semnalelor EEG, nivelul FPGA pentru controlul componentelor/actuatoarelor conectate la NI myRIO, nivelul Real-Time pentru corelația computer – FPGA prin asocierea dintre comenzile determinate de clipirile oculare voluntare și codificarea comenzilor de deplasare a robotului mobil.

Totodată, **subcapitolul 7.3.3** a prezentat experimentarea aplicației Matlab, de tip interfață creier-computer, bazată pe integrarea dintre achiziția semnalului electroencefalografic de la casca portabilă NeuroSky și transmiterea comenzilor de control asupra prototipului experimental de tip motocicletă miniaturală, programată cu ajutorul platformei de dezvoltare Arduino Nano 33 IoT. În contextul realizărilor anterioare în domeniul interfețelor creier-computer, se remarcă unicitatea sau gradul ridicat de noutate al unei astfel de abordări sau strategii de interfațare, în mediul Matlab, între cele două componente hardware, casca EEG NeuroSky și plăcuța Arduino Nano 33 IoT. De asemenea, eficacitatea și atractivitatea aplicației prezentate sunt sporite de algoritmul pentru numărarea/cuantificarea clipirilor oculare voluntare, utilizate ca semnale precise de control pentru elaborarea comenzilor destinate schimbării direcției de deplasare a motocicletei.

De asemenea, **subcapitolul 7.3.4** a prezentat experimentarea aplicației Python, de tip interfață creier-computer, bazată pe integrarea dintre achiziția semnalului electroencefalografic brut de la biosenzorul încorporat de casca NeuroSky și elaborarea comenzilor de control asupra deplasării unui robot mobil, programat cu ajutorul platformei Raspberry Pi. Elementele de noutate privind implementarea acestei aplicații au constatat în realizarea secvențelor de cod pentru facilitarea comunicației wireless între computer și plăcuța Raspberry Pi, utilizând protocolul WebSockets pentru transferul comenzilor. De asemenea, originalitatea aplicației este evidențiată prin implementarea algoritmului optimizat pentru analiza semnalului EEG brut, provenit de la biosenzorul căștii portabile NeuroSky, în vederea determinării momentului de timp când s-a înregistrat o clipire oculară voluntară și înregistrarea datelor EEG pornind de la acest moment.

Subcapitolul 7.3.5 a prezentat experimentarea aplicației NodeRED, de tip interfață creier-computer, bazată pe integrarea dintre achiziția ritmului EEG Alpha de la biosenzorul încorporat de casca Emotiv Insight și elaborarea comenzilor de control asupra matricei cu 5x5 LED-uri, programată cu ajutorul platformei Micro:Bit. Prin monitorizarea ritmului EEG Alpha, s-au evidențiat comenzile determinate de închiderea globilor oculari, respectiv deschiderea ochilor. Amplitudinea ritmului EEG Alpha se amplifică atunci când persoana închide ochii și se diminuează atunci când utilizatorul deschide ochii, rezultând astfel două comenzi binare necesare într-o interfață creier-computer. Integrarea dintre casca EEG Emotiv Insight și platforma online de dezvoltare NodeRED

este insuficient explorată la momentul actual în literatura științifică de specialitate BCI, ceea ce constituie un element semnificativ de noutate. De asemenea, este dificil de identificat anumite articole de cercetare, unde să se prezinte integrarea dintre platforma Micro:Bit și mediul NodeRED. Mai mult decât atât, soluția implementată de doctorandă este adaptată celei mai recente versiuni a tehnologiei Cortex V2 integrate de casca EEG Emotiv Insight. Avantajul acestei aplicații BCI dezvoltate de autoarea tezei constă în compatibilitatea cu experimentarea la distanță și posibilitatea realizării unui laborator de cercetare aflat la distanță, având în vedere faptul că datele electroencefalografice sunt achiziționate la nivelul unui Cloud Emotiv. De asemenea, mini computer-ul Micro:Bit oferă oportunitatea învățării la distanță prin utilizarea mediului virtual de dezvoltare bazat pe Microsoft MakeCode. În lucrare științifică publicată [409], [410], doctoranda a prezentat două aplicații originale, de tip interfață creier-computer, implementate în NodeRED și Python, pentru monitorizarea ritmului Alpha de la biosenzorii căștii EEG Emotiv Insight, în vederea controlului matricei cu 5x5 LED-uri încorporate de platforma Micro:Bit, respectiv robotului mobil bazat pe sistemul Raspberry Pi prin comenzile determinate de închiderea și deschiderea ochilor.

Subcapitolul 7.3.6 a prezentat experimentarea aplicației Python de tip interfață creier-computer, bazată pe detectarea clipirilor oculare voluntare la nivelul semnalului electroencefalografic detectat de biosenzorii căștii portabile Emotiv Insight în vederea transmiterii comenzilor de control asupra iluminării RGB dintr-o mini casă inteligentă bazată pe Arduino Mega, la care s-a conectat o placă de expansiune cu chip-ul WiFi ESP-12s/ESP8266. Achiziția semnalului EEG de la Server-ul Emotiv, algoritmul de detectare și numărare a clipirilor oculare voluntare s-au implementat în cadrul aplicației Python. Principala contribuție originală adusă de doctorandă la dezvoltarea acestei aplicații BCI constă în evitarea efectului de debouncing privind detectarea și cuantificarea clipirilor oculare multiple. Aprinderea în diferite culori, precum și stingerea led-ului RGB din mini casa inteligentă au fost posibile prin programarea aplicației dedicate platformei de dezvoltare Arduino Mega 2560. De asemenea, doctoranda a implementat câte o secvență de cod, bazată pe protocolul de comunicației WebSockets, atât la nivelul programului Python, cât și în script-ul Arduino. Aplicație BCI propusă în subcapitolul 7.3.6 reprezintă un prototip simplu destinat demonstrării, experimentării, înțelegerii și testării principiului de funcționare pe care se bazează interfața creier-computer. Mai mult decât atât, persoanele cu dizabilități se pot bucura de oportunitatea antrenării la domiciliul personal prin utilizarea unei căști EEG portabile și executarea clipirilor oculare voluntare pentru a controla iluminarea din casa inteligentă.

Subcapitolul 7.3.7 a prezentat experimentarea aplicației LabVIEW de tip interfață creier-computer, integrată cu platforma software oficială Unicorn P300 Speller și platforma de dezvoltare Arduino Mega, pentru detectarea și utilizarea biopotențialelor evocate P300 la controlul unui prototip experimentat pentru livrarea automată a sucurilor utilizând comenzile mentale transmise cu ajutorul căștii Unicorn cu 8 senzori EEG. Prin urmare, aplicația oficială Unicorn Speller permite identificarea simbolului selectat de utilizator, având în vedere impactul individualizat prin declanșarea biopotențialelor evocate P300. Protocolul de comunicație UDP permite transferul datelor dintre Unicorn Speller și aplicația LabVIEW, unde pachetele UDP sunt achiziționate și procesate pentru a extrage corect comanda BCI transmisă de utilizator. După aceea, aplicația LabVIEW originală, dezvoltată de doctorandă, facilitează transferul comenzilor, prin Bluetooth, la

platforma Arduino Mega, unde este rulat un program care permite activarea și dezactivarea motoarelor de curent continuu, de tip pompă de aer, acestea asigurând livrarea sucurilor selectate. Parcurgerea, selectarea și transferul comenzilor aferente livrării sucurilor dorite sunt gestionate de algoritmul de tip state-machine, implementat de doctorandă în aplicația LabVIEW. Contribuția originală a acestei aplicații BCI constă în implementarea software realizată de autoarea tezei în vederea integrării soluțiilor de achiziție, procesare și clasificare a semnalelor EEG (casca Unicorn și aplicația Unicorn P300 Speller), instrumentului LabVIEW pentru simularea automatului de sucuri și prototipului experimental de comandă și control privind livrarea sucurilor, bazat pe Arduino [355].

Al doilea obiectiv specific al acestei teze de doctorata constată în proiectarea, realizarea și implementarea unor instrumente software pentru achiziția, procesarea și clasificarea, online (în timp real) și offline, a semnalelor electroencefalografice, utilizând atât tehnici bazate pe rețelele neuronale artificiale cât și metode de tip Fuzzy Logic. Îndeplinirea celui de-al doilea obiectiv specific al tezei a fost realizată de doctorandă prin experimentarea aplicațiilor originale, de tip interfață creier-computer, în subcapitolele 7.4.2, 7.4.3, și 7.4.4.

În acest context, **subcapitolul 7.4.2** a prezentat o serie de instrumente LabVIEW, oferind diverse funcționalități complexe pentru achiziția, procesarea și clasificarea semnalului electroencefalografic brut detectat la nivelul biosenzorului NeuroSky, în timp real, prin antrenarea și testarea unor modele de rețele neuronale artificiale asupra seturilor de date electroencefalografice în vederea recunoașterii tipurilor de clipiri oculare voluntare multiple (simple, duble, triple), utilizate ca semnale precise de control în cadrul aplicațiilor de tip interfață creier-computer. Implementarea LabVIEW, prezentată în subcapitolul 7.4.2, reflectă un grad ridicat de originalitate și complexitate, prin realizarea următoarelor etape: achiziția manuală și automată a semnalului EEG brut, procesarea datelor EEG, extragerea trăsăturilor caracteristice, generarea seturilor de antrenament, pe baza combinațiilor multiple dintre cele 10 ritmuri EEG și cele 10 mărimi statistice, antrenarea modelelor de clasificare, bazate pe rețelele neuronale artificiale (ANN), respectiv testarea acestor modele ANN, considerând seturi noi cu date EEG diferite de cele utilizate la antrenamentul modelelor ANN. De asemenea, s-a implementat o aplicație LabVIEW suplimentară pentru rularea și evaluarea, în timp real, a modelelor ANN rezultate. Totodată, subcapitolul 7.4.2 include date experimentale extinse, ce pot fi ulterior revalorificate în cadrul unor cercetări echivalente, în domeniul interfețelor creier-computer. Prin urmare, au rezultat $4 \times 25 = 100$ seturi de date EEG pentru antrenamentul modelelor ANN, cuprinzând $4 \times 25 \times 40 = 4000$ de înregistrări, respectiv 4000 de clipiri oculare voluntare (1000 din fiecare tip: non-clipiri, simple, duble, triple) și $4 \times 5 = 20$ seturi de date EEG pentru testarea modelelor ANN, cuprinzând $4 \times 5 \times 40 = 800$ de înregistrări, respectiv 800 de clipiri oculare voluntare multiple (200 din fiecare tip).

În continuare, încadrându-se la tematica celui de-al doilea obiectiv specific, subcapitolul 7.4.3 a prezentat experimentarea aplicațiilor Python necesare la achiziția, procesarea și clasificarea, pe baza rețelelor neuronale artificiale, a semnalului electroencefalografic detectat la nivelul biosenzorului NeuroSky și procesat în vederea detectării clipirilor oculare voluntare multiple (simple, duble, triple), utilizate ca semnale rapide și precise de control într-un sistem de tip interfață creier-computer. În contrast cu aplicațiile LabVIEW bazate pe modelele ANN, anterior prezentate la

subcapitolul 7.4.3, aplicațiile Python se caracterizează printr-o modalitate mai simplă de implementare, astfel că nu oferă funcționalitatea privind generarea combinațiilor multiple dintre ritmurile EEG și trăsăturile caracteristice (mărimile statistice) pentru generarea seturilor de date EEG pentru antrenamentul modelelor ANN. Prin urmare, s-a analizat strict semnalul EEG brut și s-au extras/calculat un număr de 7 trăsături caracteristice, rezultând $3 \times 25 = 75$ seturi de antrenament, conținând $3 \times 25 \times 40 = 3000$ de înregistrări, aferente clipirilor oculare voluntare multiple (câte 1000 din fiecare tip: simple, duble și triple). Soluția propusă în subcapitolul 7.4.3 se remarcă prin extinderea, universalitatea limbajului de programare Python, care este open-source (nu presupune achiziția unei licențe) și astfel, adoptat și preferat de o multitudine de dezvoltatori și utilizatori.

În final, la îndeplinirea celui de-al doilea obiectiv, a contribuit **subcapitolul 7.4.4**, care a prezentat dezvoltarea aplicației LabVIEW bazate pe clasificarea semnalului electroencefalografic, detectat la nivelul biosenzorului încorporat de setul NeuroSky, utilizând metoda de tip Fuzzy Logic pentru implementarea unei interfețe creier-computer destinate controlului unui robot mobil, programat cu ajutorul platformei Arduino Uno. Originalitatea aplicației LabVIEW prezentate în **subcapitolul 7.4.4** constă în anularea necesității de a apela la funcția implicită, oferită de pachetul de instrumente LabVIEW dedicat setului EEG NeuroSky, pentru determinarea sau măsurarea amplitudinii clipirii oculare voluntare. În contextul analizării semnalului EEG brut și configurării sistemului de tip Fuzzy Logic cu variabilele corespunzătoare bazate pe mărimi statistice, rezultă posibilitatea afișării, în timp real, a amplitudinii clipirii oculare și totodată, opțiunea procesării, simultane, a datelor EEG în vederea obținerii unor metrici diferite (spre exemplu: măsurarea nivelului de concentrare a atenției sau a gradului de profunzime a meditației). Elementul de noutate, constituit de utilizarea algoritmilor de tip Fuzzy Logic, implementați în LabVIEW, pentru determinarea amplitudinii clipirii oculare pe baza semnalului EEG brut, extinde și diversifică domeniul aplicațiilor, de tip interfață creier-computer, utilizând casca portabilă NeuroSky.

Al treilea obiectiv specific al acestei teze de doctorat a constatat în proiectarea, realizarea și implementarea unor instrumente software pentru aplicații de scriere și comunicare, care să permită redactarea unor texte de la nivelul unei tastaturi virtuale, a unor sisteme virtuale de afișare cu LED-uri, transferul unor mesaje de chat la nivelul unei aplicații Android sau platformei ChatGPT bazate pe inteligența artificială generativă, respectiv căutarea de informații pe Internet, utilizând semnalul de control determinat de clipirile oculare voluntare sau de biopotențialele evocate vizuale de tip P300. Îndeplinirea celui de-al treilea obiectiv specific al tezei a fost realizată de doctorandă prin experimentarea aplicațiilor originale, de tip interfață creier-computer, în subcapitolele 7.5.2, 7.5.3, 7.5.4, 7.5.5, și 7.5.6.

În acest context, **sucapitolul 7.5.2** a prezentat dezvoltarea unui instrument software LabVIEW pentru facilitarea aplicațiilor de scriere, prin redactarea unor mesaje/texte de către persoanele cu dizabilități neuromotorii. Aplicația LabVIEW, prezentată în capitolul 7.5.2, se remarcă prin versatilitate, interfața grafică utilizator prietenoasă, eficacitate și simplitate, fiind implementată pe baza principiului Divide et Impera și utilizând comenzile de selecție și tranziție la nivelul butoanelor/tastelor virtuale, pe baza efectuării clipirilor oculare voluntare. Originalitatea

acestei aplicații de tip interfață creier-computer constă în implementarea LabVIEW a metodelor de control, iar elementul de noutate îl constituie anulara limitării privind încadrarea într-un anumit interval de timp, în care utilizatorul ar trebui să execute o clipire oculară voluntară pentru a permite fie tranziția printre taste, fie selecția unei anumite taste, în vederea introducerii unui anumit caracter și redactarea unui mesaj text.

De asemenea, la îndeplinirea celui de-al treilea obiectiv specific al acestei teze de doctorat, a contribuit **subcapitolul 7.5.3**, care a prezentat dezvoltarea unor aplicații integrate, LabVIEW și Android, de tip interfață creier-computer, pentru transferul mesajelor de tip chat, pe baza protocolului de comunicație Bluetooth, între computer și smartphone. Aplicația LabVIEW, prezentată în capitolul 14, se adresează persoanelor cu dizabilități neuromotorii, care au posibilitatea efectuării clipirilor oculare voluntare în vederea generării comenzilor de selecție și tranziție la nivelul butoanelor virtuale, reprezentând emoticoane atractive, care sunt asociate unor mesaje specifice. Noutatea aplicației LabVIEW dezvoltate constă în funcționalitatea suplimentară privind sistemul de comunicare augmentativă și alternativă, datorită înglobării setului de emoticoane, reprezentate de butoanele cu imagini sugestive pentru fiecare mesaj transmis. Originalitatea subcapitolului 7.5.3 constă în modalitățile de programare din LabVIEW și Android a aplicației de scriere, pe baza interfeței creier-computer, respectiv în proiectarea interfețelor grafice, care oferă versatilitate, simplitate în utilizare și strategii inovative de control, cu ajutorul clipirilor oculare voluntare.

Subcapitolul 7.5.4 a prezentat experimentarea aplicațiilor de tip interfață creier-computer bazate pe utilizarea clipirilor oculare voluntare la controlul sistemelor de afișare, reale și virtuale, cu matrice de 8x8 LED-uri și LCD TEXT pentru redarea animațiilor grafice și deplasarea unor mesaje text. De asemenea, doctoranda a publicat rezultatele bazate pe dezvoltarea unei serii de aplicații BCI pentru controlul acestor sisteme de afișare, care au inclus suplimentar un afișor cu 7 segmente și 8 digiți pentru proiectarea unui cronometru virtual în vederea măsurării unui interval de timp, și sisteme de conversie din binar în hexazecimal sau din hexazecimal în binar, bazate pe matricea cu 8x8 LED-uri. Sistemele virtuale interactive de afișare pot fi utile la diferite aplicații în scop educațional, învățare la distanță, comunicare, divertisment sau în special la studiul și experimentarea interfețelor creier-computer prin implementarea diferitelor frecvențe luminoase la nivelul matricelor LED. Originalitatea implementărilor aduse de doctorandă prin subcapitolul 7.5.4 constă în extinderea domeniului de aplicabilitate BCI și facilitarea unor noi contribuții la nivel științific prin experimentarea, explorarea sau testarea noilor aplicații interactive și simplu de utilizat. Cercetările privind integrarea dintre interfața creier-computer și sistemele de afișare sunt insuficient explorate la acest moment, literatura de specialitate furnizând idei generale privind tastaturile virtuale de declanșare a biopotențialelor evocate P300 pentru aplicații de comunicare. Elementele de noutate, introduse de doctorandă prin dezvoltarea sistemelor de afișare, se referă la avantajul proiectării animațiilor personalizate și crearea mesajelor într-un mod rapid și prietenos.

Subcapitolul 7.5.5 a prezentat experimentarea aplicației LabVIEW de tip interfață creier-computer pentru facilitarea comunicării cu asistentul Chat GPT [393] bazat pe inteligența artificială generativă, utilizând comenzile determinate de biopotențialele evocate P300. Prin urmare, la

nivelul aplicației LabVIEW, s-au achiziționat și procesat pachetele de date UDP aferente selecției unui simbol din platforma software oficială P300 Speller, la care utilizatorul și-a concentrat atenția prin orientarea privirii asupra unui singur caracter reprezentând o anumită parte din întrebarea adresată lui Chat GPT. De asemenea, aplicația LabVIEW a permis apelul unei funcții Python destinate accesării pachetului de funcții Open AI API cu scopul de a beneficia de comunicarea în timp real cu Chat GPT, prin conectarea intrării (întrebarea adresată) și a ieșirii (răspunsul primit). Elementul de noutate constă în integrarea celor două modalități atractive de comunicare, prin detectarea biopotențialelor evocate P300 și transferul de mesaje între utilizator și Chat GPT, rezultând un instrument de învățare interactivă a modului de funcționare și utilizare pe care se bazează o interfață creier-computer. Comunicarea în timp real, într-un limbaj natural, generat de inteligența artificială, amplifică motivația persoanei cu dizabilități, care beneficiază de oportunitatea deprinderii capacității de a efectua sarcinile cognitive pentru controlul interfeței creier-computer.

Subcapitolul 7.5.6 a prezentat experimentarea aplicației LabVIEW de tip interfață creier-computer pentru facilitarea accesului la resursele de Internet ... utilizând comenzile determinate de biopotențialele evocate P300. Aplicația LabVIEW originală, dezvoltată de doctorandă în cadrul acestei teze, oferă persoanelor cu dizabilități posibilitatea de a efectua comenzi cognitive pentru a căuta informații pe Internet, precum un clip video pe YouTube, o anumită persoană pe Facebook, sau o informație semnificativă pe Google. Aceste sarcini pot fi realizate de utilizatori prin purtarea unei căști EEG GTEC Unicorn și concentrarea atenției, respectiv orientarea privirii asupra unei platforme de tipul P300 Speller, bazată pe proiectarea flash-urilor luminoase la nivelul tuturor simbolurilor reprezentând posibile selecții pentru căutarea informațiilor pe Internet. Prin urmare, elementul de noutate constând în valorificarea tehnologiei de tip interfață privind accesibilitatea la resursele web, demonstrată în cadrul aplicației cu interfață grafică prietenoasă, dezvoltată de doctorandă la un cost redus, a contribuit la amplificarea nivelului de independență a persoanelor cu dizabilități neuromotorii. Astfel, acești oameni pot beneficia de o modalitate plăcută și modernă privind accesarea rapidă și simplă a resurselor de Internet, a conținutului multimedia de calitate, dar în același timp, se pot bucura de o interacțiune naturală cu un computer. Totodată, aplicația LabVIEW, implementată de doctorandă în subcapitolul 7.5.6, constituie un instrument educațional, care poate fi utilizat la familiarizarea studenților de la programele de studii de inginerie sau introducerea în domeniul multidisciplinar de cercetare al interfețelor creier-computer.

Al patrulea obiectiv specific al acestei teze de doctorat a constat în proiectarea, realizarea și implementarea unor soluții eficiente de comandă și control a unor dispozitive experimentale de tip mână robotică, braț robotizat și robot mobil. Îndeplinirea celui de-al patrulea obiectiv specific al tezei a fost realizată de doctorandă prin experimentarea aplicațiilor originale, de tip interfață creier-computer, în subcapitolele 7.6.2, 7.6.3, 7.6.4, și 7.6.5.

În acest context, **subcapitolul 7.6.2** a prezentat experimentarea unei aplicații LabVIEW pentru implementarea unui sistem portabil de tip interfață creier-computer, bazat pe controlul unui model experimental de tip mână robotică (prototip hardware real), programat la nivelul platformei de dezvoltare Arduino Uno și controlat cu ajutorul comenzilor de selecție și tranziție, bazate pe efectuarea clipirilor oculare voluntare, care au fost detectate la nivelul semnalului EEG provenit de

la biosenzorul integrat de casca portabilă NeuroSky. Aplicația LabVIEW, prezentată în **subcapitolul 7.6.2**, oferă versatilitate, eficacitate și atractivitate, având o interfață grafică utilizator prietenoasă, oferind feedback vizual și implicând costuri reduse, având în vedere că prototipul experimental de tip mână robotică a fost conceput pornind de la un model de mână miniaturală destinată jocurilor. Originalitatea aplicației experimentată în **subcapitolul 7.6.2** constă în implementarea secvențelor de programare în mediul LabVIEW pentru controlul simultan și individual asupra segmentelor/degetelor din structura mâinii robotice. Această aplicație prezintă grad de noutate, în contextul în care literatura de specialitate oferă o evidență foarte redusă privind controlul mâinilor robotice cu ajutorul interfețelor creier-computer.

De asemenea, la îndeplinirea celui de-al patrulea obiectiv specific al acestei teze de doctorat, a contribuit **subcapitolul 7.6.3**, care a prezentat experimentarea unei aplicații LabVIEW pentru controlul unui braț robotizat, programat la nivelul sistemului NI myRIO și comandat cu ajutorul clipirilor oculare voluntare, detectate la nivelul semnalului electroencefalografic provenit de la setul EEG portabil NeuroSky. Provocările necesare a fi depășite de aplicația de tip interfață creier-computer (BCI), prezentată în **subcapitolul 7.6.3**, se referă la asamblarea mecanică și structura electronică a brațului robotizat, astfel încât să rezulte un prototip experimental funcțional și fiabil. De asemenea, obstacolele, întâlnite la implementarea aplicației BCI din **subcapitolul 7.6.3**, au constat în determinarea și implementarea modalităților de control manual și automat, privind comanda simultană sau individuală a articulațiilor/componentelor din construcția brațului robotic, astfel încât să fie posibilă inclusiv implementarea unor aplicații din viața reală. Privind din perspectiva elementului de noutate reprezentat de interfațarea dintre platforma NI myRIO, setul EEG portabil NeuroSky și a mediul software LabVIEW pentru dezvoltarea aplicației de tip interfață creier-computer, controlate cu ajutorul clipirilor oculare voluntare multiple, **subcapitolul 7.6.3** este echivalent cu **subcapitolul 7.3.2**, diferențele fiind determinate de sistemul mecatronic controlat (braț robotizat în **subcapitolul 7.6.3** și robot mobil în **subcapitolul 7.3.2**) și strategiile de control bazate pe clipirile oculare (comenzi de selecție și tranziție în **subcapitolul 7.6.3** și algoritm de numărare al clipirilor în **subcapitolul 7.3.2**). Originalitatea aplicației de tip interfață creier-computer, prezentate în **subcapitolul 7.6.3**, constă în implementarea LabVIEW a controlului manual și automat al brațului robotizat, respectiv integrarea dintre sistemul NI myRIO și setul EEG NeuroSky.

În categoria aplicațiilor realizate pentru îndeplinirea celui de-al patrulea obiectiv specific, se mai încadrează **subcapitolul 7.6.4**, care a prezentat dezvoltarea unei aplicații LabVIEW, de tip interfață creier-computer, pentru controlul unui robot mobil, programat cu ajutorul platformei Arduino Mega și comandat pe baza clipirilor oculare voluntare, detectate la nivelul semnalului electroencefalografic provenit de la biosenzorul înglobat de casca portabilă NeuroSky. Aplicația LabVIEW, prezentată în **subcapitolul 7.6.4**, este echivalentă cu aplicația LabVIEW, prezentată în **subcapitolul 7.3.2**, ambele fiind destinate controlului robotului mobil, conform direcțiilor diferite de deplasare, remarcându-se diferențe atât la nivel de implementare software, cât și la nivel de componente hardware utilizate. Prin urmare, din punct de vedere hardware, aplicația de tip interfață creier-computer (BCI) din **subcapitolul 7.3.2** a controlat robotul mobil, bazat pe sistemul NI myRIO, care conferă performanță în funcționare, posibilitatea programării în mediul LabVIEW și

integrarea comunicației Wireless, în timp ce aplicația BCI din **subcapitolul 7.6.4** a controlat robotul mobil, bazat pe platforma Arduino Mega, care este open-source, prezintă un aspect compact, oferă simplitate privind modul de utilizare și programare și facilitează conectarea unui modul suplimentar de comunicație prin Bluetooth. Totodată, din punct de vedere software, aplicația de tip interfață creier-computer din **subcapitolul 7.3.2** a fost implementată prin numărarea clipirilor oculare voluntare, comenzile de control asupra robotului mobil fiind determinate de numărul total al clipirilor, în timp ce aplicația BCI din **subcapitolul 7.6.4** a fost implementată considerând două opțiuni de selecție și tranziție la nivelul butoanelor/tastelor virtuale constituind diverse comenzi de deplasare pentru robotul mobil. Concluzionând, aplicația din **subcapitolul 7.6.4**, încadrată la cel de-al patrulea obiectiv specific al tezei de doctorat, a furnizat un sistem portabil, eficient și atractiv pentru experimentarea simplă și rapidă a tehnologiei de tip interfață creier-computer.

Subcapitolul 7.6.5 a prezentat experimentarea aplicației de tip interfață creier-computer pentru controlul unui sistem mecatronic de asistare persoanelor cu dizabilități cu ajutorul unui braț robotic bazat pe 3 grade de libertate și a unui robot mobil având roți omnidirecționale, componente mobile fiind acționate prin cele 12 comenzi determinate de biopotențialele evocate P300 detectate la nivelul senzorilor integrați de casca EEG GTEC Unicorn. Contribuțiile originale aduse de doctorandă la dezvoltarea acestui sistem de tip interfață creier-computer sunt reprezentate de implementarea aplicației LabVIEW complet funcțională și interactive, care a permis integrarea dintre platforma software oficială Unicorn P300 Speller și platforma hardware Arduino Mega. Transferul selecțiilor bazate pe biopotențialele evocate P300 dintre aplicația P300 Speller și instrumentul LabVIEW s-a realizat prin protocolul de comunicație UDP. Sistemul propus de tip interfață creier-computer, testat de subiecții voluntari și evaluat în subcapitolul 7.6.5, poate fi considerat un prototip experimental integrând toate etapele reprezentate de achiziția de semnal electroencefalografic, procesarea datelor EEG și generarea deciziilor privind controlul dispozitivelor externe de asistare a persoanelor cu dizabilități neuromotorii. De asemenea, sistemul BCI implementat de doctorandă constituie o resursă educațională semnificativă și utilă la familiarizarea studenților cu noțiunile generale pe care se bazează tehnologia de tip interfață creier-computer. Noutatea aplicației BCI din subcapitolul 7.6.5 constă în extinderea și diversificarea posibilităților de experimentare bazate pe utilizarea biopotențialelor evocate P300 în special la controlul sistemelor mecatronice sau dispozitivelor robotizate cu ajutorul comenzilor transmise de la casca EEG Unicorn, care este mai rar întâlnită în literatura de specialitate, deși oferă beneficii importante privind accesibilitatea interfețelor creier-computer chiar la domiciliul persoanelor cu dizabilități.

Al cincilea obiectiv specific al acestei teze de doctorat a constat în proiectarea, realizarea și implementarea unor instrumente software pentru demonstrarea principiului de funcționare a interfeței creier-computer și crearea aplicațiilor de simulare sau realizarea unor medii de antrenament pentru controlul unor modele virtuale, precum un braț robotizat, o mână robotică și mini-roboți cu aspect umanoid. Îndeplinirea celui de-al cincilea obiectiv specific al tezei a fost realizată de doctorandă prin experimentarea aplicațiilor originale, de tip interfață creier-computer, în subcapitolele 7.7.2, 7.7.3, 7.7.4, 7.7.5, 7.7.6, și 7.7.7.

În acest context, **subcapitolul 7.7.2** a prezentat experimentarea simulării, în mediul LabVIEW, a unei aplicații de tip interfață creier-computer (BCI), bazate pe controlul unei mâini robotice 3D cu ajutorul clipirilor oculare voluntare, detectate la nivelul semnalului electroencefalografic, obținut de la biosenzorul încorporat de casca portabilă NeuroSky. Asemenea prototipului experimental real (modelul hardware) al mâinii robotice, prezentate în **subcapitolul 7.6.2** și controlate prin integrarea dintre platforma Arduino Uno și casca EEG NeuroSky, s-a implementat controlul bazat pe clipirile oculare voluntare, care determină realizarea funcțiilor de selecție și tranziție la nivelul butoanelor virtuale, acestea constituind comenzile de control, atât simultan cât și individual, asupra segmentelor/degetelor din structura mâinii robotice virtuale.

Originalitatea aplicației evaluate în **subcapitolul 7.7.2** a constat în implementarea software în LabVIEW a construcției și controlului modelului 3D al mâinii robotice virtuale, alcătuită din cele 5 degete/segmente, fiecare dintre acestea având o structură antropomorfică. Elementele de noutate au fost reprezentate de interfațarea, în mediul LabVIEW, a tehnologiei de tip interfață creier-computer, utilizând setul EEG NeuroSky și modalitatea simplă și precisă de control, bazată pe clipirile oculare voluntare, cu animarea și modelarea 3D a mâinii robotice virtuale.

De asemenea, **subcapitolele 7.7.4, 7.7.5 și 7.7.6** au prezentat aplicații LabVIEW, de tip interfață creier-computer, bazate pe proiectarea 3D, respectiv pe controlul manual și automat al modelelor virtuale simple, ilustrând un braț robotizat cu șase grade de libertate, construit sub forma unei teleteze mobile, un scaun mobil cu roțile și un scooter condus de un robot cu aspect umanoid. Aceste aplicații de tipul simulărilor virtuale au permis implementarea unor medii interactive de antrenament cognitiv destinat persoanelor cu dizabilități neuromotorii, prin exersarea controlului asupra personajelor 3D, utilizând comenzile bazate pe biopotențialele evocate P300 în condiții de siguranță. Originalitatea instrumentelor LabVIEW a constat în noutatea integrării tuturor etapelor de complexitate ridicată (proiectarea 3D, controlul automat al modelelor virtuale, integrarea cu platforma software oficială Unicorn P300 Speller, respectiv achiziția și procesarea pachetelor de date UDP înglobând biopotențialele evocate P300) necesare la demonstrarea principiului de funcționare pe care se bazează interfața creier-computer, rezultând aplicații software inovatoare și interactive, cu interfață grafică prietenoasă, având scop didactic, un caracter educațional dar și o utilitate practică privind antrenamentul cognitiv al utilizatorilor sistemelor BCI reale.

Totodată, **subcapitolele 7.7.7 și 7.7.3** au prezentat instrumente LabVIEW, integrate cu aplicațiile Android și Arduino, de tip interfață creier-computer, bazate pe proiectarea unui sistem de afișare a hologramelor cu personajul Yoda sau a unei simulări virtuale pentru livrarea automatizată a sucurilor, în vederea asistării și antrenării la nivel cognitiv a persoanelor cu dizabilități neuromotorii prin prezentarea unui feedback vizual interactiv, bazat pe matrice cu 8x8 LED-uri pentru redarea animațiilor grafice sau ecrane LCD pentru afișarea mesajelor text, care să amplifice reușita sarcinilor de efectuare a clipirilor oculare voluntare sau de concentrare a atenției pentru detectarea corectă a biopotențialelor evocate P300. Originalitatea acestor aplicații de tip interfață creier-computer constă în atractivitatea paradigmelor de control cognitiv, bazate pe ideea de joc digital motivant, feedback vizual inovator și elementele grafice menite să capteze atenția utilizatorilor. Un element de noutate îl constituie implementarea în mediul de programare LabVIEW

a strategiei de corelare a execuției clipirilor oculare voluntare cu generarea codurilor binare. De asemenea, originalitatea a fost determinată de implementarea algoritmului de achiziție și procesare a datelor UDP provenite din platforma software oficială Unicorn P300 Speller, având ca rezultat final extragerea comenzilor P300 în LabVIEW și utilizarea lor în paradigma de programare de tip state-machine pentru afișarea alternativă a imaginii cu suc selectat. Totodată, se remarcă originalitatea integrării sistemelor hardware (casca EEG NeuroSky, smartphone cu sistem de operare Android, platforma Arduino Mega) și software (mediul LabVIEW, mediul MIT App Inventor, mediul Arduino IDE, platforma oficială Unicorn P300 Speller) pentru conceperea unor aplicații simple de tip interfață creier-computer, având rolul de simulări virtuale sau medii de antrenament destinate persoanelor cu dizabilități neuromotorii.

8.2. CONTRIBUȚII ORIGINALE

Teza de doctorat, intitulată „CERCETĂRI PRIVIND UTILIZAREA INTERFEȚELOR DE TIP CREIER-COMPUTER ÎN EXTINDEREA FUNCȚIONALITĂȚII SISTEMELOR BIO-MECATRONICE”, cuprinde următoarele contribuții originale, elemente de noutate și aspecte suplimentare, personale, elaborate de autor, în cadrul etapelor de cercetare teoretică și experimentală:

- Realizarea unui studiu bibliografic exhaustiv (s-au considerat 536 referințe bibliografice) privind analogia sistem nervos – computer, descrierea sistemelor de tip interfață creier-computer și considerațiile teoretice necesare la implementarea unei astfel de tehnologii;
- Sistematizarea conținutului teoretic și experimental al informațiilor existente la momentul actual, privind descrierea, clasificarea, limitările, alcătuirea/structura generală, modalitățile de achiziție a semnalelor corticale, tipurile de biopotențiale EEG evocate, sarcinile de control și aplicațiile asociate cu interfețele creier-computer;
- Susținerea punctului de vedere privind actualele probleme/provocări, aferente domeniului științific al interfețelor creier-computer, care au constituit fundamentul direcțiilor de cercetare ale tezei de doctorat;
- Proiectarea, realizarea, implementarea și experimentarea sistemelor portabile de tip interfață creier-computer, utilizând căștile EEG NeuroSky, Emotiv Insight și GTEC Unicorn, compacte, fiabile, având performanțe tehnologice ridicate și costuri acceptabile, pentru extinderea funcționalității sistemelor bio-mecatronice, prin controlul unor prototipuri experimentale (roboți mobili, mână robotică, braț robotizat, mini casă inteligentă și motocicletă miniaturală, automat programabil pentru livrarea sucurilor) și pentru obținerea unor medii de antrenament prin dezvoltarea simulărilor virtuale, care au inclus controlul modelelor 3D (roboți mobili, mână robotică, braț robotizat, scaun cu roțile, scooter condus de un robot cu aspect umanoid) și a hologramelor cu Yoda la nivelul unei piramide optice;
- Crearea, implementarea, execuția cu succes, în timp real, și experimentarea unui algoritm, de tip state-machine pentru numărarea clipirilor oculare voluntare, reprezentând comenzile în interfața creier-computer, prin dezvoltarea secvențelor originale de programare în mediul de instrumentație virtuală LabVIEW;
- Crearea, implementarea, execuția cu succes, în timp real, și experimentarea algoritmului bazat pe definirea funcțiilor personalizate în mediul Matlab, pentru numărarea clipirilor

oculare voluntare, reprezentând comenzile din interfața creier-computer utilizată la generarea comenzilor de control asupra motocicletă miniaturale;

- Crearea, implementarea, execuția cu succes, în timp real, și experimentarea algoritmului bazat pe Logica Fuzzy din LabVIEW pentru măsurarea sau determinarea amplitudinii ori a intensității clipirii oculare, detectate prin analiza semnalului electroencefalografic brut, achiziționat de la nivelul biosenzorului încorporat de casca portabilă NeuroSky;
- Crearea, implementarea, execuția cu succes, în timp real, și experimentarea unui algoritm optimizat, bazat pe analiza în Python a semnalului electroencefalografic brut, detectat la nivelul biosenzorului NeuroSky, în vederea recunoașterii clipirilor oculare voluntare;
- Crearea, implementarea, execuția cu succes, în timp real, și experimentarea unui algoritm, de tip state-machine, în LabVIEW, pentru utilizarea clipirilor oculare voluntare, simple și duble, în vederea obținerii comenzilor de tranziție, selecție și evidențierea tastelor semnificând diverse comenzi într-un sistem de tip interfață creier-computer, respectiv în cadrul aplicațiilor care au permis controlul următoarelor dispozitive: mâna robotică – model real, mâna robotică – model virtual, brațul robotizat, robotul mobil, paleta de emoticoane pentru transferul mesajelor chat și tastatura virtuală pentru scrierea textelor;
- Crearea, implementarea, execuția cu succes, în timp real, și experimentarea unui algoritm, de tip Divide et Impera, în LabVIEW, pentru controlul unei tastaturi virtuale, în vederea tranziției, selecției, evidențierii treptate, pe niveluri intermediare, fiind parcurse întâi rândurile de taste, apoi jumătățile fiecărui rând de butoane și în final, ajungându-se la o anumită tastă asociată unui caracter particular, rezultând posibilitatea conceperii cuvântului dorit de subiect;
- Crearea, implementarea, execuția cu succes, în timp real, și experimentarea unei aplicații LabVIEW, de tip interfață creier-computer, având caracter generalizat, prin realizarea următoarelor etape: modul manual și automat de achiziție a semnalului electroencefalografic brut detectat de biosenzorul NeuroSky, procesarea semnalului EEG brut în vederea obținerii ritmurilor EEG în domeniile timp și frecvență, reprezentarea grafică a variațiilor semnalelor EEG în timp și frecvență, extragerea trăsăturilor caracteristice prin calcularea mărimilor statistice, generarea celor 50 de combinații multiple între cele 10 semnale EEG selectate și cele 10 trăsături extrase, generarea celor 50 de seturi de date EEG, antrenarea, testarea și evaluarea/rularea (în timp real, printr-o aplicație LabVIEW suplimentară) a modelelor de clasificare, bazate pe rețelele neuronale artificiale, în scopul detectării clipirilor oculare voluntare multiple (simple, duble și triple);
- Crearea, implementarea, execuția cu succes, în timp real, și experimentarea unei aplicații Python, de tip interfață creier-computer, având caracter generalizat, prin realizarea următoarelor etape: achiziția semnalului EEG brut de la casca NeuroSky, procesarea semnalului EEG, extragerea trăsăturilor caracteristice prin calcularea unui set de mărimi statistice, generarea setului de date EEG, antrenarea și testarea unui model bazat pe rețelele neuronale artificiale.
- Crearea, implementarea, execuția cu succes, în timp real, și experimentarea unei aplicații LabVIEW de achiziție și procesare a pachetelor de date bazate pe protocolul de comunicație

UDP înglobând răspunsul bazat pe detectarea biopotențialelor evocate P300 în platforma software oficială GTEC Unicorn P300 Speller, în vederea extragerii comenzilor bazate pe selecția P300 pentru controlul sistemelor mecatronice (braț robotic, robot mobil, automat pentru livrarea sucurilor) de asistare a persoanelor cu dizabilități neuromotorii, modelelor 3D (braț robotic, scaun cu roțile, scooter condus de robot cu aspect umanoid) din simulările virtuale destinate antrenamentului cognitiv sau sistemelor multimedia de comunicare (adresarea întrebărilor asistentului Chat GPT și accesarea resurselor de Internet).

- Crearea, implementarea, execuția cu succes, în timp real, și experimentarea unor secvențe de programare Python și Arduino, bazate pe protocolul de comunicație WebSockets, pentru transferul comenzilor dintre aplicațiile de tip interfață creier-computer care rulează pe un computer cu sistem de operare Windows și roboții mobili controlați de platformele hardware Raspberry Pi și Arduino Mega.
- Crearea, implementarea, execuția cu succes, în timp real, și experimentarea unei secvențe de programare NodeRED pentru transferul comenzilor la aplicația de tip interfață creier-computer controlată de platforma de dezvoltare Micro:Bit.
- Crearea, implementarea, execuția cu succes, în timp real, și experimentarea sistemelor complet funcționale de tip interfață creier-computer bazate pe integrare dintre căștile EEG portabile (NeuroSky, Emotiv Insight, GTEC Unicorn), mediile de dezvoltare software sau limbajele de programare (LabVIEW, Matlab, NodeRED, MIT App Inventor, Arduino IDE, Python) și platformele hardware (NI myRIO, Arduino – Uno, Mega, Nao 33 IoT, ESP8266, Raspberry Pi, Micro:Bit).
- Conceperea fișelor cu informațiile esențiale, etapele fundamentale, sarcinile necesare parcurgerii celor trei niveluri progresive de dificultate (începător, intermediar, avansat) și tabelele pentru completarea rezultatelor obținute la experimentarea aplicațiilor originale de tip interfață creier-computer, proiectate, dezvoltate și implementate în cadrul tezei;
- Prezentarea obiectivelor generale, descrierea principiului de funcționare, realizarea demonstrațiilor practice privind experimentarea aplicațiilor originale de tip interfață creier-computer, propuse în teză, recrutarea, instruirea și coordonarea subiecților care au acceptat în mod voluntar implicarea la sesiunile experimentale.
- Stabilirea condițiilor și pregătirea preliminară privind desfășurarea corespunzătoare a sesiunilor experimentale bazate pe testarea aplicațiilor originale de tip interfață creier-computer pentru comunicare, controlul sistemelor mecatronice, comanda modelelor 3D sau utilizarea simulărilor virtuale.
- Conceperea, aplicarea și interpretarea chestionarului de feedback adresat tuturor participanților la sesiunile experimentale bazate pe testarea performanței aplicațiilor de tip interfață creier-computer și evaluarea factorilor subiectivi privind percepțiile lăuntrice ale subiecților în timpul controlului non-convențional al sistemelor propuse prin clipirile oculare voluntare sau concentrarea atenției asupra stimulilor luminoși.
- Realizarea analizei statistice descriptiv-calitativă a tuturor rezultatelor obținute prin experimentarea interfețelor creier-computer originale de subiecții voluntari.

- Realizarea analizei statistice descriptiv-cantitativă a tuturor rezultatelor obținute prin experimentarea interfețelor creier-computer originale de subiecții voluntari.
- Realizarea analizei statistice inferențiale a tuturor rezultatelor obținute prin experimentarea interfețelor creier-computer originale de subiecții voluntari.
- Realizarea analizei multi-criteriale pentru clasificarea și evaluarea a trei soluții propuse de tip interfață creier computer pentru controlul prin efectuarea clipirilor oculare voluntare și detectarea biopotențialelor evocate a sistemelor mecatronice, modelelor 3D, simulărilor virtuale și pentru a permite comunicarea, afișarea informațiilor și transferul mesajelor text.
- Realizarea analizei SWOT pentru evaluarea aplicațiilor de tip interfață creier-computer controlate prin clipirile oculare voluntare sau biopotențialele evocate P300, din punct de vedere al utilizatorului, dezvoltatorului și cercetătorului.

8.3. VALORIFICAREA REZULTATELOR CERCETĂRII

Cercetările științifice, teoretice și experimentale, privind tema principală de doctorat, *Interfața Creier-Computer* și domeniile sale emergente, pe durata studiilor doctorale și a elaborării tezei, s-au materializat prin următoarele rezultate valorificate prin **29 de publicații**:

- 1 lucrare în Jurnal indexat ISI/WOS (Web of Science), cotat F.I. = 1.7;
- 6 lucrări în proceedings indexate ISI/WOS (Web of Science), necotate;
- 18 lucrări în proceedings indexate BDI (până la momentul actual);
- 1 lucrare acceptată spre publicare în proceedings cu indexare BDI/ISI (WOS);
- 2 lucrări de tip Preprint (publicate pe website-ul Preprints.org, platformă susținută de MDPI), bazate pe lucrarea publicată la un Jurnal indexat și cotat ISI.
- 1 lucrare trimisă spre publicare în proceedings cu indexare BDI/ISI (WOS).

Dintre acestea, autorul este: la **18 – unic autor**; la **10 – prim autor**; la **1 – coautor**.

Mai jos sunt enumerate lucrările științifice, publicate/acceptate spre publicare:

- ***Indexate ISI – Web of Science (doctoranda a obținut Web of Science H-Index = 2)***
 1. **O. A. Rușanu**, L. Cristea, M. C. Luculescu și P. A. Cotfas, "A brain-computer interface based on the integration of NI myRIO development device and NeuroSky Mindwave headset," 2018 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 444 042014, DOI: [10.1088/1757-899X/444/4/042014](https://doi.org/10.1088/1757-899X/444/4/042014).
 2. **O. A. Rușanu**, L. Cristea, M. C. Luculescu și S. C. Zamfira, "Experimental Model of a Robotic Hand Controlled by Using NeuroSky Mindwave Mobile Headset," 2019 E-Health and Bioengineering Conference (EHB), 2019, pp. 1-4, DOI: [10.1109/EHB47216.2019.8970050](https://doi.org/10.1109/EHB47216.2019.8970050).
 3. **O. A. Rușanu**, L. Cristea și M. C. Luculescu, "Simulation of a BCI System Based on the Control of a Robotic Hand by Using Eye-blinks Strength," 2019 E-Health and Bioengineering Conference (EHB), 2019, pp. 1-4, DOI: [10.1109/EHB47216.2019.8969941](https://doi.org/10.1109/EHB47216.2019.8969941).
 4. **O. A. Rușanu**, L. Cristea și M. C. Luculescu, "LabVIEW and Android BCI Chat App Controlled By Voluntary Eye-Blinks Using NeuroSky Mindwave Mobile EEG Headset," 2020

- International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB), 2020, pp. 1-4, DOI: [10.1109/EHB50910.2020.9280193](https://doi.org/10.1109/EHB50910.2020.9280193).
5. **O. A. Rușanu**, "The Development of a Brain-Computer Interface for Controlling a Robotic Arm and a Mobile Device by Using the Voluntary Eye Blinking," 2021 International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB), 2021, pp. 1-4, DOI: [10.1109/EHB52898.2021.9657549](https://doi.org/10.1109/EHB52898.2021.9657549).
 6. **O.A.Rușanu**, (2022). A Fuzzy Logic-Based LabVIEW Implementation Aimed for the Detection of the Eye-Blinking Strength Used as a Control Signal in a Brain-Computer Interface Application. In: Moldovan, L., Gligor, A. (eds) The 15th International Conference Interdisciplinarity in Engineering. Inter-Eng 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 386. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93817-8_66.
 7. **Rușanu, O. A.** (2023). A LabVIEW Instrument Aimed for the Research on Brain-Computer Interface by Enabling the Acquisition, Processing, and the Neural Networks based Classification of the Raw EEG Signal Detected by the Embedded NeuroSky Biosensor. International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE), 19(05), pp. 57–81. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v19i05.37857> cotat F.I. = 1.7.
- **Indexate BDI – considerate, pe viitor, spre indexare în Web of Science**
8. **O.A.Rușanu** (2022). Python Implementation for Brain-Computer Interface Research by Acquiring and Processing the NeuroSky EEG Data for Classifying Multiple Voluntary Eye-Blinks. In: Tiginyanu, I., Sontea, V., Railean, S. (eds) 5th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering. ICNBME 2021. IFMBE Proceedings, vol 87. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92328-0_84.
 9. **O.A. Rușanu** (2022). A Brain-Computer Interface for Controlling a Mobile Assistive Device by Using the NeuroSky EEG Headset and Raspberry Pi. In: Tiginyanu, I., Sontea, V., Railean, S. (eds) 5th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering. ICNBME 2021. IFMBE Proceedings, vol 87. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92328-0_31.
 10. **Rusanu, O.A., Rosca, I.C.** (2023). A LabVIEW Application Implemented for Simulating the Working Principle of the Brain-Computer Interface. In: Auer, M.E., El-Seoud, S.A., Karam, O.H. (eds) Artificial Intelligence and Online Engineering. REV 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 524. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17091-1_63
 11. **O.A. Rușanu**, "LabVIEW Instruments for Creating Brain-Computer Interface Applications by Simulating Graphical Animations and Sending Text Messages to Virtual and Physical LEDs Based Display Systems Connected to Arduino Board," The 10th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering (ACME 2022), Iași, România, DOI: [10.1088/1757-899X/1262/1/012037](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1262/1/012037)
 12. **Rușanu, O.A., Roșca, I.C.** (2023). A LabVIEW Based Brain-Computer Interface Training Environment by Controlling Yoda Holograms Using Eye-Blinks According to an Interactive Game Framework. In: Auer, M.E., Pachatz, W., Rüttemann, T. (eds) Learning in

- the Age of Digital and Green Transition. ICL 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 634. Springer, Cham. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-26190-9_107
13. **O. A. Rușanu**, "A Python-based Brain-Computer Interface Application for Controlling An Intelligent Houseby Using Emotiv Insight EEG Headset and Arduino Mega Development Board," 2022 E-Health and Bioengineering Conference (EHB), Iasi, Romania, 2022, pp. 1-4, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EHB55594.2022.9991302>.
 14. **Rusanu, O.A.** (2024). A LabVIEW Based Brain-Computer Interface Application for Controlling a Virtual Robotic Arm Using the P300 Evoked Biopotentials and the EEG Bandpower Rhythms Acquired from the GTEC Unicorn Headset. In: Sontea, V., Tiginyanu, I., Railean, S. (eds) 6th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering. ICNBME 2023. IFMBE Proceedings, vol 92. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42782-4_12.
 15. **Rușanu, O.A.** (2023). A Brain-Computer Interface-Based Simulation of Vending Machine by the Integration Between Gtec Unicorn EEG Headset and LabVIEW Programming Environment Using P300 Speller and UDP Communication. In: Moldovan, L., Gligor, A. (eds) The 16th International Conference Interdisciplinarity in Engineering. Inter-Eng 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 605. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22375-4_68.
- **Indexate BDI (doctoranda a obținut Scopus H-Index = 4 și Google Academic H-Index = 5)**
16. P.A. Cotfas, D.T. Cotfas. **O.A. Rușanu**, M.C. Luculescu, "Energy and Mechatronics Applications based on NI myRIO," 2017International Conference on Control Engineering andMechanical Design (CEMD), ASME Press, 2018, DOI: https://doi.org/10.1115/1.861677_ch23.
 17. **O.A. Rușanu**, L. Cristea, M.C. Luculescu, P.A. Cotfas și D.T. Cotfas, "Virtual robot arm controlled by hand gestures via Leap Motion Sensor," 2019 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 514 012021, DOI: [10.1088/1757-899X/514/1/012021](https://doi.org/10.1088/1757-899X/514/1/012021).
 18. **O.A. Rușanu**, L. Cristea, M.C. Luculescu, P.A. Cotfas și D.T. Cotfas, "Virtual keyboard based on a brain-computer interface, " 2019 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 514 012020, DOI: [10.1088/1757-899X/514/1/012020](https://doi.org/10.1088/1757-899X/514/1/012020).
 19. **O.A. Rușanu**, L. Cristea și M.C. Luculescu, "Arduino based mobile robot controlled by voluntary eye-blinks using LabVIEW GUI & NeuroSky Mindwave Mobile Headset," 2020 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 997 012059, DOI: [10.1088/1757-899X/997/1/012059](https://doi.org/10.1088/1757-899X/997/1/012059).
 20. **Rusanu, O.A.** (2024). A LabVIEW Based Brain-Computer Interface for Accessing the Internet Resources by Using the Unicorn EEG Headset and the P300 Speller Board. In: Auer, M.E., Cukierman, U.R., Vendrell Vidal, E., Tovar Caro, E. (eds) Towards a Hybrid, Flexible and Socially Engaged Higher Education. ICL 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 911. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53382-2_49

21. **Rușanu, O.A.** (2023). The Development of Brain-Computer Interface Applications Controlled by the Emotiv Insight Portable Headset Based on Analyzing the EEG Signals Using NODE-Red and Python Programming Software Tools. In: Auer, M.E., Langmann, R., Tsiatsos, T. (eds) Open Science in Engineering. REV 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 763. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42467-0_82.
 22. **Rusanu, O.A.** (2024). A Brain-Computer Interface Application Based on P300 Evoked EEG Potentials for Enabling the Communication Between Users and Chat GPT. In: Auer, M.E., Tsiatsos, T. (eds) Smart Mobile Communication& Artificial Intelligence. IMCL 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 937. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-56075-0_22.
 23. **Rușanu, O.A.** (2024). A P300 Based Brain-Computer Interface LabVIEW Instrument for Controlling an Experimental Prototype of Juices Vending Machine Using the Unicorn EEG Headset. In: Moldovan, L., Gligor, A. (eds) The 17th International Conference Interdisciplinarity in Engineering. Inter-ENG 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 929. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54674-7_31.
 24. **Rusanu, O.A.** (2024). A Brain-Computer Interface for Controlling a Wheelchair Based Virtual Simulation Using the Unicorn EEG Headset and the P300 Speller Board. In: Auer, M.E., Langmann, R., May, D., Roos, K. (eds) Smart Technologies for a Sustainable Future. STE 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1028. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61905-2_41.
- ***Proceedings – Conferință Internațională cu Comitet de Recenzori***
 25. **O. A. Rușanu, L. Cristea și M. C. Luculescu.** "The development of a BCI prototype based on the integration between NeuroSky Mindwave Mobile EEG headset, Matlab software environment and Arduino Nano 33 IoT board for controlling the movement of an experimental motorcycle". 11th International Conference on Information Science and Information Literacy, Sciendo , 2021, pp. 290-297. https://a2cd4c1f-8133-4c71-8153-8a8fdceba5de.filesusr.com/ugd/72b03a_07de0f31c17049dfb341de427637a545.pdf
 - ***Acceptate spre publicare – Proceedings Indexate BDI/ISI***
 26. **Rusanu, O.A.,** A LabVIEW and P300 Speller based Brain-Computer Interface for Controlling a Robotic Arm and a Mobile Robot by Using the GTEC Unicorn Headset, The 11th International Conference on e-Health and Bioengineering. EHB 2023. https://www.ehbconference.ro/Portals/0/EHB%202023_Detailed_Program.pdf
 - ***Publicații – Format Preprint***
 27. **O.A. Rușanu,** "Advanced LabVIEW Applications Aimed for the Acquisition, Processing and Classification of the Electroencephalographic Signals Used in a Brain-Computer Interface System". Preprints 2021, 2021060016 (doi: 10.20944/preprints202106.0016.v1).
 28. **O.A. Rușanu,** "A LabVIEW Instrument Aimed for the Research on Brain-Computer Interface by Enabling the Acquisition, Processing, and the Neural Networks based

Classification of the Raw EEG Signal Detected by the Embedded NeuroSky Biosensor".
Preprints 2021, 2021060016 (doi: [10.20944/preprints202106.0016.v2](https://doi.org/10.20944/preprints202106.0016.v2)).

Trimise spre publicare – Proceedings Indexate BDI/ISI

29. O.A. Rușanu, "A P300-based Brain-Computer Interface to Control a 3D LabVIEW Simulation using GTEC Unicorn P300 Speller Aimed at Cognitive Training", International Conference on User-System Interaction, 19-20 Septembrie, Constanța, România.

8.4. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Rezultatele teoretice și experimentale, obținute în cadrul acestei teze de doctorat, constituie fundamentul și premisele elaborării noilor direcții de cercetare privind extinderea funcționalității sistemelor bio-mecatronice prin implementarea, utilizarea, testarea și optimizarea sistemelor de tip interfață creier-computer. Prin urmare, direcțiile viitoare de cercetare, în domeniul tezei de doctorat, descrise și enumerate mai jos, vor fi abordate pe parcursul etapelor ulterioare din cariera universitară la care aspiră doctoranda:

- 🔗 Studiul teoretic și analiza experimentală comparativă privind diferitele căști portabile (Emotiv Insight, Emotiv EpochX, GTEC Unicorn, Muse, NeuroSky) pentru achiziția datelor EEG utilizate ca semnale de control într-o interfață creier-computer;
- 🔗 Studiul teoretic, implementarea și experimentarea metodelor avansate de procesare și clasificare a semnalului EEG brut în vederea recunoașterii tipurilor variate de clipiri oculare voluntare:
 - efectuate cu ambii ochi sau separat cu un singur ochi;
 - având durată mai mică sau mai mare, fiind mai scurte sau mai lungi;
 - voluntare sau involuntare;
 - caracterizate prin diferite amplitudini (domoale, medii, puternice);
- 🔗 Implementarea metodelor pentru învățarea automată, de tip machine learning (SVM = supported vector machines și LR = logistic regression), în cadrul aplicației LabVIEW, având scop generalizat de clasificare a diverselor sarcini mentale;
- 🔗 Extinderea tipurilor de trăsături specifice, prin adăugarea unor noi metode de extragere a caracteristicilor, în aplicația LabVIEW, având scop generalizat, privind clasificarea unei varietăți de sarcini mentale;
- 🔗 Optimizarea structurii mecanice și electronice a sistemelor bio-mecatronice de tip prototip experimental pentru: brațul robotizat, mâna robotică, robotul mobil, motocicletă miniaturală, casa inteligentă și automatul de livrare a sucurilor;
- 🔗 Diversificarea modalităților de control (manual, automat, hibrid) a sistemelor bio-mecatronice de tip prototip experimental pentru: brațul robotizat, mâna robotică, robotul mobil, motocicletă miniaturală, casa inteligentă și automatul de sucuri;
- 🔗 Dezvoltarea unei interfețe creier-computer, bazate pe imaginarea motorie, pentru controlul unui sistem bio-mecatronic destinat reabilitării post-AVC a mișcărilor membrilor superioare sau inferioare;

- ✚ Optimizarea strategiilor de control, bazate pe biopotențialele evocate (P300 sau SSVEP), pentru implementarea comenzilor asupra unei interfețe creier-computer;
- ✚ Integrarea și experimentarea metodelor de control, bazate pe imaginarea motorie sau concentrarea atenției, pentru implementarea comenzilor într-o interfață creier-computer, simplă, de tip prototip experimental;
- ✚ Dezvoltarea unei simulări interactive, versatile și performante, bazate pe realitatea augmentată sau realitatea virtuală, utilizând mediul de programare Unity, pentru antrenamentul cognitiv necesar experimentării unei interfețe creier-computer;
- ✚ Dezvoltarea unor aplicații de tip interfață creier-computer pentru ameliorarea, terapia sau reorganizarea structurilor corticale prin dezvoltarea tehnicilor de neurofeedback în vederea anulării efectelor negative cauzate de tulburări afective.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

3. Abdalsalam, E. Y. (2017). Modulation of sensorimotor rhythms for brain-computer interface using motor imagery with online feedback. *Signal, Image and Video Processing Journal*, vol. 12, 557 - 564.
8. Agarwal, M. S. (2019). BLINK: A Fully Automated Unsupervised Algorithm for Eye-Blink Detection in EEG Signals. 57th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. Monticello, IL, USA: Allerton Park and Retreat Center.
Devices . Sensors, Vol. 19, 3042.
32. Awale, K. C. (2017). Real Time and Development of Brain Computer Interface for Home Appliance Using LabVIEW. *Int. Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*.
41. Basu, P. D. (2010). Fast, Bio-Inspired Synchronization of Periodic Events? *CiteSeer X - Computer Science*.
45. Berger, H. (1938). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. XIV. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten*, 407–431.
68. Chamayil, B. S. (2010). Virtual keyboard BCI using Eye blinks in EEG . The 6th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (pg. 466-470). Niagara Falls, ON, Canada: IEEE.
69. Chambayil, B. S. (2010). EEG Eye Blink Classification Using Neural Network. *Proceedings of the World Congress on Engineering*. London, U.K.
86. Cincotti, F. M. (2008). High-resolution EEG techniques for brain-computer interface applications. *Journal of Neuroscience Methods*, Vol. 167, 31 - 42.
87. Cincotti, F. M. (2008). Non-invasive brain-computer interface system: towards its application as assistive technology. *Brain Research Bulletin*, Vol. 75, 796 - 803.
92. Cotfas, P. C. (2018). Energy and Mechatronics Applications based on NI myRIO . *International Conference on Control Engineering and Mechanical Design*. China: ASME Press.
98. Delorme, A. M. (2004). EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including inde-pendent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, 9-21.
100. Desney, S. N. (2010). *Brain-Computer Interfaces. Applying our Minds to Human-Computer Interaction*. London: Springer-Verlag.
103. Dobosz, K. S. (2017). Touchless Virtual Keyboard Controlled by Eye Blinking and EEG Signals. *The International Conference on Man-Machine Interactions (ICMMI)* (pg. 52-61). Kraków, Polonia: Springer.
104. Dong, E. L. (2017). Classification of multi class motor imagery with a novel hierarchical SVM algorithm for brain-computer interfaces. *Med Biol Eng Comput - Springer*, 1809–1818.
108. Driver, L. (2022, 4 26). National Instruments NeuroSky. Preluat de pe <https://forums.ni.com/t5/NI-Labs-Toolkits/NeuroSky-LabVIEW-Driver/ta-p/3520085>

136. Facchinetti, T. B. (2020). Distributed architecture for a smart LEDs display system based on MQTT. The 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) (pg. 1243-1246). Vienna, Austria: IEEE.
144. Francis, W. U. (2021). Brain-Computer Interfacing for Wheelchair Control by Detecting Voluntary Eye Blinks. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI).
157. Gerhardt, G. A. (2008). Sensor Technology. Brain-Computer Interfaces. Dordrecht: Springer Netherlands, 7-29.
159. Giudice, M. V. (2020). 1D Convolutional Neural Network approach to classify voluntary eye blinks in EEG signals for BCI applications. International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). Glasgow, UK: IEEE.
168. Haddad, R. B.-F. (2019). A Novel Digital Speller Based on a Hybrid Brain Computer Interface (hBCI) SSVEP with Eye Tracking. The XXVI Brazilian Congress on Biomedical Engineering - Springer, Singapore, 593 – 601.
171. Haider, R. H. (2016). Adaptive learning with covariate shift-detection for motor imagery-based brain-computer inter. Soft Comput, 3085 – 3096.
179. Horizon, B. (2021, 11 29). Preluat de pe <http://bnci-horizon-2020.eu/community/research-groups>
183. Ieracitano, C. M. (2021). A novel explainable machine learning approach for EEG-based braincomputer interface systems. Neural Computing and Applications.
185. Instruments, N. (2022, 4 21). Analytics and Machine Learning Toolkit. Preluat de pe http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/377059B-01/lvamlconcepts/aml_overview/
187. Izzuddin, T. S. (2021). Mental imagery classification using one-dimensional convolutional neural network for target selection in single-channel BCI-controlled mobile robot. Neural Comp & App, Nr. 33, 6233–6246.
192. Jia, L. T. (2022). Domain-Aware Neural Architecture Search for Classifying Animals in Camera Trap Images. MDPI Animals - Section Wildlife, 12(4), 437.
225. Leap-Motion. (2022, 05 30). Leap Motion Controller. Preluat de pe Ultraleap: <https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/>
226. Leap-Motion. (2022, 05 30). LV MakerHub – LMC. Preluat de pe MakerHub : <https://www.labviewmakerhub.com/doku.php?id=libraries:leap:start>
227. Leap-Motion. (2022, 05 30). Working Principle. Preluat de pe Medium: <http://blog.leapmotion.com/hardware-to-software-how-does-the-leap-motion-controller-work/>
245. Liu, Y. Z. (2021). Brain-computer Interaction Enabled AAC for Visual Interactive Paradigm. International Journal on Artificial Intelligence Tools.
246. Lo, C.-C. C.-Y.-C.-H.-C.-S. (2016). A Wearable Channel Selection-Based Brain Computer Interface for Motor Imagery Detection. Sensors (Basel), Vol. 16, Nr. 2, 213.
247. López, A. F. (2017). Development of a Computer Writing System Based on EOG. Sensors, Vol. 17, 1505.
251. M.J. Aminoff, F. B. (2020). Handbook of Clinical Neurology 3rd Series - Brain-Computer Interfaces - First Edition. Amsterdam, Olanda: ELSEVIER.

256. Mahnaz, A. C. (2016). Facilitating motor imagery-based brain–computer interface for stroke patients using passive movement. *Neural Comput & Applic*, 3259 - 3272.
257. Majidov, I. W. (2019). Efficient Classification of Motor Imagery Electroencephalography Signals Using Deep Learning Methods. *Sensors*, Vol. 19, 1736.
273. Miranda, M. S. (2019). Wavelet Design for Automatic Real-Time Eye Blinks Detection and Recognition in EEG Signals. *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTERS COMMUNICATIONS & CONTROL*.
278. Musulin, J. S.-C. (2021). Application of Artificial Intelligence-Based Regression Methods in the Problem of COVID-19 Spread Prediction: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health - PubMed Central*, 18(8): 4287.
279. Mutasim, A. T. (2018). Computational Intelligence for Pattern Recognition in EEG Signals. *Studies in Computational Intelligence*, Vol. 777, Springer, Cham, 291 – 320.
283. Nagamori, S. T. (2016). ERD analysis method in motor imagery brain–computer interfaces for accurate switch input. *The 21st Int. Symposium on Artificial Life and Robotics*. Beppu, Oita.
289. NeuroSky. (2022, 4 26). EEG Biosensors. Preluat de pe <http://neurosky.com/biosensors/eeg-sensor/>
298. Nour, M. O. (2021). A novel classification framework using multiple bandwidth method with optimized CNN for brain–computer interfaces with EEG-fNIRS signals. *Neural Computing and Applications*, 15815 - 15829.
306. Original Experiment - Node-Red based Brain-Computer Interface Using LabVIEW Experimental Setup and Micro:Bit Board. (2023, Mai 18). Preluat de pe https://youtu.be/3_Fln9Z1Eac
310. Padfield, N. Z. (2019). EEG-Based Brain-Computer Interfaces Using Motor-Imagery: Techniques and Challenges. *Sensors*, Vol. 19.
321. Prem, S. W. (2021). BCI Integrated Wheelchair Controlled via Eye Blinks and Brain Waves. *Techno-Societal 2020*. Springer, Cham, 321-331.
330. Rakesh, R. S. (2016). Utilization of EEG Signal as Virtual Keyboard for Physically Disabled. *International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE)*, vol. 5, 1486 - 1491 .
331. Ramadan, R. V. (2017). Brain computer interface: control signals review. *ELSEVIER Neurocomputing Volume 223*, 26-44.
341. Rejer, I. C. (2020). RVEB—An algorithm for recognizing voluntary eye blinks based on the signal recorded from prefrontal EEG channels. *Biomedical Signal Processing and Control*.
342. Renard, Y. L. (2010). OpenViBE: An Open-Source Software Platform to Design, Test, and Use Brain–Computer Interfaces in Real and Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 35-53.
347. Rihana, S. D. (2013). EEG-Eye Blink Detection System for Brain Computer Interface. *Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation*.
353. Rusanu, I. T.-O. (2021, Noiembrie 23). A Brain-Computer Interface for Controlling a Mobile Assistive Device by Using the NeuroSky EEG. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=mcf8RSc8G3g>

354. Rusanu, O. (2022, 05 26). A LabVIEW App Implemented for Simulating the Working Principle of the Brain-Computer Interface. Preluat de pe YouTube: <https://youtu.be/b4POGPiYPOA>
355. Rusanu, O. (2024). A P300 Based Brain-Computer Interface LabVIEW Instrument for Controlling an Experimental Prototype of Juices Vending Machine Using the Unicorn EEG Headset. The 26th International Conference on Interactive Collaborative Learning (pg. 413 - 426). Madrid, Spania: Springer Cham.
356. Rusanu, O. A. (2021, Decembrie 30). A LabVIEW Instrument Aimed for the Research on Brain-Computer Interface by Enabling the Acquisition, Processing, and the Neural Networks based Classification of the Raw EEG Signal Detected by the Embedded NeuroSky Biosensor. Preluat de pe Preprints.org: <https://www.preprints.org/manuscript/202106.0016/v2>
357. Rusanu, O. A. (2021, Mai 31). Advanced LabVIEW Applications Aimed for the Acquisition, Processing and Classification of the Electroencephalographic Signals Used in a Brain-Computer Interface System. Preluat de pe Preprints.org: <https://www.preprints.org/manuscript/202106.0016/v1>
358. Rusanu, O. A. (2022, Octombrie 8). A BCI For Controlling A Mobile Assistive Device By Using The NeuroSky EEG Headset And Raspberry Pi. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=KnVpvXKPenA>
359. Rusanu, O. A. (2022, Octombrie 8). A BCI For Controlling A Mobile Assistive Device By Using The NeuroSky EEG Headset And Raspberry Pi 4. Preluat de pe YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=clmOpV_Dc1g
360. Rusanu, O. A. (2022, Decembrie 3). A Python BCI App for Controlling An Intelligent House by Using Emotiv Insight EEG Headset and Arduin. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=ApTqhM9t2To>
361. Rusanu, O. A. (2022, Octombrie 8). Arduino based Mobile Robot controlled by Eye Blinks after applying Fuzzy Logic to Raw EEG in LabVIEW. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=Mh9ibydqd5w>
362. Rusanu, O. A. (2022, Decembrie 25). BCI Demonstration Using EmotivPRO EEG Software and an Automatic LabVIEW Experimental Setup. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=PTi2KcypIF4>
363. Rusanu, O. A. (2022, Octombrie 8). Binary to Hexadecimal Conversion Algorithm Applied to an 8x8 LEDs Matrix. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=bES7e6VEhwQ>
364. Rusanu, O. A. (2022, Octombrie 8). Binary to Hexadecimal Conversion Algorithm Applied to an 8x8 LEDs Matrix. Preluat de pe YouTube: <https://youtu.be/bES7e6VEhwQ>
365. Rusanu, O. A. (2022, Octombrie 8). LabVIEW and Android based Chat Application by using Voluntary Eye Blinks Detected from the NeuroSky. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=wHYKHfo3k04>
366. Rusanu, O. A. (2022, Octombrie 8). LabVIEW Application for a Programmatic Sequence of Commands for the Automatic Control of Robotic Arm. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=HtueY9v2hFc>

367. Rusanu, O. A. (2022, Octombrie 8). LabVIEW Apps aimed for the Acquisition, Processing and Classification of EEG Signals in a BCI System. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=bmr04-QKJOg>
368. Rusanu, O. A. (2022, Octombrie 8). LabVIEW Simulation - A 3D virtual robotic hand designed and controlled in LabVIEW. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=1Dyb88vlpwA>
369. Rusanu, O. A. (2022, Decembrie 25). Node-Red based Brain-Computer Interface Using LabVIEW Experimental Setup and Micro:Bit Board. Preluat de pe YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=3_Fln9Z1Eac
370. Rusanu, O. A. (2022, Decembrie 25). Node-Red based Brain-Computer Interface Using LabVIEW Experimental Setup and Micro:Bit Board. Preluat de pe YouTube: https://youtu.be/3_Fln9Z1Eac
371. Rusanu, O. A. (2022, Octombrie 8). Python App For BCI Research By Acquiring And Processing The NeuroSky EEG Data To Classify Eye-Blinks. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=tvj8UcGbWa8>
372. Rusanu, O. A. (2022, Octombrie 8). Python App For BCI Research By Acquiring And Processing The NeuroSky EEG Data To Classify Eye-Blinks. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=MeMMj2JNUfk>
373. Rusanu, O. A. (2022, Decembrie 25). Python BCI Application for Acquiring and Monitoring the EEG Data From the Emotiv Insight Headset. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=wMtfCVFLZN8>
374. Rusanu, O. A. (2022, Octombrie 8). Real-life assisted experiment by using a robotic arm controlled by LabVIEW application and NI myRIO. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=9Ey2KTSEVL4>
375. Rusanu, O. A. (2022, Octombrie 8). Real-life experiment by using a robotic arm manually controlled by LabVIEW application and NI myRIO. Preluat de pe YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=2v_WdwToJ64
376. Rusanu, O. A. (2022, Octombrie 8). Real-Time LabVIEW App for the acquisition, feature extraction and classification of Raw EEG in a BCI. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=NkzBY3Ftt5I>
377. Rusanu, O. A. (2022, Octombrie 8). Robotic Arm Controlled by Eye Blinks Strength Using NeuroSky Mindwave Headset and NI myRIO. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=LzciNu-3Ftc>
378. Rusanu, O. A. (2022, Octombrie 8). Simulation of a BCI system based on the control of a 3D robotic hand by using eye-blink strength. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=b5CM-8obahU>
379. Rusanu, O. A. (2022, Octombrie 8). Virtual Keyboard controlled by Eye Blinks Strength using NeuroSky Mindwave Headset. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=ZxfemURZx10>

380. Rusanu, O. A. (2023, Iulie 27). A Brain-Computer Interface based on P300 EEG for Enabling Communication between Users and Chat GPT. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=ArLytlKKOD0>
381. Rusanu, O. A. (2023). A LabVIEW Based Brain-Computer Interface Application for Controlling a Virtual Robotic Arm Using the P300 Evoked Biopotentials and the EEG Bandpower Rhythms Acquired from the GTEC Unicorn Headset. The 6th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering (p. 10). Chisinau: Springer.
382. Rusanu, O. A. (2023, Iulie 1). A LabVIEW BCI to Access the Internet Resources by Using the Unicorn EEG Headset and the P300 Speller. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=YiSKKYI3C8o>
383. Rusanu, O. A. (2023). A Python-based Brain-Computer Interface Application for Controlling An Intelligent House by Using Emotiv Insight EEG Headset and Arduino Mega Development Board. E-Health and Bioengineering Conference. Iasi: IEEE Xplore.
384. Rusanu, O. A. (2023, Mai 11). AFCO 2023 Doctorat - LabVIEW Interface for GTEC Unicorn EEG Headset to Control Juice Vending Machine. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=1NnAQwQFIzU>
385. Rusanu, O. A. (2023, Iulie 1). Experimenting BCI to Access Internet Resources by Using the Unicorn EEG Headset and the P300 Speller. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=yt-3crPVXk0>
386. Rusanu, O. A. (2023, Iulie 1). LabVIEW Brain Computer Interface Prototype Integrated with GTEC P300 Unicorn Speller - Control Juice. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=znAB3j8UIUY>
387. Rusanu, O. A. (2023, Mai 11). LabVIEW Interface for Gtec Unicorn EEG Headset. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=jaQDuvpRkYk>
388. Rusanu, O. A. (2023, Mai 8). LabVIEW Interface for the GTEC Unicorn EEG Headset to Control an Experimental Juice Vending Machine. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=dyOefS4lhQA>
389. Rusanu, O. A. (2023, Decembrie 5). P300 Based BCI for Controlling 3D Wheelchair in LabVIEW Virtual Environment. Preluat de pe YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=_KIFKc8NPp8
390. Rusanu, O. A. (2023, Iunie 2). Prezentare - Aplicatie BCI pt. control mana robotica prin integrare NeuroSky EEG & Arduino Uno. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=owUD7IFci2A>
391. Rusanu, O. A. (2023, Iunie 2). Prezentare - Aplicatie BCI pt. control motocicleta prin integrarea NeuroSky EEG & Arduino Nano IoT33. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=AZHdEyMRwQM>
392. Rusanu, O. A. (2023, Decembrie 5). Unicorn P300 Speller based Brain-Computer Interface for Controlling 3D Wheelchair in LabVIEW. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=IOUyr3EHstg>
393. Rusanu, O. A. (2024). A Brain-Computer Interface Application Based on P300 Evoked EEG Potentials for Enabling the Communication Between Users and Chat GPT. International Conference

on Interactive Mobile Communication, Technologies and Learning. Thessaloniki, Grecia: Springer Cham.

394. Rusanu, O. A. (2024, Aprilie 30). BR41N IO HACKATHON 2024. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=NuW7ckuUpHk>

395. Rusanu, O. A. (2024, Martie 7). Conference STE 2024 - Oana Andreea Rusanu. Preluat de pe YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=A1FJLEdNJ_0

396. Rusanu, O. A. (2024, Iunie 11). The Brain-Computer Interface Designers Hackathon. Preluat de pe BR41N: <https://www.br41n.io/>

397. Rusanu, O. C. (2019). Virtual keyboard based on a brain-computer interface. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 514.

398. Rușanu, O. (2017). Lucrare de Disertație - Aplicație LabVIEW de tip interfață creier-computer bazată pe sistemul NI myRIO și setul de electroencefalografie NeuroSky Mindwave. Brașov.

399. Rușanu, O. (2021). A Brain-Computer Interface for Controlling a Mobile Assistive Device by Using the NeuroSky EEG Headset and Raspberry Pi. The 5th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering. Chișinău, Moldova: Springer .

400. Rușanu, O. (2021, Decembrie 13). Python Implementation for Brain-Computer Interface Research by Acquiring and Processing the NeuroSky. Preluat de pe YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=OvpY_8aD5_w

401. Rușanu, O. (2021). Python Implementation for Brain-Computer Interface Research by Acquiring and Processing the NeuroSky EEG Data for Classifying Multiple Voluntary Eye-Blinks. The 5th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering. Chișinău, Moldova: Springer.

402. Rușanu, O. (2021). The Development of a Brain-Computer Interface for Controlling a Robotic Arm and a Mobile Device by Using the Voluntary Eye Blinking. International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB). Iași, România: IEEE Xplore.

403. Rușanu, O. (2022, 6 26). A LabVIEW Based Brain-Computer Interface Game by Controlling Yoda Holograms Using Eye-Blinks. Preluat de pe YouTube: <https://youtu.be/8OV7dLKDSYo>

404. Rușanu, O. (2022, 6 18). Controlling the Augmentative and Alternative Communication System by Using Brain-Computer Interface. Preluat de pe YouTube: <https://youtu.be/HZGMh46-6kw>

405. Rușanu, O. (2022, 6 18). Interactive Display System of Messages to a Virtual 2x16 LCD TEXT. Preluat de pe YouTube: https://youtu.be/i1nD_x2qujk

406. Rușanu, O. (2022, 6 18). LabVIEW Based Simulation of Graphical Effects to Virtual 8x4 LEDs Matrix. Preluat de pe YouTube: <https://youtu.be/6vpg3RFmQTc>

407. Rușanu, O. (2022, 6 18). Simulation of the Chronometer Functionality to the Virtual 2x16 LCD TEXT. Preluat de pe YouTube: https://youtu.be/FY9x_MnaGxs

408. Rușanu, O. (2022, 6 18). The Implementation of the Virtual Chronometer as 7 Segments & 8 Digits Display. Preluat de pe YouTube: <https://youtu.be/W9OctnJt5g4>

409. Rușanu, O. (2024). The Development of Brain-Computer Interface Applications Controlled by the Emotiv Insight Portable Headset Based on Analyzing the EEG Signals Using NODE-Red and Python Programming Software Tools. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham.
410. Rușanu, O. (2024). The Development of Brain-Computer Interface Applications Controlled by the Emotiv Insight Portable Headset Based on Analyzing the EEG Signals Using NODE-Red and Python Programming Software Tools. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham.
411. Rușanu, O. A. (2018). A brain-computer interface based on the integration of NI myRIO development device and NeuroSky Mindwave headset. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 444.
412. Rușanu, O. A. (2019). Simulation of a BCI System Based on the Control of a Robotic Hand by Using Eye-blinks Strength. *The E-Health and Bioengineering Conference (EHB)*. Iași: IEEE.
413. Rușanu, O. A. (2020). Arduino based mobile robot controlled by voluntary eye-blinks using LabVIEW GUI & NeuroSky Mindwave Mobile Headset. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 997.
414. Rușanu, O. A. (2020). LabVIEW and Android BCI Chat App Controlled By Voluntary Eye-Blinks Using NeuroSky Mindwave Mobile EEG Headset. *The International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB)*. Iași: IEEE.
415. Rușanu, O. A. (2022). A Fuzzy Logic-Based LabVIEW Implementation Aimed for the Detection of the Eye-Blinking Strength Used as a Control Signal in a Brain-Computer Interface Application. *International Conference Interdisciplinarity in Engineering* (pg. 746–756). Târgu Mureș, România: Springer.
416. Rușanu, O. A. (2022, Octombrie 8). Binary to Hexadecimal Conversion Algorithm Applied to an 8x4 LEDs Matrix. Preluat de pe YouTube: <https://youtu.be/aqVogmXtF8Q>
417. Rușanu, O. A. (2022, 6 18). Hexadecimal to Binary Conversion Algorithm for Running Graphical Effects to an 8x8 LEDs Matrix. Preluat de pe YouTube: <https://youtu.be/GOWSqUNqSLw>
418. Rușanu, O. A. (2022, 6 18). LabVIEW Application for Creating LED Based Graphical Animations By Using a Brain-Computer Interface. Preluat de pe YouTube: <https://youtu.be/6ffVZoxKTyY>
419. Rușanu, O. A. (2022, Octombrie 8). Simple Design and Automatic Running of Graphical Effects Composed of Maximum Eight Animated Frames. Preluat de pe YouTube: <https://youtu.be/VEwY0Xgm4Uw>
420. Rușanu, O. C. (2019). Experimental Model of a Robotic Hand Controlled by Using NeuroSky Mindwave Mobile Headset. *The E-Health and Bioengineering Conference (EHB)*. Iași: IEEE.
421. Rușanu, O. C. (2019). Virtual robot arm controlled by hand gestures via Leap Motion Sensor. *Product Design, Robotics, Advanced Mechanical and Mechatronic Systems and Innovation Conference (PRASIC)*. Brasov: IOP Science.
422. Rușanu, O. C. (2021). The development of a BCI prototype based on the integration between NeuroSky Mindwave Mobile EEG headset, Matlab software environment and Arduino Nano 33 IoT board for controlling the movement of an experimental motorcycle. *The 11th International Conference on Information Science and Information Literacy*. Brașov: Sciendo.

425. Ruşanu, O.-A. (2022, 6 18). LabVIEW Application - Automatic Acquisition of EEG Data Using Chronometer as 7-Seg Display 8-Digit. Preluat de pe YouTube: <https://youtu.be/NZmbpTu1M3I>
426. Ruşanu, O.-A. (2022, 6 18). LabVIEW Application - Colourful Versatile SmartDisplay VirtualSIM. Preluat de pe YouTube: <https://youtu.be/Cz7x12ad2Mw>
427. Ruşanu, O.-A. (2022, 6 18). LabVIEW Application - SmartDisplay VirtualSIM - 2x16 LCD TEXT - Running Messages & Chronometer. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=nzeUrZowr2k>
428. Ruşanu, O.-A. (2022, 6 18). LabVIEW Graphical User Interface & Arduino LED Matrix with Max7219 Driver - Animated Graphic Effects. Preluat de pe YouTube: <https://youtu.be/spVPJmk5irM>
437. Saragih, A. P. (2020). Electroencephalogram (EEG) Signal Classification Using Artificial Neural Network to Control Electric Artificial Hand Movement. ICMER 2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.
438. Sarker, I. (2021). Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions. SN COMPUT. SCI. , 2, 160 .
441. Schalk, G. M. (2004). BCI2000: a general-purpose brain-computer interface (BCI) system. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1034-1043.
446. Sharma, K. J. (2020). Detection of eye closing/opening from EOG and its application in robotic arm control. ELSEVIER - Biocybernetics and Biomedical Engineering, 173-186.
451. Sivaranjani, S. (2021). Visualization of virtual environment through LabVIEW platform. Materials Today: Proceedings, Vol. 45, Partea 2,, 2306-2312.
453. Staffa, M. B. (2018). A weightless neural network as a classifier to translate eeg signals into robotic hand commands. The 27th International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN). China: IEEE .
465. Sun, X. Y. (2020). Obstacle Avoidance Algorithm for Mobile Robot Based on Deep Reinforcement Learning in Dynamic Environments. The 16th International Conference on Control & Automation (ICCA). Singapore: IEEE.
472. TheHelloiii. (2022, 05 26). Simulated ACI Tutorial. Preluat de pe YouTube : <https://www.youtube.com/watch?v=Phw9Sosz2M>
473. Tibdewal, M. N. (2015). Detection and Classification of Eye Blink Artifact in Electroencephalogram through Discrete Wavelet Transform and Neural Network. International Conference .
474. Tiwari, P. C. (2020). Sensitive Brain-Computer Interface to help manoeuvre a Miniature Wheelchair using Electroencephalography. International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS). Bhopal, India: IEEE.
476. Tran, D.-K. N.-H.-N. (2021). Detection of EEG-Based Eye-Blinks Using A Thresholding Algorithm. European Journal of Engineering and Technology Research, 6-12.
484. Varela, M. (2015). Raw EEG signal processing for BCI control based on voluntary eye blinks. The 2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXV).
496. Wang, B. Y. (2008). Brain-Computer Interfaces Based on Visual Evoked Potentials. IEEE ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY MAGAZINE.

499. Wang, J. E. (2021). Modular deep reinforcement learning from reward and punishment for robot navigation. *Neural Networks - Science Direct*, 115 - 126.
502. Wannajam S., T. W. (2018). Brain Wave Pattern Recognition of Two-Task Imagination by Using Single-Electrode EEG. *The International Conference on Computing and Information Technology*. Thailand.
512. Xiong, M. H. (2019). A Low-Cost, Semi-Autonomous Wheelchair Controlled by Motor Imagery and Jaw Muscle Activation. *The International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*. Bari, Italy: IEEE.
513. Yadav, P. ., (2019). Design of Low-Power EEG-Based Brain-Computer Interface. *SPRINGER - Advances in System Optimization and Control*, 213-221.
526. Zavala, S. Y. (2021). Controlling a Wheelchair using a Brain Computer Interface based on User Controlled Eye Blinks. *(IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications*.
527. Zhang J., H. W. (2017). Recognition of Voluntary Blink and Bite Base on Single Forehead EMG. *The International Conference on Neural Information Processing*. China.
531. Zhenrui, J. Q. (2021). A closed-loop brain-computer interface with augmented reality feedback for industrial human-robot collaboration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
532. Zhi-Hao, W. H.-F.-T.-H.-J. (2017). Controlling DC motor using eye blink signals based on LabVIEW. *The 5th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE)* (pg. 61-65). Malang: IEEE Xplore.
536. Zhu, Y. L. (2020). A Hybrid BCI Based on SSVEP and EOG for Robotic Arm Control. *Frontiers in Neurorobotics*.
537. Rusanu, O. A. (2023, Iunie 2). *Prezentare - Prezentare - Aplicatie BCI pt. control robot mobil prin integrarea Neuronal EEG & Raspberry Pi*. Preluat de pe YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=CwffHmnHQsY>