

ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE DOS AMBIENTES DE APRENDIZAJE DE SEÑALES
ELECTROENCEFALOGRÁFICAS DEL PARPADEO CON BIO-RETROALIMENTACIÓN
PARA EL DESARROLLO DE LA DESTREZA MOTRIZ EN EL CONTROL DE UN
EXOESQUELETO VIRTUAL

LUZ HELENA GONZÁLEZ SANDOVAL

JAVIER CAICEDO PEDROZO

TESIS DE GRADO

Director
Eng.D. LUIS CARLOS SARMIENTO VELA

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
MAESTRIA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN APLICADAS A LA EDUCACIÓN
BOGOTÁ
2018

ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE DOS AMBIENTES DE APRENDIZAJE DE SEÑALES
ELECTROENCEFALOGRÁFICAS DEL PARPADEO CON BIO-RETROALIMENTACIÓN
PARA EL DESARROLLO DE LA DESTREZA MOTRIZ EN EL CONTROL DE UN
EXOESQUELETO VIRTUAL

LUZ HELENA GONZÁLEZ SANDOVAL

JAVIER CAICEDO PEDROZO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN TECNOLOGÍAS DE
LA INFORMACIÓN APLICADAS A LA EDUCACIÓN

Director
Eng.D. LUIS CARLOS SARMIENTO VELA

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA MAESTRIA EN TECNOLOGÍAS DE LA
INFORMACIÓN APLICADAS A LA EDUCACIÓN
BOGOTÁ
2018

Derechos de autor

“Para todos los efectos, declaro que el presente trabajo es original y de mi total autoría; en aquellos casos en los cuales he requerido del trabajo de otros autores o investigadores, he dado los respectivos créditos”. (Artículo 42, párrafo 2, del Acuerdo 031 del 4 de diciembre de 2007 del Consejo Superior de la Universidad Pedagógica Nacional)



Este trabajo de grado se encuentra bajo una Licencia Creative


Commons de **Reconocimiento – No comercial – Compartir igual**, por lo que puede ser distribuido, copiado y exhibido por terceros si se muestra en los créditos. No se puede obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

Resumen

La hemiparesia es una condición neurológica que deriva generalmente en el debilitamiento de las extremidades de una mitad del cuerpo e inclusive en la parálisis parcial de estas, dicha condición genera consecuencias importantes en las personas que la padecen por cuanto les resta independencia, afectando con esto diferentes dimensiones del ser humano como la psicológica, la cognitiva, física, social, económica entre otras. Dada esta situación, el estudio comparativo entre dos ambientes de aprendizaje de señales electroencefalográficas del parpadeo, propone una posible solución al problema del desarrollo y fortalecimiento de la destreza motriz para el control de posición de las articulaciones de un exoesqueleto virtual, a través del contraste de dos estrategias de bio-retroalimentación, una auditiva y otra visual con el ánimo de identificar nuevas técnicas y herramientas que contribuyan en el proceso de recuperación y rehabilitación física en personas con hemiparesia para así mejorar su calidad de vida, incrementar su autonomía y facilitar su acceso al medio

Abstract

Hemiparesis is a neurological condition that usually results in the weakening the extremities of one half the body and even in the partial paralysis of these, this condition generates important consequences in people who suffer from it because that reduces their independence, affecting with this different dimensions as the psychological, cognitive, physical, social, economic and others. Therefore the comparative study between two learning environments of electroencephalographic signals of the blink, proposes a possible solution to the problem to development and strengthening the motor skill for the control position of the joints of a virtual exoskeleton, through the contrast of two strategies with bio-feedback, one auditory and another visual with the aim of identifying new techniques and tools that contribute to the process of recovery and physical rehabilitation in people with hemiparesis in order to improve their quality of life, increase their autonomy and facilitate their access in the environment.

	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 1 de 10	

1. Información General	
Tipo de documento	Tesis de grado Maestría de Investigación.
Acceso al documento	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central.
Título del documento	Estudio comparativo entre dos ambientes de aprendizaje de señales electroencefalográficas del parpadeo con bio-retroalimentación para el desarrollo de la destreza motriz en el control de un exoesqueleto virtual.
Autor(es)	Caicedo Pedrozo, Javier; González Sandoval, Luz Helena
Director	Sarmiento Vela, Luis Carlos
Publicación	Bogotá, Universidad Pedagógica Nacional, 2018, 155 p.
Unidad Patrocinante	Universidad Pedagógica Nacional
Palabras Claves	EXOESQUELETO VIRTUAL; BIORETROALIMENTACIÓN VISUAL; BIORETROALIMENTACIÓN AUDITIVA; HEMIPARESIA; ACCIDENTE CEREBROVASCULAR; SEÑALES ELECTROENCEFALOGRÁFICAS; PARPADEO; REHABILITACIÓN; FUNCIÓN MOTORA.

2. Descripción
<p>En este trabajo de investigación se implementan dos ambientes de aprendizaje de señales electroencefalográficas del parpadeo, cada uno de estos dotado de un enfoque de bio-retroalimentación distinto, uno con bio-retroalimentación visual y el otro con auditiva, para contrastar las diferencias en cuanto al desarrollo de la destreza motriz para controlar la posición y orientación de las articulaciones de un exoesqueleto virtual. Para este trabajo de investigación se seleccionó una muestra de 4 sujetos sanos que fueron divididos en los dos ambientes trabajados. Para la intervención de la experimentación se implementaron 4 fases, en las dos primeras se entrenó al sujeto para usar el dispositivo correctamente, en la tercera se debía realizar una tarea de alcance y una de captura usando el dispositivo y la última fase fue la evaluación, la cual involucró ítems presentados en el Test de Fugl-Meyer para evaluar la función de la extremidad superior. En el análisis de resultados se compararon las características principales en cuanto a eficacia, eficiencia, número de comandos ejecutados, tiempo promedio de ejecución y las estrategias implementadas por los sujetos en el cumplimiento de las tareas de los dos ambientes de aprendizaje motor con bio-retroalimentación visual y auditiva. El exoesqueleto virtual se validó con los dos grupos obteniendo un promedio de eficacia en un rango de 80% a 100%. Además, se hallaron resultados que permiten afirmar que los sujetos del grupo con bio-retroalimentación auditiva ejecutan mejor las tareas</p>

relacionadas con apuntar a un objeto y los sujetos del grupo con bio-retroalimentación visual, ejecutan mejor las tareas relacionadas con la captura de objetos lo que requiere de más precisión.

3. Fuentes

Abd, M., Mansor, W. (2009). Detection Of Eye Blinks From EEG Signals For Home Lighting System Activation.

Proceeding of the 6th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA09), Sharjah, UAE.

DOI: 10.1109/ISMA.2009.5164828

Belkacem, A., Saetia, S., Zintus-art, K., Shin, D., Kambara, H., Yoshimura, N., Berrached, N., Koike, Y. (2015).

Real-Time Control of a Video Game Using Eye Movements and Two Temporal EEG Sensors. Hindawi,

Computational Intelligence and Neuroscience. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/653639>.

Barandas, M., Gamboa, H., & Fonseca, J. M. (2015). A Real Time Biofeedback System Using Visual User Interface for Physical Rehabilitation. *Procedia Manufacturing*, 3(Ahfe), 823–828. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.337>

Batalla Flores, A. (2000). *Habilidades Motrices*. Barcelona, España: INDE publicaciones.

Bhattacharyya, S., Khasnobish, A., Ghosh, P., Mazumder, A., & Tibarewala, D. N. (2015). A review on brain imaging techniques for BCI applications. *Biomedical Image Analysis and Mining Techniques for Improved Health Outcomes*, 39.

Cano de la cuerda, R., Molero, A., Carratalá, M., Alguacil, I., Molina, F., Miangolarra, J. & Cardinali, D.(2007).

Neurociencia aplicada, Sus fundamentos. Buenos Aires, Argentina: Editorial Médica Panamericana.

Carr, J., & Shepherd, R. (2003). *Stroke Rehabilitation: Guidelines for Exercise and Training to*

Optimise Motor Skill. *Australian Journal of Physiotherapy*, 49(4), 279.
[https://doi.org/10.1016/S0004-9514\(14\)60149-5](https://doi.org/10.1016/S0004-9514(14)60149-5)

Casaño, C. (2016). Metodología de la investigación tecnológica en ingeniería. *Revista Ingenium*, 1(1), 43 – 46. <http://dx.doi.org/10.18259/ing.2016007>

Caudron, S., Guerraz, M., Eusebio, A., Gros, J. P., Azulay, J. P., & Vaugoyeau, M. (2014). Evaluation of a visual biofeedback on the postural control in Parkinson's disease. *Neurophysiologie Clinique*, 44(1), 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2013.10.134>

Chaturvedi, P., Gupta, L. (2018). Study and Detection of Eye Blink Artifacts in EEG Signals. IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science. DOI: 0.1109/SCEECS.2018.8546907.

Cordo, P., Wolf, S., Lou, J. S., Bogey, R., Stevenson, M., Hayes, J., & Roth, E. (2013). Treatment of severe hand impairment following stroke by combining assisted movement, muscle vibration, and biofeedback. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, 37(4), 194–203. <https://doi.org/10.1097/NPT.0000000000000023>

Cox, R. (2008). *Psicología del deporte: Conceptos y sus aplicaciones*. Madrid, España: Editorial Médica Panamericana.

Curtis Kathleen, A. & DeCelle Newman, K. (2005). *The PTA Handbook: Keys to Success in School and Career for the Physical Therapist Assistant*. Boston: SLACK Incorporated

Díaz Lucea, J. (1999). *La enseñanza y aprendizaje de las habilidades y destrezas motrices básicas*. Barcelona, España: INDE publicaciones.

Doan-Aslan, M., Nakipolu-Yüzer, G. F., Doan, A., Karabay, I., & Özgirgin, N. (2012). The effect

of electromyographic biofeedback treatment in improving upper extremity functioning of patients with hemiplegic stroke. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, 21(3), 187–192. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2010.06.006>

Elnady, A. M., Zhang, X., Xiao, Z. G., Yong, X., Randhawa, B. K., Boyd, L., & Menon, C. (2015). A Single-Session Preliminary Evaluation of an Affordable BCI-Controlled Arm Exoskeleton and Motor-Proprioception Platform. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00168>

Fernández, R., Rodríguez, B., Barcia, M., Souto, S., Chouza, M. y Martínez, S. (1998). Generalidades sobre feedback (o retroalimentación). *Fisioterapia*, 20(91), 3-11.

Halická, Z., Lobotková, J., Bučková, K., & Hlavačka, F. (2014). Effectiveness of different visual biofeedback signals for human balance improvement. *Gait and Posture*, 39(1), 410–414. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.08.005>

Hatem, S. M., Saussez, G., della Faille, M., Prist, V., Zhang, X., Dispa, D., & Bleyenheuft, Y. (2016). Rehabilitation of Motor Function after Stroke: A Multiple Systematic Review Focused on Techniques to Stimulate Upper Extremity Recovery. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10(September), 1–22. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00442>

Heart & Stroke Foundation Canadian Partnership for Stroke Recovery. (2016). *Fugl-Meyer Assessment of Sensorimotor Recovery After Stroke (FMA)*. Recuperado de http://www.strokengine.ca/psycho/fma_psycho/

Hemiweb asociación de hemiparesia infantil. (2015). Hemiparesia y entorno escolar. Recuperado de <http://www.hemiweb.org/web/guias/>

Hu, X. L., Tong, K. Y., Wei, X. J., Rong, W., Susanto, E. A., & Ho, S. K. (2013). The effects of

post-stroke upper-limb training with an electromyography (EMG)-driven hand robot. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 23(5), 1065–1074. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2013.07.007>

Jaramillo Sierra, L. (1999). Ciencia, tecnología, sociedad y desarrollo. Módulo 1. Series Aprender a investigar.

Kasper, D., Braunwald, E., Fauci, A., Hauser, S., Longo, D., & Jameson, J. L. (2005). *Harrison's Principles of Internal Medicine 16th Edition*. Western Journal of Medicine. McGraw-Hill Professional. <https://doi.org/10.1036/0071402357>

Kim, J. H., & Lee, B.-H. (2015). Mirror Therapy Combined With Biofeedback Functional Electrical Stimulation for Motor Recovery of Upper Extremities After Stroke: A Pilot Randomized Controlled Trial. *Occupational Therapy International*, 22(2), 51–60. <https://doi.org/10.1002/oti.1384>

León, F., Gutierrez, C., Contreras, V. El marcapasos del parpadeo en un abrir y cerrar de ojos. Recuperado de: <http://revecuatneurol.com/wp-content/uploads/2015/06/El-marcapasos-del-parpadeo-en-un-abrir-y-cerrar-de-ojos.pdf>.

Lessard, S., Pansodtee, P., Robbins, A., Trombadore, J. M., Kurniawan, S., & Teodorescu, M. (2018). A Soft Exosuit for Flexible Upper-Extremity Rehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(8), 1604–1617. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2018.2854219>

López, R., Aguilar, H., Salazar, S., Lozano, R. Y Torres, J. (2014). Modelado y Control de un Exoesqueleto para la Rehabilitación de Extremidad Inferior con dos grados de libertad. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 11, 304-314. doi:10.1016/j.riai.2014.02.008

Lozada, J. (2014). Investigación aplicada: Definición, propiedad intelectual e industria.

CienciaAmérica: Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica, 3(1), 47 - 50.

Luth, T., Ojdanic, D., Friman, O., Prenzel, O. & Graser, A. (2007). Low level control in a semi-autonomous rehabilitation robotic system via a Brain-Computer Interface. *2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Noordwijk, 721-728. doi: 10.1109/ICORR.2007.4428505

Maciaszek, J., Borawska, S., & Wojcikiewicz, J. (2014). Influence of posturographic platform biofeedback training on the dynamic balance of adult stroke patients. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, 23(6), 1269–1274. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2013.10.029>

Mant, J. & Walker, M. (Eds.). (2011). *ABC of Stroke*. Oxford, UK: Blackwell Publishing.

Micheli, F. & Fernández, P. (2010). *Neurología*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Médica Panamericana.

Minguez, J. (2012). Tecnología de Interfaz Cerebro - Computador. *Departamento de Informatica e Ingeniería de Sistemas Universidad de Zaragoza*, 1–12.

Montaño-Murillo, R., Posada-Gómez, R., Martínez-Sibaja, A., Gonzalez-Sanchez, B. E., Aguilar-Lasserre, A. A., & Cornelio-Martínez, P. (2013). Design and Assessment of a Remote Vibrotactile Biofeedback System for Neuromotor Rehabilitation Using Active Markers. *Procedia Technology*, 7, 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.04.012>

Morris, C. Y Maisto, A. (2005). *Introducción a la psicología*. México: Pearson Educación.

Mudie, M. H., and Matyas, T. A. (1996). Upper extremity retraining following stroke: effects of bilateral practice. *Neurorehabil. Neural Repair* 10, 167–184. doi: 10.1177/154596839601000304

- Nam, C. S., Choi, I., & Wadson, A. (2018). An Emerging Interaction Technology Brain – Computer Interface. In *Brain–Computer Interfaces Handbook. Technological and Theoretical Advances*.
- Navarro, M., García, J., Brito, M., Ruiz, J., Navarro, R. & Egea, A. (2001). Principales modelos explicativos del aprendizaje motor. Mecanismos y factores. *XV jornadas canarios de traumatología y cirugía ortopédica*, 15(1), 82-87.
- Pons, J. L., Ceres, R., & Calderón, L. (2008). Introduction to wearable robotics. In *Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons*.
- Rihana, S., Damien, P., Moujaess, T. (2013). EEG-Eye Blink Detection System for Brain Computer Interface. *Converging Clinical & Engineering Research on NeuroRehabilitation, BIOSYSROB 1*, pp. 605–609. DOI: 10.1007/978-3-642-34546-3_98.
- Roos, L., Harvey, L. y Lannin, N. (2009). Do people with acquired brain impairment benefit from additional therapy specifically directed at the hand? A randomized controlled trial. *Clinical Rehabilitation*, 23 , 492-503.
doi:10.1177/0269215508101733
- Sakurada, T., Kawase, T., Takano, K., Komatsu, T., & Kansaku, K. (2013). A BMI-based occupational therapy assist suit: Asynchronous control by SSVEP. *Frontiers in Neuroscience*, 7(7 SEP), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fnins.2013.00172>
- Sanabria, L. (2008). Representación espacial en invidentes estimulados de manera háptica con un dispositivo mecatrónica, DMREI y con el bastón clásico. *Tecné, Episteme y Didaxis*(24).
- Schaechter, J. (2004). Motor rehabilitation and brain plasticity after hemiparetic stroke. *Progress in Neurobiology*, 73 , 61-72. doi:10.1016/j.pneurobio.2004.04.001

Tapia, L. (2015). Valoración de la frecuencia y regularidad del parpadeo en usuarios de tablet, con y sin la incorporación de un filtro de absorbanza selectiva. Universitat Politècnica de Catalunya.

Torricelli, D. (2015). Teorías y modelos de control y aprendizaje motor. Aplicaciones clínicas en neurorrehabilitación. *Neurología*, 30(1), 32-41. doi: 10.1016/j.nrl.2011.12.010

Van Der Logt, R. P., Findling, O., Rust, H., Yaldizli, O., & Allum, J. H. J. (2016). The effect of vibrotactile biofeedback of trunk sway on balance control in multiple sclerosis. *Multiple Sclerosis and Related Disorders*, 8, 58–63. <https://doi.org/10.1016/j.msard.2016.05.003>

Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G., & Vaughan, T. M. (2002). Brain– computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, 113(6), 767–791. [http://doi.org/10.1016/S1388-2457\(02\)00057-3](http://doi.org/10.1016/S1388-2457(02)00057-3)

Xiao, Z. G., Elnady, A. M., Webb, J., & Menon, C. (2014). Towards a brain computer interface driven exoskeleton for upper extremity rehabilitation. *5th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*, 432–437. <https://doi.org/10.1109/BIOROB.2014.6913815>

Zhang, F., Hua, L., Fu, Y., Chen, H., & Wang, S. (2014). Design and development of a hand exoskeleton for rehabilitation of hand injuries. *Mechanism and Machine Theory*, 73, 103–116. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2013.10.015>

4. Contenidos

Introducción, en este capítulo se presenta brevemente la situación problema y la justificación de esta, explicando por qué la hemiparesia es una problemática que afecta a millones de personas anualmente y sus consecuencias en el desarrollo de las actividades diarias, se presentan referentes teóricos para la comprensión del tema abordado.

Estado del arte, en este capítulo se exponen los antecedentes que respaldaron el trabajo de investigación realizado, se abordan investigaciones relacionadas con temas como: bio-

retroalimentación visual y auditiva, exoesqueletos para la rehabilitación y parpadeo intencional sobre señales EEG.

Marco teórico, se consideraron las temáticas fundamentales para la comprensión del proyecto: habilidades motoras, hemiparesia, accidente cerebrovascular, rehabilitación, exoesqueletos, interfaz cerebro-computadora (BCI) y parpadeo.

Metodología, el enfoque del trabajo se basó en el modelo de investigación tecnológica aplicada.

Resultados, se presentan los datos obtenidos en cada una de las fases de la experimentación.

Discusión y conclusiones, en este capítulo se relacionan los resultados alcanzados con los antecedentes que orientaron el desarrollo del trabajo.

5. Metodología

Este trabajo se desarrolló basado en el modelo de investigación tecnológica aplicada. Se dividió en las siguientes etapas: diseño del exoesqueleto virtual, adquisición y procesamiento de señales, diseño de la intervención, implementación y recolección y análisis de los datos obtenidos.

Para diseñar el protocolo de intervención se tomaron en cuenta tres fases importantes, la familiarización y apropiación del sujeto con la interfaz, la realización de tareas funcionales usando bio-retroalimentación visual y auditiva respectivamente y la etapa de evaluación la cual está basada en el test para extremidades superiores de Fugl-Meyer. La intervención se realizó con 4 sujetos sanos, dos hombres y dos mujeres con una edad promedio de 28,75 años, los cuales fueron divididos aleatoriamente en los dos ambientes.

Para el análisis de los resultados se usaron los protocolos verbales, con el objetivo de determinar las estrategias utilizadas por los sujetos en la resolución de problemas asociados a tareas de apuntar y de capturar objetos.

6. Conclusiones

- Se diseñó un exoesqueleto virtual de miembro superior con cuatro grados de libertad (dos para el hombro, uno para el codo y uno para abrir y cerrar la mano) que se controla por medio de señales electroencefalográficas del parpadeo, las pruebas con los dos ambientes arrojaron un promedio de eficacia en un rango de 80% a 100%.
- Se obtuvieron resultados que permiten afirmar que los sujetos del grupo con bio-retroalimentación auditiva ejecutan mejor las tareas relacionadas con apuntar a un objeto y los sujetos del grupo con bio-retroalimentación visual, ejecutan mejor las tareas relacionadas con la captura de objetos lo que requiere de más precisión.
- Se evidencia dificultad en los dos grupos para la realización de tareas que involucran la activación de más de dos grados de libertad, caso específico de la flexión-extensión y aducción-abducción del hombro.
- Se pudo inferir que las estrategias utilizadas por los sujetos de los ambientes de aprendizaje con bio-retroalimentación visual y auditiva para la ejecución de tareas de apuntar y capturar un objeto, presentan similitudes frente a la tendencia de los sujetos de orientarse espacialmente con la ayuda de las vistas para definir qué acciones tomar y luego ejecutarlas.
- En los dos grupos se observa que los sujetos tienden a orientarse inicialmente por la vista lateral para alcanzar la altura del cubo y luego desplazarse sobre el plano horizontal hasta cumplir la tarea.

- Los sujetos de ambos grupos tienden a corregir inmediatamente los errores de activación de las articulaciones, para corregir estos errores estos cambian la dirección del movimiento y activan la articulación que les permita posicionarse en la ubicación inmediatamente anterior a la ejecución del error.

Elaborado por:	Caicedo Pedrozo, Javier; González Sandoval, Luz Helena
Revisado por:	Sarmiento Vela, Luis Carlos

Fecha de elaboración del Resumen:	20	12	2018
--	----	----	------

Contenido

LISTA DE FIGURAS	3
LISTA DE TABLAS.....	19
Resumen	4
Abstract	5
1. Introducción	25
2. Planteamiento del problema.....	26
2.1. Objetivo General.....	31
2.2. Objetivos Específicos	31
3. Estado del arte	32
3.1. Bio-retroalimentación.....	32
3.2. Exoesqueletos para la rehabilitación	36
3.3. Parpadeo intencional sobre señales EEG	39
4. Marco teórico	42
4.1. Habilidades motoras.....	42
4.2. Hemiparesia.....	45
4.3. Accidente cerebrovascular (ACV)	45
4.4. Rehabilitación.....	46
4.4.1. Bio-retroalimentación.....	47
4.4.2. Prueba de Fugl-Meyer	48
4.5. Exoesqueletos.....	49
4.6. Interfaz cerebro-computadora (BCI).....	51
4.7 Parpadeo	53
5. Metodología	54
5.1 Enfoque metodológico	54
5.2 Muestra:.....	56
5.3 Etapas del proyecto	56
5.4 Intervención.....	57
6. Descripción del desarrollo tecnológico	68
6.1 Adquisición de la señal:	69
6.2 Procesamiento de la señal:	70
6.3 Contador de Parpadeos:.....	71
6.4 Controlador de articulaciones:	71
6.5 Exo-esqueleto virtual:	72

6.6 Bio-Retro alimentación Visual:.....	73
6.7 Bio-Retro alimentación Auditiva:	74
6.8 Interfaz visual contador:.....	74
7. Descripción de los resultados.....	75
7.1 Desarrollo de la experimentación con el ambiente de aprendizaje de señales electroencefalográficas del parpadeo con bio-retroalimentación visual	75
7.1.1 Análisis de protocolos verbales para la fase 3 de la experimentación con el ambiente de aprendizaje de señales electroencefalográficas del parpadeo con bio-retroalimentación visual	84
7.2.1 Análisis de protocolos verbales para la fase 3 de la experimentación con el ambiente de aprendizaje de señales electroencefalográficas del parpadeo con bio-retroalimentación auditiva.....	116
7.3.1 Comparación resultados experimentación con bio-retroalimentación visual y resultados experimentación con bio-retroalimentación auditiva.....	137
8. Discusión y conclusiones	145
8.1 Discusión.....	145
8.2 Conclusiones	150
Bibliografía.....	153
ANEXO 1 VALORACIÓN DE FUGL-MEYER EXTREMIDAD SUPERIOR.....	160

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1.Exoesqueleto de mano.....	36
Ilustración 2.Exoesqueleto portátil.....	37
Ilustración 3.Exoesqueleto para miembro superior.....	38
Ilustración 4. BOTAS.....	38
Ilustración 5. CRUX.....	39
Ilustración 6. Exoesqueleto para rehabilitación de los dedos.....	50
Ilustración 7. Exoesqueleto para rehabilitación de la extremidad superior.....	51
Ilustración 8. Exoesqueleto virtual flexión hombro 1.....	61
Ilustración 9. Exoesqueleto virtual extensión hombro 1.....	62
Ilustración 10. Exoesqueleto virtual aducción hombro 2.....	63
Ilustración 11. Exoesqueleto virtual abducción hombro 2.....	63
Ilustración 12. Exoesqueleto virtual flexión codo.....	64
Ilustración 13. Exoesqueleto virtual extensión codo.....	65
Ilustración 14. Exoesqueleto virtual flexión mano.....	66
Ilustración 15. Exoesqueleto virtual extensión mano.....	66
Ilustración 16. Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema.....	68
Ilustración 17. Señales de todos los canales del Emotiv ® EPOC.....	69
Ilustración 18. Señal del electrodo FP2 según el sistema internacional 10-20.....	70
Ilustración 19. Señal de pulsos que registra los parpadeos. Muestra la ejecución de 4 parpadeos.....	71
Ilustración 20. Exoesqueleto Virtual.....	73
Ilustración 21. Interfaz Bio-Retroalimentación Visual.....	73
Ilustración 22. Interfaz Bio-Retroalimentación Auditiva.....	74
Ilustración 23. Interfaz visual contador e indicador de sentido de giro.....	75

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Articulaciones y sus movimientos.	59
Tabla 2. Comandos de activación para cada articulación	59
Tabla 3. Comandos de control.....	60
Tabla 4. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 1 Etapa 1	76
Tabla 5. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 1 Etapa 2.....	78
Tabla 6. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 2 Etapa 2.....	78
Tabla 7. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 2 Etapa 3.....	79
Tabla 8. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 2 Etapa 4.....	80
Tabla 9. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 2 Etapa 5.....	81
Tabla 10. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 3 Etapa 1 y Etapa 2.....	82
Tabla 11. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 4.....	83
Tabla 12. Promedios obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 4.....	84
Tabla 13. Proposiciones del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.	86
Tabla 14. Inferencias del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.....	86
Tabla 15. Convenciones de la codificación del protocolo	87
Tabla 16. Codificación del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.	87

Tabla 17. Proposiciones del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde	89
Tabla 18. Inferencias del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.....	89
Tabla 19. Codificación del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.	90
Tabla 20. Proposiciones del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.....	91
Tabla 21. Inferencias del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.	92
Tabla 22. Codificación del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.....	92
Tabla 23. Proposiciones del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.....	93
Tabla 24. Inferencias del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.	93
Tabla 25. Codificación del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.....	94
Tabla 26. Caracterización de comandos y estrategias empleadas durante el desarrollo de tareas de posicionamiento y orientación de un exoesqueleto virtual del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual.....	97
Tabla 27. Proposiciones del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.	98
Tabla 28. Inferencias del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.....	99
Tabla 29. Codificación del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.	99
Tabla 30. Proposiciones del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.	100
Tabla 31. Inferencias del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.....	100

Tabla 32. Codificación del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.	101
Tabla 33. Proposiciones del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.	101
Tabla 34. Inferencias del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.	102
Tabla 35. Codificación del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.	102
Tabla 36. Proposiciones del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.	103
Tabla 37. Inferencias del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.	103
Tabla 38. Codificación del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.	104
Tabla 39. Caracterización de comandos y estrategias empleadas durante el desarrollo de tareas de posicionamiento y orientación de un exoesqueleto virtual del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual.	106
Tabla 40. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva en la Fase 1 Etapa 1.	108
Tabla 41. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva en la Fase 1 Etapa 2.	109
Tabla 42. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva en la Fase 2 Etapa 2.	110
Tabla 43. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva en la Fase 2 Etapa 3.	111
Tabla 44. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 2 Etapa 4.	111
Tabla 45. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 2 Etapa 5.	112
Tabla 46. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva en la Fase 3 Etapa 1 y Etapa 2.	114

Tabla 47. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva en la Fase 4.....	115
Tabla 48. Promedios obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva en la Fase 4.....	116
Tabla 49. Proposiciones del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.	117
Tabla 50. Inferencias del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.	117
Tabla 51. Codificación del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.	118
Tabla 52. Proposiciones del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.	119
Tabla 53. Inferencias del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.	119
Tabla 54. Codificación del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.	119
Tabla 55. Proposiciones del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.	121
Tabla 56. Inferencias del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.	122
Tabla 57. Codificación del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.	122
Tabla 58. Proposiciones del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.	123
Tabla 59. Inferencias del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.....	124
Tabla 60. Codificación del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.	124
Tabla 61. Caracterización de comandos y estrategias empleadas durante el desarrollo de tareas de posicionamiento y orientación de un exoesqueleto virtual del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva.	127

Tabla 62. Proposiciones del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.	128
Tabla 63. Inferencias del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.	128
Tabla 64. Codificación del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.	129
Tabla 65. Proposiciones del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.	129
Tabla 66. Inferencias del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.	130
Tabla 67. Codificación del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.	130
Tabla 68. Proposiciones del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo	131
Tabla 69. Inferencias del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.....	131
Tabla 70. Codificación del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.	132
Tabla 71. Proposiciones del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.	133
Tabla 72. Inferencias del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.....	133
Tabla 73. Codificación del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.	133
Tabla 74. Caracterización de comandos y estrategias empleadas durante el desarrollo de tareas de posicionamiento y orientación de un exoesqueleto virtual del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva.	136
Tabla 75. Promedio de los resultados obtenidos por los sujetos en los ambientes de aprendizaje con bio-retroalimentación visual y auditiva en la Fase 1 Etapa 1.....	138
Tabla 76. Promedio de los resultados obtenidos por los sujetos en los ambientes de aprendizaje con bio-retroalimentación visual y auditiva en la Fase 1 Etapa 2.....	138

Tabla 77. Promedio de los resultados obtenidos por los sujetos en los ambientes de aprendizaje con bio-retroalimentación visual y auditiva en la Fase 2 Etapa 2.....	139
Tabla 78. Promedio de los resultados obtenidos por los sujetos en los ambientes de aprendizaje con bio-retroalimentación visual y auditiva en la Fase 2 Etapa 3.....	140
Tabla 79. Promedio de los resultados obtenidos por los sujetos en los ambientes de aprendizaje con bio-retroalimentación visual y auditiva en la Fase 2 Etapa 4.....	140
Tabla 80. Promedio de los resultados obtenidos por los sujetos en los ambientes de aprendizaje con bio-retroalimentación visual y auditiva en la Fase 2 Etapa 5.....	141
Tabla 81. Promedio de los resultados obtenidos por los sujetos en los ambientes de aprendizaje con bio-retroalimentación visual y auditiva en la Fase 3 Etapa 1 y 2.....	142
Tabla 82. Promedio de los resultados obtenidos por los sujetos en los ambientes de aprendizaje con bio-retroalimentación visual y auditiva en la Fase 4.....	144
Tabla 83. Estrategias utilizadas por los sujetos con bio-retroalimentación visual y auditiva durante el desarrollo de tareas de posicionamiento y orientación de un exoesqueleto virtual.....	145

Introducción

El Accidente CerebroVascular (ACV) es una enfermedad que se presenta por la obstrucción en el paso de sangre hacia el cerebro, entre sus síntomas más comunes se encuentran: la pérdida de fuerza en las extremidades, superiores, inferiores o cara, generalmente de forma unilateral y de forma súbita, esta enfermedad puede derivar en la muerte o en graves consecuencias para quienes sobreviven a un episodio de esta magnitud (Mant & Walker, 2011). Se considera la segunda causa de muerte en los países latinoamericanos (OMS, 2015), en el caso de Colombia para el año 2010 se presentaron 1292 casos de ACV hemorrágico en mujeres y 1442 en hombres, según cifras del Observatorio Nacional de Salud (ONS, 2015), siendo una de las principales causas de discapacidad severa a largo plazo.

Una de las condiciones que se desarrolla con más frecuencias luego de un ACV es la hemiparesia, la cual consiste en una afección neurológica que desencadena en debilidad o rigidez del brazo derivando en una parálisis parcial, dicha condición afecta únicamente la mitad del cuerpo, manifestándose en diferentes niveles de parálisis. Esta enfermedad además de ser causada por un ACV también puede ser provocada por esclerosis múltiple, sarcoidosis, meningitis, enfermedades degenerativas entre otras (Kasper et al., 2004).

Los procesos de rehabilitación de la hemiparesia según (Barroso, 1999) deben pasar por una etapa de reeducación sensitivo-motora, que engloba técnicas concretas que atienden a las particularidades del paciente, en contraste con la fisioterapia tradicional que ha entrado en desuso por eludir procesos fundamentales de la rehabilitación como son la motivación, el fortalecimiento de la concentración, la estimulación de diferentes funciones sensitivas y perceptuales, entre otros factores cognitivos importantes en la recuperación, procesos que para (Carr y Shepherd, 1987. Citados en Barroso, 1999) le permiten al paciente aproximarse de mejor manera a una recuperación potencial.

Algunos autores según lo expuesto por (Barroso, 1999) han propuesto teorías para la rehabilitación sustentados en las bases neurofisiológicas de la condición hemiparésica, por ejemplo el tratamiento Bobath que se basa en la evaluación y tratamiento de la actividad motora del paciente, para que al corregir dichos patrones de movimiento observados se readapte el Sistema Nervioso Central, entendiendo que dicho sistema en un paciente con hemiparesia funciona de manera anormal; otro

enfoque importante contempla el bio-feedback aplicado en la rehabilitación neuromuscular, esta técnica permite el control y manipulación de una manera voluntaria de algunos procesos biológicos cuando se brinda información sobre ellos, esta técnica aporta una nueva visión del proceso de recuperación, pues en contraste con otras perspectivas y teorías como la expuesta arriba basados en la propiocepción, el bio-feedback a través del uso de dispositivos tecnológicos ofrece información en tiempo real relacionada con la ejecución de una actividad, contribuyendo a una movilidad activa para alcanzar el control de las funciones motoras. (Villanueva López, 1998. Citado en Barroso, 1999)

En este trabajo de investigación se implementan dos ambientes de aprendizaje de señales electroencefalográficas del parpadeo, cada uno de estos dotado de un enfoque de bio-retroalimentación distinto, uno con bio-retroalimentación visual y el otro con auditiva, para contrastar las diferencias en cuanto al desarrollo de la destreza motriz para controlar la posición y orientación de las articulaciones de un exoesqueleto virtual, proyecto que podría contribuir en el proceso de recuperación y fortalecimiento de las facultades motrices de personas con hemiparesia, dado que dichos sujetos pierden la habilidad para realizar actividades por sí mismos repercutiendo negativamente en su contexto laboral, social y económico e inclusive en su dimensión psicológica (Mant & Walker, 2011).

Al respecto los trabajos de Montaña-Murillo et al. (2013) con el diseño y evaluación de un sistema con bio-retroalimentación auditiva-vibro-táctil para la rehabilitación neuromotora, el de Barandas, Gamboa & Fonseca (2015) al comparar el efecto de implementar ejercicios estándar versus la ejecución de estos mismos con bio-retroalimentación visual, entre otras investigaciones, han mostrado el efecto favorable de la bio-retroalimentación de diferentes tipos sobre la recuperación de la destreza motriz en los procesos de rehabilitación vistos desde parámetros como la velocidad de ejecución del movimiento de las extremidades afectadas, el incremento en el rango de movimiento y la autonomía del paciente.

2. Planteamiento del problema

La hemiparesia de miembro superior es una condición neurológica que provoca la parálisis parcial del brazo presentando debilidad o rigidez lo que impide su movimiento natural o en otros casos

perdiendo la capacidad de controlar la extremidad parética, afecta solo una mitad del cuerpo y el nivel de parálisis parcial manifestado es diferente en todos los casos pero siempre va a ser un grado menor a la parálisis total. Puede ser causada principalmente por un accidente cerebrovascular (ACV), aunque también puede presentarse por lesiones en la medula espinal cervical o en el tallo cerebral, traumas, esclerosis múltiple, sarcoidosis, hematoma subdural, meningitis, SIDA, enfermedades degenerativas, entre otras (Kasper et al., 2004).

El Accidente Cerebrovascular (ACV) es una enfermedad que consiste en la pérdida de la función cerebral por un determinado lapso; puede ser de carácter hemorrágico, causado por la ruptura de un vaso sanguíneo o un aneurisma; o isquémico, causado por trombos o coágulos que obstaculizan e impiden el suministro de sangre al cerebro. Esta enfermedad puede causar la muerte o repercusiones severas para los que logran sobreponerse al episodio (Mant & Walker, 2011). En la Declaración de Santiago de Chile del año 2015, se exponen estadísticas publicadas principalmente por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2015), informando que aproximadamente 15 millones de personas sufren de un evento cerebrovascular al año, donde 5 millones mueren y otros 5 millones quedan discapacitados de por vida. Esta enfermedad es además, la segunda causa de muerte en la mayoría de países Latinoamericanos y está asociada con un nivel significativo de discapacidad. El Centro de Control y Prevención de Enfermedades (CDC, 2015) estima que cada año más de 795,000 personas sufren de un ACV en Estados Unidos, aproximadamente 610,000 lo sufren por primera vez y 185,000 ya han sufrido de uno previamente, siendo la causa que lidera la discapacidad severa a largo plazo.

Además, según un informe presentado por el Observatorio Nacional de Salud (ONS, 2015) los ACV son la segunda causa de Años Perdidos por Discapacidad (DALYs por sus siglas en inglés), para el año 2010 se reportaron cerca de 102 millones de DALYs. En el caso de Colombia, la tasa de incidencia del ACV hemorrágico para las mujeres fue de 7,59 por 100.000 hab., equivalente a 1,292 casos para el año 2010, mientras que en el año 2014 fue de 7,58 por 100.000 hab., equivalente a 1408 casos; para los hombres la tasa de incidencia en el año 2010 fue de 9,08 por 100,000 hab., equivalente a 1,442 casos anuales y para el 2014 se registraron 1,567 casos. La incidencia del ACV isquémico en casos nuevos para mujeres fue de 1,364 casos en 2010 y 1,543 en 2014; en los hombres fue de 2,672 casos en 2010 y 2,927 en 2014.

Las personas que sobreviven a un ACV presentan ciertas dificultades médicas que influyen negativamente en el desarrollo normal de las actividades diarias, un padecimiento frecuente es la hemiparesia, en consecuencia los individuos pierden la habilidad de desenvolverse por sí solos afectando su vida laboral y social, sin contar con las secuelas psicológicas y económicas asociadas a este evento (Mant & Walker, 2011). La terapia de rehabilitación es un elemento clave para la completa recuperación de un ACV (Hattem et al., 2016), sin embargo a pesar de que el paciente realice la terapia convencional de rehabilitación se han obtenido resultados que demuestran un deterioro continuo del 50% al 95% de los pacientes (Waller & Whitall, 2008), no hay garantía de alcanzar buenos resultados ya que aproximadamente solo el 6% de los pacientes con parálisis inicial grave tiene recuperación completa de la movilidad (Arias, 2009).

Atendiendo a esta necesidad diversos estudios han evaluado estrategias y rutinas que tienen en cuenta múltiples enfoques que ayudan al reentrenamiento motor desde diferentes perspectivas (Schaechter, 2004) con el fin de mejorar los resultados obtenidos en la rehabilitación. Uno de los entrenamientos que se utiliza en la actualidad es el entrenamiento orientado a tareas, sugiere la realización de tareas funcionales que están dirigidas al cumplimiento de un objetivo específico, así como brindar retroalimentación apropiada y la práctica de movimientos repetitivos (Roos, Harvey y Lannin, 2009). Los objetivos seleccionados pueden estar dirigidos a tareas concretas o abstractas, la utilización de tareas concretas ha demostrado mejoras significativas comparado con el uso de las abstractas (Carr y Shepherd, 2003).

Dentro de las técnicas más empleadas para estimular la recuperación motora en las extremidades superiores se encuentran: Los ejercicios de fortalecimiento muscular, fortalecimiento muscular isocinético, estiramiento, entrenamiento bilateral, uso forzado de la extremidad afectada, tratamiento de movimiento inducido por restricción, observación del movimiento e imitación motora, terapia de espejo, estimulación eléctrica, bio-retroalimentación, entre otras (Hattem et al., 2016). Nelson (2007) afirma que la bio-retroalimentación es una herramienta útil en la recuperación de la función después de un ACV ya que aporta a la mejora de la autoeficacia, el control interno del sujeto y contribuye sustancialmente a la recuperación de la función de diversos dominios, usualmente es una herramienta que puede asistir diferentes tipos de terapias convencionales.

La bio-retroalimentación consiste en la observación de las bioseñales del propio sujeto con la ayuda de dispositivos y el uso de retroalimentación basada en estímulos que pueden ser de carácter visual, auditivo, térmico, de fuerza, electromiográficos, entre otros (Maciaszek, Borawska y Wojcikiewicz, 2014); lo cual le permite controlar y modificar voluntariamente determinadas funciones corporales, el autocontrol es fundamental para que la modificación de los procesos se cumpla de forma exitosa, es decir que el individuo es responsable de sus propios resultados (Fernández, et al., 1998); las más utilizadas son señales electromiográficas (EMG) y señales electroencefalograficas (EEG) (Cox, 2008). En una investigación en la que participaron 40 sujetos con hemiplejia, donde el grupo de estudio recibió tratamiento con biorretroalimentación-EMG y el grupo de control recibió terapia convencional para la espasticidad del musculo flexor de la muñeca, se encontró que para el primer grupo hubo mejoras postratamiento estadísticamente significativas en los valores de la actividad muscular medidos por la escala de Ashworth (AS), etapas de Brunnstrom (BS), test de función de la extremidad superior (UEFT) y un aumento significativo en las mediciones goniométricas del rango de movimiento activo de la extensión de la muñeca, demostrando disminución de la espasticidad, aumento en el rango de movimiento articular y actividad muscular (Dogan-Aslan et al., 2012); Barandas, Gamboa & Fonseca (2015) realizaron un estudio con 10 sujetos sanos donde compararon el efecto de realizar ejercicios estándar para aumentar el rango de movimiento con los mismos ejercicios acompañados de bio-retroalimentación visual encontrando que al haber bio-retroalimentación disminuía significativamente el error medio al realizar los ejercicios y se evitaba la realización de movimientos incorrectos durante el entrenamiento contribuyendo a aumentar la autonomía del paciente; también se ha utilizado la bio-retroalimentación visual con otras tecnologías como la estimulación eléctrica funcional y las imágenes motoras basadas en señales EEG demostrando buenos resultados, el estudio fue realizado con dos sujetos que sufrieron ACV crónico, el primer sujeto fue capaz de relajar y extender la muñeca voluntariamente luego de no tener movimiento en la muñeca ni en los dedos, el segundo sujeto aumento el rango de movimiento (ROM) del dedo medio en 1cm además logro mover todos los dedos del lado parético después de solo tener movimiento del dedo medio (Irimia et al., 2017).

En la actualidad para la realización de terapias se han desarrollado métodos novedosos entre ellos, los exoesqueletos, que son herramientas prometedoras ya que permiten aumentar la intensidad y duración de las terapias, proporcionan mediciones cinemáticas y cinéticas precisas utilizadas para

evaluar las necesidades y la evolución de los sujetos y pueden ser utilizados junto a otras tecnologías que buscan motivar a los pacientes como la realidad virtual (Resquín et al., 2016).

Se pueden encontrar exoesqueletos diseñados para realizar terapias específicas de la función del brazo como el WREX, que permite a las personas con debilidad neuromuscular mover los brazos libremente en un espacio tridimensional (Haumont et al., 2011); CAREX, diseñado para proporcionar las fuerzas requeridas por la mano y en cualquier dirección que sea necesaria (Mao & Agrawal, 2012); o el EXO-UL7, diseñado para entrenamiento unilateral y bilateral con 7 grados de libertad soportando actividades de la vida diaria (Sheng et al., 2016). Otros exoesqueletos fueron diseñados específicamente para rehabilitar la mano y las lesiones de los dedos (Zhang et al., 2014; Bataller et al., 2016), además también se encuentran los que se usan para la rehabilitación de extremidades inferiores enfocándose en ejercicios de flexión y extensión (Lopez et al., 2014).

Estos exoesqueletos pueden ser comúnmente controlados por la activación muscular del usuario (Hu et al., 2013; Patar et al., 2014; Ganesan, Gobebe & Durairajah, 2015) o por interfaces cerebro-computadora (BCI) donde se usan señales electroencefalográficas que son activadas por imágenes motoras, estímulos visuales (P300) o señales de potencial evocado visual en estado estable (SSVEP) (Sakurada et al., 2013). En este campo se encuentran trabajos con robótica asistida que buscan integrar estas tecnologías a los programas de rehabilitación, Luth et al. (2007) desarrollaron un exoesqueleto accionado por medio de control híbrido: P300 y SSVEP, diseñado para la asistencia en la realización de movimientos globales y de agarre; se ha usado el control por medio de imágenes motoras junto con movimientos predeterminados establecidos para el exoesqueleto (Xiao et al., 2014); y el control por medio de SSVEP donde se pueden realizar movimientos de agarre, alcance y liberación (Chen et al., 2018), estos estudios se enfocaron en comprobar que personas sanas podían hacer uso de los exoesqueletos. Por otra parte Sakurada et al. (2013) hicieron la prueba de un traje de asistencia para terapia ocupacional basado en BCI (BOTAS) controlado por SSVEP con 12 personas sanas y 3 pacientes con lesiones de la medula espinal cervical, el promedio de la precisión en la clasificación de las señales fue del 80% aproximadamente, los tiempos de espera fueron menores a 4s y los pacientes lograron realizar la tarea satisfactoriamente en la mayoría de los ensayos, demostrando que es útil en la rehabilitación de pacientes con discapacidad de miembro superior. Otro estudio que se llevó a cabo con 9 personas con ACV

crónico demostró que el entrenamiento con un exoesqueleto controlado por BCI tenía potencial para ser usado en la terapia de rehabilitación de pacientes con ACV, los resultados mostraron una precisión de validación cruzada con un promedio de 68.8%, todos los pacientes completaron los ejercicios de entrenamiento y en los ensayos finales disminuyó satisfactoriamente el tiempo que tomaba completar una tarea (Elnady et al., 2015).

Sin embargo investigaciones que involucran exoesqueletos para la rehabilitación (Haumont et al., 2011; Mao & Agrawal, 2012; Lopez et al., 2014; Zhang et al., 2014; Bataller et al., 2016) se han concentrado en el diseño y el funcionamiento de los mismos, más no en la metodología que apoyada en esta clase de dispositivos puede ser la más efectiva. A partir de esto se pretende abordar en una primera fase la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué diferencias existen en el desarrollo de la destreza motriz en sujetos sanos para posicionar y orientar un exoesqueleto virtual de miembro superior (EVMS), entre un ambiente de aprendizaje de señales electroencefalográficas del parpadeo con retroalimentación visual y otro con retroalimentación auditiva?, se propone para un siguiente trabajo que se realice una segunda fase donde se involucren personas que padezcan hemiparesia.

2.1. Objetivo General

Identificar las diferencias en el desarrollo de la destreza motriz en sujetos sanos para posicionar y orientar un exoesqueleto virtual de miembro superior (EVMS), entre un ambiente de aprendizaje de señales electroencefalográficas del parpadeo con retroalimentación visual y otro con retroalimentación auditiva.

2.2. Objetivos Específicos

- Validar la funcionalidad de un exoesqueleto virtual de miembro superior que controlado por señales electroencefalográficas del parpadeo extraídas del lóbulo frontal, permita el movimiento de cuatro grados de libertad (dos para el hombro, uno para el codo y uno para abrir y cerrar la mano).

- Comparar dos ambientes de aprendizaje motor de señales electroencefalográficas, el primero basado en la bio-retroalimentación de señales biológicas visuales y el segundo en la bio-retroalimentación de señales biológicas auditivas, para el desarrollo de la destreza motriz en el control de un exoesqueleto virtual de miembro superior (EVMS).
- Evaluar los ambientes de aprendizaje motor con bio-retroalimentación visual y bio-retroalimentación auditiva con base en el test de Fugl – Meyer para la recuperación de la función motora.

3. Estado del arte

En este capítulo se presentan los antecedentes relacionados con la investigación, los cuales componen el estado del arte de este proyecto, abordan estrategias de aprendizaje motor de bio-retroalimentación aplicadas para la recuperación de diferentes enfermedades como la esclerosis múltiple, el Parkinson y los ACV, ayudando a la mejora de parámetros como el control postural, espasticidad, rango de movimiento, entre otros. También se incluyen algunos exoesqueletos desarrollados en el campo de la rehabilitación y aplicaciones prácticas que involucran el procesamiento de señales EEG de parpadeo.

Una de las principales causas de discapacidad en el mundo está asociada a los Accidentes Cerebrovasculares, debido a que dejan secuelas en la movilidad de los pacientes por problemas en la función motora y limitan su desempeño en la vida diaria, lo que genera dificultades. La terapia de rehabilitación, cuenta con múltiples estrategias las cuales tienen por objeto la recuperación parcial o total de las habilidades motoras perdidas. La siguiente metodología ha mostrado resultados favorables en la recuperación de algunas funciones motoras (Hattem et al., 2016).

3.1. Bio-retroalimentación

La bio-retroalimentación ha sido empleada para el tratamiento de diferentes enfermedades que afectan la función motora. Caudron et al. (2014) realizaron un estudio que tenía por objeto evaluar

si la presencia de información visual suplementaria sobre la orientación del cuerpo podía mejorar el control postural en pacientes que sufrieran de Parkinson. Participaron 17 pacientes con Parkinson idiopático, a cada paciente se le aplicó el test de repulsión en tres momentos: con visión, sin visión y con un sistema de bio-retroalimentación visual (avatar que indicaba la posición de la cabeza y el tronco en tiempo real). Los resultados mostraron que la estabilidad y la orientación mejoraron en el caso donde se utilizó la bio-retroalimentación visual, ya que los pacientes se identificaron con el avatar y redujeron el error que les indicaba el dispositivo.

Para el caso de la esclerosis múltiple Van Der Logt, Findling, Rust, Yaldizli, & Allum (2016), investigaron los efectos de la bio-retroalimentación vibro-táctil de posición y velocidad en tareas posturales y de marcha. 10 pacientes realizaron tareas relacionadas con postura y marcha, el grupo que usó la bio-retroalimentación mostró diferencias significativas en el control del equilibrio comparado con el grupo que usó entrenamiento convencional, sin embargo no se encontró una duración significativa de estos efectos después de retirar el dispositivo, por lo que se recomendó extender el tiempo y frecuencia del entrenamiento.

Esta metodología se ha usado también en el mejoramiento del equilibrio, donde se encontró que enviar señales de bio-retroalimentación visual desde la quinta y cuarta vertebra, puede reducir significativamente el balanceo postural para el tronco inferior y tener efectos estabilizantes en la inclinación del tronco superior respectivamente, este estudio se llevó a cabo con 20 sujetos jóvenes que no reportaban déficit neural o de equilibrio, con el objetivo de examinar la efectividad de las señales de bio-retroalimentación visual proporcionadas desde una plataforma de fuerza y un acelerómetro ubicado en diferentes segmentos del cuerpo (Halická, Lobotková, Bučková, & Hlavačka, 2014).

En rehabilitación neuromotora, Montaña-Murillo et al. (2013) diseñaron, construyeron y evaluaron el funcionamiento de un sistema de bio-retroalimentación auditiva – vibro – táctil para la rehabilitación neuromotora de extremidades superiores utilizando procesamiento de imágenes y marcadores activos; 8 usuarios (4 con lesiones en el hombro y 4 sanos) utilizaron este sistema donde cada vez que realizaban un ejercicio con las posiciones adecuadas obtenían una señal auditiva, y cuando obtenían una señal vibro-táctil esta les indicaba que no estaban en la posición

requerida para el ejercicio; el sistema evaluaba el tiempo y la precisión de los movimientos. Los resultados obtenidos mostraron un incremento notorio en la velocidad de los usuarios con lesiones en el hombro al realizar los ejercicios, así mismo aumentaron el rango de movimiento de la extremidad afectada, contribuyendo a aumentar la velocidad de recuperación en los pacientes.

Para la motivación en la rehabilitación física Barandas, Gamboa, & Fonseca (2015) realizaron un estudio con 10 sujetos sanos que tenía como objeto desarrollar un sistema de bio-retroalimentación capaz de motivar a las personas con discapacidad motora de extremidad superior mediante la evaluación de su desempeño durante la práctica de tareas basadas en el rango de movimiento. Los sujetos realizaron los ejercicios terapéuticos (repeticiones, mantener un ángulo definido y control del movimiento) en dos momentos: siguiendo las instrucciones del terapeuta y añadiendo el sistema de bio-retroalimentación a esas instrucciones. Del trabajo se pudo concluir que el sistema fue de ayuda ya que alertaba y corregía a los pacientes evitando movimientos erróneos y previniendo lesiones, además en dos de los tres ejercicios propuestos la efectividad del entrenamiento con bio-retroalimentación fue significativamente alta en comparación con el entrenamiento convencional.

Además en la rehabilitación de pacientes con ACV son varios los estudios que buscan verificar la efectividad de esta metodología junto a diferentes estrategias y tipos de bio-retroalimentación:

Maciaszek, Borawska, & Wojcikiewicz (2014) trabajaron con 21 adultos en etapa subaguda con hemiparesia del lado izquierdo o derecho, con el objetivo de analizar la influencia de una plataforma posturográfica con bio-retroalimentación en el equilibrio dinámico de pacientes con ACV isquémico. Trabajaron por 15 días con un grupo experimental y un grupo control; el primer grupo obtenía bio-retroalimentación a través de una pantalla que le mostraba la posición en la que se encontraba y el área donde debía ubicarse. Al iniciar el estudio los dos grupos no presentaban diferencias en los resultados de las pruebas, pero después de los 15 días se encontraron diferencias significativas, la bio-retroalimentación tuvo mayor efecto en el equilibrio dinámico de pacientes con hemiparesia en el lado derecho que en pacientes con hemiparesia en el lado izquierdo.

Doan-Aslan, Nakipolu-Yüzer, Doan, Karabay, & Özgirgin (2012) realizaron un trabajo que tenía como objeto evaluar la efectividad de la bio-retroalimentación electromiográfica en la disminución

de la espasticidad de la muñeca, recuperación de funciones de la mano y la habilidad para desempeñar tareas del diario vivir en pacientes con hemiplejía después de un ACV, 40 pacientes fueron divididos aleatoriamente en dos grupos, los dos recibieron tratamiento para la espasticidad con métodos de neurodesarrollo convencionales y estímulo verbal; además el grupo de estudio recibió bio-retroalimentación electromiográfica donde la actividad muscular se mostraba a los pacientes con señales visuales y auditivas realizando retroalimentación verbal periódicamente. Los resultados mostraron mejoras postratamiento estadísticamente significativas en los valores de la actividad muscular medidos por la escala de Ashworth (AS), etapas de Brunnstrom (BS), test de función de la extremidad superior (UEFT) y un aumento significativo en las mediciones goniométricas del rango de movimiento activo de la extensión de la muñeca, demostrando disminución en la escala de Ashworth y en los valores de la espasticidad de la muñeca, aumento en el rango de movimiento articular y la actividad muscular.

Kim & Lee (2015) evaluaron los efectos de la terapia de espejo combinada con bio-retroalimentación de estimulación eléctrica en la recuperación motora de las extremidades superiores afectadas y la calidad de vida en pacientes después de un ACV. 29 pacientes se dividieron aleatoriamente en 3 grupos (terapia de espejo con bio-retroalimentación, terapia de espejo y grupo control). Los estímulos eléctricos fueron controlados por sensores electromiográficos donde sus datos eran transmitidos y procesados en tiempo real. El principal hallazgo en este estudio es que la bio-retroalimentación de estímulos eléctricos junto con la terapia de espejo, puede ser usada para mejorar la recuperación motora en estructura y en función para las extremidades superiores en pacientes con ACV crónico, obteniendo diferencias significativas en comparación con el grupo control.

Finalmente en el estudio realizado por Cordo et al. (2013), se comparó la bio-retroalimentación de electromiografía y de torque, en personas con deficiencias en la extensión de los dedos después de un ACV. Participaron 43 personas con discapacidad severa en las manos y se dividieron aleatoriamente en dos grupos: grupo con movimientos asistidos por robot y vibración muscular combinado con bio-retroalimentación de electromiografía; y grupo con movimientos asistidos por robot y vibración muscular combinado con bio-retroalimentación de torque. En este estudio no hubo grupo control. Los resultados no mostraron diferencias significativas entre los dos grupos, sin

embargo los dos tratamientos fueron una intervención eficaz ya que los participantes recuperaron la habilidad de mover bloques y mejoraron su desempeño y la activación volitiva de los músculos de la mano.

3.2. Exoesqueletos para la rehabilitación

Durante los últimos años investigadores se han concentrado en el desarrollo de exoesqueletos para la rehabilitación de miembros superiores, en el caso de Zhang, Hua, Fu, Chen, & Wang (2014), el objetivo del trabajo fue diseñar un exoesqueleto novedoso para la mano, teniendo en cuenta específicamente los requerimientos de rehabilitación para lesiones en los dedos y para adaptarse a diferentes sujetos, este exoesqueleto contempla 3 articulaciones. En las pruebas realizadas al artefacto se comprobó que se podía ajustar a diferentes tamaños de dedos y longitudes, también reducía la carga sobre los dedos y los resultados de la prueba de aptitud para la mano verificaron la eficacia del exoesqueleto.

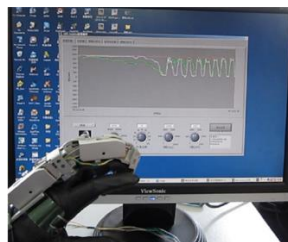


Ilustración 1. Exoesqueleto de mano.

Fuente: Zhang et al., 2014

Xiao, Elnady, Webb, & Menon (2014) realizaron la propuesta de un sistema de exoesqueleto portátil de 4 GDL para extremidades superiores que puede ser manejado por el pensamiento consciente del usuario utilizando el dispositivo Emotiv EEG. El exoesqueleto permite el control independiente de: flexión/extensión del codo (J1), pronación/supinación del antebrazo (J2), flexión/extensión de la muñeca y desviación radial (J3 y J4). El sistema está compuesto por 2 módulos (codo-antebrazo y muñeca) y cada uno puede ser usado de forma independiente. El movimiento del exoesqueleto es controlado por medio de señales EEG con un esquema de control secuencial, el usuario debe entrenar el sistema con un pensamiento consciente y otro neutral, una

persona sana probó el funcionamiento del exoesqueleto, el resultado del experimento muestra que el sistema puede distinguir correctamente entre un pensamiento consciente y el estado neutral del voluntario, además puede usar esta información para conducir diferentes movimientos del exoesqueleto.

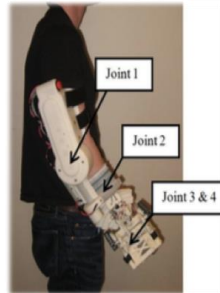


Ilustración 2. Exoesqueleto portátil.

Fuente: Xiao et al., 2014

Elnady et al. (2015) realizaron un estudio que tenía por objeto desarrollar y probar la factibilidad de un exoesqueleto controlado por señales BCI y estimulación eléctrica funcional (FES) que puede ayudar a las personas con accidente cerebrovascular en la realización de tareas motoras dirigidas a objetivos. Este dispositivo es liviano y portátil y brinda retroalimentación propioceptiva. El exoesqueleto proporciona asistencia para realizar flexión y extensión de los codos mientras la unidad FES ayuda a realizar la flexión y extensión de los dedos para agarrar o liberar un objeto. El exoesqueleto tiene 2 grados de libertad (flexión-extensión del codo y pronación-supinación del antebrazo), es controlado por BCI y discrimina dos clases de señales de EEG, la salida del clasificador tiene uno de los dos estados discretos "0" (reposo) o "1" (imágenes motoras). El sistema de entrenamiento robótico fue probado en 9 personas con ACV crónico encontrando que el dispositivo fue bien tolerado y demuestra que tiene potencial para ser usado en terapias para sujetos con ACV (Elnady et al., 2015).

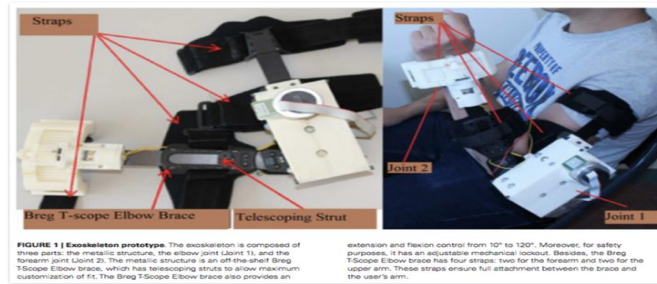


Ilustración 3. Exoesqueleto para miembro superior.

Fuente: Elnady et al., 2015

Por otra parte Sakurada, Kawase, Takano, Komatsu, & Kansaku (2013) hicieron la prueba de un traje de asistencia para terapia ocupacional basado en tecnologías BCI no invasivas (BOTAS), que es controlado por medio de señales de potencial evocado visual en estado estacionario (SSVEP). El experimento fue realizado con 12 personas sanas y 3 personas con lesiones en la medula espinal cervical, la tarea consistía en agarrar, llevar y liberar una pelota, los movimientos fueron pregrabados y se activaban cuando el usuario fijaba su mirada en un led parpadeante específico. La precisión para la clasificación de las señales estuvo entre 80% y 90% y el tiempo de detección de cada señal fue menor a 4 segundos, los pacientes lograron realizar la tarea satisfactoriamente en la mayoría de los ensayos demostrando que es útil en la rehabilitación de pacientes con discapacidad de miembro superior.

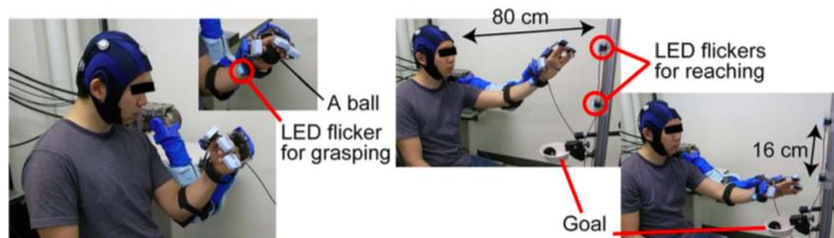


Ilustración 4. BOTAS.

Fuente: Sakurada et al., 2013

En trabajos más recientes se encuentra el que realizaron Lessard et al. (2018) que tenía como objetivo rediseñar y actualizar CRUX (traje robotizado compatible con la extremidad superior con múltiples DOF), modificándolo para darle una estructura más flexible y un control más robusto con el fin de lograr acciones más complejas en la terapia de espejo o para la técnica de imágenes motoras

graduales. A la hora de desarrollar el exoesqueleto se concentran específicamente en el aumento de la rotación humeral, flexión-extensión del codo, pronación-supinación de la muñeca, elevación lateral del hombro y elevación y descenso del hombro hacia adelante. La prueba del exoesqueleto se realiza con 13 usuarios, 9 con algún deterioro en la extremidad superior y 4 sanos. Se evaluó la capacidad mimética del exoesqueleto realizando 2 movimientos seleccionados (circulo de hombros y curl de bíceps) el brazo derecho imito los movimientos realizados por el brazo izquierdo. También se evaluó la flexibilidad del sistema, los movimientos observados con y sin el exoesqueleto correspondieron entre sí con diferencias poco significativas. A partir de estos hallazgos, se concluye que la estructura de CRUX no parece inhibir el movimiento del usuario de forma suficientemente significativa como para impedir los movimientos centrales de la terapia de espejo y la rehabilitación de la extremidad superior.

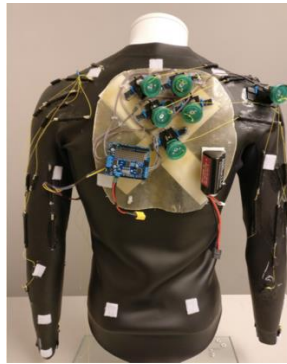


Ilustración 5. CRUX.

Fuente: Lessard et al., 2018

3.3. Parpadeo intencional sobre señales EEG

En la investigación de Rihana et al. (2013) se pretende comparar la efectividad de diferentes algoritmos para la clasificación de señales basados en el reconocimiento de las características del parpadeo intencional sobre señales EEG, para esto los investigadores registraron la actividad de la corteza cerebral a partir de cuatro canales O1, O2, Fp1 y Fp2, teniendo como referencia dos electrodos en los huesos mastoides correspondientes a A1 y A2, además de Fpz que se ubicó en el centro de la frente. Se solicitó a 4 sujetos que parpadearan con un ojo en intervalos de un segundo durante sesiones de dos minutos, se obtuvieron señales de los electrodos O1 y O2 que son similares en cuanto a frecuencia y amplitud y desde las cuales se puede discriminar entre el parpadeo del ojo

izquierdo y el derecho, cabe resaltar que las señales de los parpadeos se encuentran convencionalmente entre los 0,5 Hz a los 3,6 Hz y entre los 8 a los 13 Hz. De la experimentación se extrajo un conjunto de datos de cada sujeto en el que el 70 % de estos se destinaba para el entrenamiento de los clasificadores y el 30% restantes se empleaba para probarlos, los clasificadores empleados en el estudio fueron: Feed Forward Back Propagation (FFBP), Cascade Forward Back Propagation (CFBP) y el clasificador binario RBF (Radial Basis Function), el RBF alcanzó un 100% de precisión con los datos de entrenamiento y 75,375% con los datos de prueba, el CFBP obtuvo un 99,83% de precisión con los datos de entrenamiento y 54,78% con los datos de prueba y por último el modelo FFBP que alcanzó un 96,687% de precisión con los datos de entrenamiento y un 71,6% con los de pruebas, por lo anterior concluyen los investigadores que la aplicación del modelo RBF permite alcanzar una mayor precisión en la etapa de clasificación con lo que se visualiza como una buena alternativa para incorporarlo en sistemas con imaginaria motora y bio-retroalimentación e inclusive para aplicaciones de neuro-rehabilitación.

Por otra parte, Abd et al. (2009) evaluaron las características de la actividad ocular para poder operar de manera controlada el sistema de iluminación de una casa, para esto decidieron desarrollar un algoritmo que les permitiera reconocer el parpadeo voluntario y el movimiento de los ojos, dicho algoritmo fue probado sobre 20 sujetos expuestos a cuatro condiciones: relajación, parpadeo, ojos cerrados y movimientos oculares, para el caso de esta última condición se ejecutaron 4 variantes: movimiento hacia la izquierda, hacia la derecha, hacia arriba y hacia abajo, para llevar a cabo el parpadeo voluntario se le solicitó a los participantes que abrieran y cerraran los ojos, por dos y tres segundos respectivamente en tres repeticiones, el registro de la actividad ocular en sus diferentes variantes fue comparada con el registro obtenido en la condición de relación propendiendo por determinar los movimientos que desencadenaban los cambios más pronunciados en la señal, se evaluaron también los tiempos de duración de los parpadeos y el efecto físico de la repetición de los parpadeos. De los resultados obtenidos, los autores resaltan que la frecuencia de un parpadeo espontáneo se encuentra por debajo de los 5 Hz lo que permite distinguirlo de la actividad registrada en el estado de relajación, el cual se encuentra entre los 13 a 22 Hz y su duración es inferior a los 400ms. Por su parte el parpadeo voluntario también se encuentra por debajo de los 5 Hz, pero tiene una duración entre 400 y 500ms, se halló que la ejecución de tres parpadeos en un intervalo entre 1,5 y 2,5 segundos permite obtener un buen desempeño en el interés de controlar el sistema de

iluminación de una casa. Las señales provenientes del movimiento de los ojos hacia la izquierda o a la derecha, así como las de los movimientos hacia arriba y hacia abajo contienen muchos artefactos relacionados con el parpadeo que emerge de forma espontánea y el movimiento del globo ocular, por lo que no es conveniente emplearlas como señales activadoras del sistema de iluminación propuesto, considerando que las mejores señales obtenidas provenían del parpadeo voluntario, los autores deciden pasar las señales por un proceso de filtración que elimina el ruido de red y las componentes en frecuencia por encima de 5Hz, obteniendo señales más claras que pudiesen ser más representativas para el algoritmo de clasificación, de esta manera se llega a un mecanismo de activación en el que se deben cerrar y abrir los ojos en intervalos de 2 y 3 segundos respectivamente, como señal disparadora o de activación del sistema de iluminación propuesto.

En el trabajo de investigación de (Belkacem et.al, 2015) se busca controlar un juego en dos dimensiones por medio de la detección de los movimientos oculares sobre señales EEG, implementando un sistema de comunicación asíncrono, para esto registraron los datos de 5 sujetos, de los cuales 4 eran hombres con una edad promedio de 26,2, quienes fueron ubicados sobre una silla a cierta distancia de un monitor, el experimento se dividió en dos etapas para probar la eficiencia del algoritmo propuesto, una en tiempo real y otra basada en el control de las acciones de un video juego en dos dimensiones, en el desarrollo de la primera etapa se solicitaba a los participantes que movieran una bola blanca a cinco posiciones distintas, las cuales eran: derecha, izquierda, arriba, abajo y el centro, por medio de la ejecución de movimiento oculares, además de esto debía cambiarse el color de la esfera por medio del uso del parpadeo, los sujetos debían aplicar 10 repeticiones para cada movimiento ocular, cada uno ejecutado en lapso de 60 segundos, durante los 10 primeros segundos se les pedía a los sujetos que movieran la bola hacia algunas de las direcciones posibles, en el transcurso de los últimos 10 segundos se le solicitaba al usuario que parpadeara tres veces para implementar un cambio de color. El desempeño del algoritmo se evaluó en experimentos en tiempo real, y se tuvo en cuenta la precisión en la elección de los comandos que permitían mover la bola o el personaje en la dirección deseada. Parámetros como la precisión, la sensibilidad y la especificidad fueron calculados para tres clases (derecha, izquierdo e inactivo). Los participantes obtuvieron un desempeño similar en ambas configuraciones obteniendo una precisión promedio de 80,2% en el sistema con retroalimentación auditiva. Los investigadores encontraron similitudes entre el movimiento hacia arriba de los ojos y el parpadeo, como estímulos

importantes del sistema, por lo que implementan una nueva fase combinando estas dos clases, encontrando un incremento de la precisión en el control de la bola blanca.

De otro lado, en la investigación de (Chaturvedi & Gupta, 2018), se desarrolla una interfaz cerebro computador para seleccionar caracteres alfanuméricos sobre un teclado virtual usando las señales electroencefalográficas del parpadeo como medio de control y no como artefacto a suprimir como ocurre en buena parte de los trabajos de investigación, la detección de la señal se realiza a través de dos parámetros, la amplitud y el coeficiente de curtosis, este último es un indicador de como se distribuye la señal, para este trabajo, dicha distribución no fue gaussiana, este coeficiente adopta valores diferenciables cuando hay un ojo abierto, un ojo cerrado o cuando se presenta un parpadeo, en contraste con ruidos que pueden perturbar la señal como el ruido de red o el asociado a acciones como encender o apagar un interruptor en las inmediaciones del espacio de trabajo, para los cuales la kurtosis es baja. En este trabajo se usaron dos electrodos para el registro de las señales EEG en las posiciones FP1y F3 del sistema internacional 10-20, el electrodo de referencia se ubicó en el hueso mastoide, en el sistema desarrollado se requerían de 5 segundos para ejecutar el parpadeo y para realizar una selección, el sistema requería de 20 segundos, tiempo en el cual podían registrarse una cantidad de parpadeos no superior a tres; el teclado generado contenía todos los caracteres de la (A-Z) y el carácter espacio, para un total de 29 caracteres, subdivididos entre bloques, los cuales contenían tres columnas y cada una de tres caracteres, de manera que se pudiera acceder a cada nivel empleando las tres acciones disponibles (parpadear una, dos y tres veces), el algoritmo implementado alcanzó con una tasa de transferencia de información de 1 carácter/min, que según los investigadores es superior a implementaciones similares como la de (B. Obermaier et.al.) que alcanzaban una tasa de 0,85 caracteres/min.

4. Marco teórico

4.1. Habilidades motoras

La principal capacidad y característica de los seres vivos es el movimiento que se manifiesta a través de conductas motrices. Díaz (1999) las presenta en tres categorías:

Movimiento reflejo, es el comportamiento motor involuntario y no consciente caracterizado por su alta velocidad de ejecución; son innatos, la primera manifestación de la motricidad en el recién

nacido, cada vez que el individuo recibe un estímulo se produce una respuesta concreta. La medula espinal es el centro nervioso que los origina junto con el tronco cerebral. Un ejemplo es la tos, el estornudo, succión, entre otros. Dentro de su importancia se encuentran el control de la postura, la prevención de lesiones y el control de diferentes funciones orgánicas (Díaz, 1999).

Movimiento voluntario, el individuo lo realiza de manera consciente, no son innatos a medida que se repiten pueden automatizarse pero siempre pueden mejorarse o modificarse de manera consciente. Es el resultado de una intención u objetivo y del control de coordinaciones musculares que pueden variar de complejidad. La actividad del córtex cerebral y el sistema motor piramidal son los que lo controlan (Díaz, 1999).

Movimiento automático, es realizado de manera inconsciente, son consecuencia de la repetición de movimientos voluntarios que se van transformando en un hábito llegando al punto de no involucrar la atención y la consciencia. Llega a ser eficaz ya que es adaptado para un fin específico y no necesita de concentración continua (Díaz, 1999).

Los esquemas motores son formas esenciales del movimiento sobre los que se construye toda la motricidad del individuo, aparecen de forma progresiva, a medida que el individuo se va desarrollando se van perfeccionando y adaptando a las características del medio que lo rodea (Díaz, 1999). Los esquemas motores son: Caminar, Correr, Saltar, Coger, Lanzar, Golpear, Rodar, Reptar y Trepár.

Batalla (2000), afirma que la habilidad motriz es entendida “como la competencia (grado de éxito o de consecución de las finalidades propuestas) de un sujeto frente a un objetivo dado, aceptando que, para la consecución de este objetivo, la generación de respuestas motoras, el movimiento, desempeña un papel primordial e insustituible.” (p. 8). Y la destreza motriz es la “capacidad del individuo de ser eficiente en una habilidad determinada”.

Las habilidades y destrezas motrices se pueden dividir en básicas y específicas, entendiendo las básicas como la realización de uno de los esquemas motores mencionados anteriormente o la combinación de varios de ellos, se caracterizan por ser movimientos no estandarizados, entre más repeticiones se realicen, se llega a la automatización de la habilidad. Las específicas buscan el cumplimiento de un objetivo concreto con pasos definidos y bien determinados, entre más

habilidades motrices básicas se desarrollen las habilidades específicas serán diferenciadas y se podrán desarrollar correctamente. La diferenciación entre las habilidades básicas y específicas viene dada por el nivel de destreza que se emplea en el desarrollo de cada una.

En este trabajo se describe la clasificación presentada por Cratty, donde consideró como punto de referencia los grupos musculares (grandes o pequeños) que debían trabajar al desarrollar y realizar alguna habilidad motriz, permitiendo la descripción de las partes del cuerpo empleadas y el grado de precisión obtenido, llegándolas a definir como de carácter global o fino.

Las habilidades motoras globales o gruesas, hacen referencia al desarrollo y adquisición de nuevos patrones complejos de movimiento, comúnmente el desarrollo de las habilidades motoras globales precede al desarrollo de las habilidades motoras finas. Los movimientos motores globales de un niño suelen ser rodar, gatear, sentarse, caminar, lanzar, entre otros, para poder realizar estos movimientos se emplean los grandes músculos del cuerpo localizados comúnmente en hombros, brazos, cadera y piernas; sin un correcto desarrollo de las habilidades motoras globales, las habilidades motoras finas se convierten en todo un desafío para el individuo. Por otra parte las habilidades motoras finas, hacen referencia a los movimientos pequeños y refinados realizados con los brazos, manos y dedos, usualmente utilizados para alimentarse, asearse, escribir, realizar tareas manuales, manipular instrumentos, entre otros. Estos inician con grandes y descoordinados movimientos de las manos y muñecas, a medida que se van refinando se logra un movimiento controlado de los dedos. Los movimientos motores finos se dividen en tres categorías: Agarrar, Alcanzar y Soltar. El desarrollo adecuado de las habilidades motoras finas representa una parte importante para el desarrollo cognitivo, social y emocional; ya que son las manos las que permiten al individuo tocar, sentir, comunicarse y cuidarse a si mismo (Curtis & DeCelle, 2005).

Desde hace bastantes años el estudio de la naturaleza del movimiento ha sido objeto de investigaciones en diversos campos, obteniendo como resultado teorías y modelos del aprendizaje y control motriz, algunos de estos modelos son: los cibernéticos (teoría de Adams del circuito cerrado, teoría de Schmidt), de procesamiento de información (teoría de Welford, teoría de Marteniuk), Adaptativos o de control jerárquico, descriptivos (Fitts y Posner, Bernstein, Gentile), entre otros (Navarro, et al., 2001).

Estas teorías han sido claves para los campos relacionados con la rehabilitación, donde “Los métodos específicos habitualmente empleados en neuro-rehabilitación vienen pues determinados por las suposiciones fundamentales sobre la causa y la naturaleza del movimiento de forma que la teoría se constituye en la base teórica de la práctica médica” (Cano-de-la-Cuerda, et al., 2015, p. 33), con el fin de mantener habilidades existentes, reaprender habilidades olvidadas y aprender nuevas habilidades.

4.2. Hemiparesia

La hemiparesia es una condición neurológica que afecta una mitad del cuerpo (parte superior e inferior derecha o izquierda) producida por la falta de oxígeno en el cerebro, los miembros afectados pueden presentar debilidad o rigidez lo que impide el movimiento natural del cuerpo, en muchos casos se pierde la capacidad de controlar las partes afectadas. El nivel de parálisis parcial se manifiesta de maneras diferentes en todos los casos pero siempre va a ser un grado menor a la parálisis total o hemiplejía. A pesar de que los hemisferios del cerebro controlan la mitad contraria del cuerpo cuando se habla de hemiparesia se tiene en cuenta la mitad del cuerpo que presenta la afectación mas no el hemisferio del cerebro lesionado (Hemiweb, 2015).

Entre las causas principales se encuentran los trastornos vasculares presentándose con más frecuencia el accidente cerebrovascular, aunque también puede producirse por lesiones en la medula espinal cervical o en el tallo cerebral, traumas, esclerosis múltiple, sarcoidosis, hematoma subdural, meningitis, SIDA, enfermedades degenerativas, entre otras (Kasper et al., 2005).

4.3. Accidente cerebrovascular (ACV)

Consiste en la pérdida aguda de la función cerebral debido a alguna afección en los vasos sanguíneos, puede ser de tipo hemorrágico o isquémico (Mant & Walker, 2011). El ACV hemorrágico, es causado por el rompimiento de la pared de un vaso sanguíneo, un ensanchamiento congénito o un aneurisma cerebral. El ACV isquémico, es causado por la obstrucción (coágulo o trombo) de algún vaso sanguíneo que se encarga de suministrar sangre al cerebro, por lo general

son transitorios y ceden de forma espontánea ya que el trombo se destruye y continúa el flujo normal de sangre hacia el cerebro. A causa de la irrupción en el flujo normal de sangre, las células cerebrales comienzan a morir causando disfunción sensorial, motora o del lenguaje, o ceguera unilateral transitoria (Cardinali, 2007).

Dentro de las causas del ACV se encuentran diferentes factores de riesgo asociados: Hipertensión arterial, Diabetes, Obesidad, Enfermedad cardíaca, migraña, consumo de tabaco, consumo excesivo de alcohol, inactividad física, dieta malsana, entre otros (Micheli & Fernández, 2010). Sin embargo, se puede estimar que los que tienen más prevalencia son la hipertensión, consumo de tabaco y fibrilación auricular (ritmo cardiaco rápido e irregular), los dos últimos fuertemente asociados a la edad (Mant & Walker, 2011).

Los pacientes que sufren de un ACV y sobreviven a este, pueden presentar complicaciones médicas como: infecciones (en el tracto urinario y el pecho son las más frecuentes), movilidad reducida, las principales complicaciones son úlceras por presión, trombo embolismo venoso (ocupación de las venas por un trombo), dolor y caídas. Los pacientes pueden presentar debilidad motora severa en al menos dos áreas (rostro, brazo o pierna), en un lado del cuerpo (hemiparesia), o pérdida de la movilidad total en un lado del cuerpo (hemiplejía). También pueden presentar afasia (trastorno del lenguaje, incapacidad o dificultad de comunicarse), ataxia (dificultad para coordinar los movimientos), hemianopsia (pérdida parcial de la visión), entre otras. Además pueden manifestar problemas psicológicos debido al estrés emocional, donde aproximadamente 30-40% de los pacientes se ven afectados por la angustia emocional, depresión y ansiedad, principalmente por las restricciones asociadas a su discapacidad al querer realizar tareas de la vida diaria independientemente o al enfrentarse a terapia que no llega a ser efectiva para su recuperación (Mant & Walker, 2011).

4.4. Rehabilitación

Después de una lesión cerebral aguda la neuro-rehabilitación tiene por objetivo la recuperación optima funcional de las partes afectadas, apoyándose en la fisioterapia ya que esta ayuda a optimizar el rendimiento motor en acciones funcionales haciendo uso de tareas, contextos y

acciones cotidianas basadas en investigación científica, que ayudan al entrenamiento del control motor y atienden a factores que influyen en la reorganización del cerebro después de una lesión (Carr & Shepherd, 2003). Es de vital importancia la apropiación del conocimiento de la anatomía y de la dinámica de los movimientos humanos para realizar entrenamiento motor, a pesar de que han surgido múltiples estrategias para abordar las necesidades de rehabilitación no existen resultados contundentes sobre la efectividad de muchos de estos enfoques, sin embargo se han realizado investigaciones clínicas que buscan documentar evidencias sobre que intervenciones pueden resultar más efectivas en contextos claramente definidos. Es importante aclarar que en muchos casos la rehabilitación no logra mitigar completamente el daño neuronal sin embargo sigue mostrando buenos resultados en mejoras parciales del daño (Carr & Shepherd, 2003).

Atendiendo a esta necesidad estudios han evaluado estrategias y rutinas que tienen en cuenta múltiples enfoques que ayudan al reentrenamiento motor desde diferentes perspectivas (Schaechter, 2004) con el fin de mejorar los resultados obtenidos en la rehabilitación. Uno de los entrenamientos que se utiliza en la actualidad es el entrenamiento orientado a tareas, este sugiere la realización de tareas funcionales que están dirigidas al cumplimiento de un objetivo específico, así como brindar retroalimentación apropiada y la práctica de movimientos repetitivos (Roos, Harvey & Lannin, 2009). Estos objetivos pueden estar dirigidos a tareas concretas o abstractas, es de resaltar que la utilización de tareas concretas ha demostrado mejoras significativas comparado con el uso de las tareas abstractas (Carr & Shepherd, 2003). Dentro de las técnicas más empleadas para estimular la recuperación motora en las extremidades superiores se encuentran: Los ejercicios de fortalecimiento muscular, fortalecimiento muscular isocinético, estiramiento, entrenamiento bilateral, uso forzado, tratamiento de movimiento inducido por restricción, observación del movimiento e imitación motora, terapia de espejo, estimulación eléctrica, bio-retroalimentación, entre otras (Hattem et al., 2016).

4.4.1. Bio-retroalimentación

La bio-retroalimentación es una técnica del condicionamiento operante en donde se brinda información a un sujeto sobre un proceso biológico propio, la cual le permite controlar y modificar voluntariamente determinadas funciones corporales; el autocontrol es fundamental para que la

modificación de los procesos se cumpla de forma exitosa, es decir que el individuo es responsable de sus propios resultados (Fernández, et al., 1998).

Surgió en el campo de la psicología y con el tiempo se convirtió en una herramienta utilizada para tratar diferentes tipos de problemas médicos: migrañas, hipertensión, asma, arritmia cardíaca, parálisis e inactividad muscular, ansiedad entre otras; también es utilizada frecuentemente en ciencias del deporte, músicos y otras áreas (Morris & Maisto, 2005).

Para que el proceso de bio-retroalimentación pueda ejecutarse es necesario contar con instrumentos que puedan medir las respuestas biológicas necesarias (tensión muscular, presión sanguínea, temperatura de la piel, frecuencia cardíaca, ondas cerebrales, etc.), además se pueden adaptar diferentes estímulos que brindaran la información recopilada al sujeto, que pueden ser de carácter visual, auditivo, térmico, de fuerza, electromiográficos, entre otros (Maciaszek, Borawska y Wojcikiewicz, 2014). Dos instrumentos principales para realizar la bio-retroalimentación son: Electromiografo (EMG) y Electroencefalograma (EEG) (Cox, 2008).

4.4.2. Prueba de Fugl-Meyer

Para la medición de la efectividad de la rehabilitación se utilizan pruebas que miden el desempeño motor de los sujetos, la prueba de Fugl-Meyer es un instrumento que fue creado en el año 1975 por Axel R. Fugl-Meyer, Lisbeth Jääsco, Ingerged Leyman, Sigyn Olsson and Solveig Steglind en Suecia, con el objetivo de evaluar la discapacidad causada en miembros superiores e inferiores por un ACV a partir del desempeño del paciente. Mide funcionamiento motor, equilibrio, sensibilidad y función articular en pacientes con hemiplejía, puede ser aplicada en su totalidad o se puede aplicarse cada escala independientemente, la prueba consta de 114 ítems el puntaje total que se puede obtener es de 226 puntos y cada ítem se evalúa de 0 a 2 puntos. Una de las grandes ventajas de este instrumento es que no requiere de un equipo especializado para su aplicación, sin embargo debe ser aplicada por un entrenador físico o terapeuta ocupacional; además en estudios realizados ha demostrado ser confiable y con sensibilidad al cambio, por lo que se puede usar en varios momentos del tratamiento para medir la recuperación de cada paciente (Canadian Partnership for Stroke Recovery, 2016).

4.5. Exoesqueletos

Son llamados robots portátiles, pueden ser usados con el fin de aumentar, complementar, mejorar o potenciar la función y la capacidad de alguna extremidad de los seres humanos, en este caso los robots se adaptan a la misma y operan junto a está; también pueden ser usados para sustituir y reemplazar completamente las extremidades faltantes, como en el caso de las amputaciones (Pons, Ceres, & Calderón, 2008).

López et al. (2014) los describen como “robots acoplados a las extremidades del cuerpo humano enfocados en el incremento de su fuerza, velocidad y rendimiento principalmente”, las aplicaciones más conocidas son en la milicia, en la industria y en la medicina. Su estructura, inspirada en los exoesqueletos que se encuentran en la naturaleza, puede estar compuesta por sensores, que se encargan de recibir señales nerviosas y enviarlas a los músculos del sujeto que lo use.

Pons, Ceres & Calderón (2008) los clasificaron en robots extensores, ortopédicos y protésicos. Los primeros extienden la fuerza y la capacidad de las extremidades superiores humanas, por lo general se usan en la disposición de maestro-esclavo y con frecuencia son teleoperados. Los segundos, están compuestos por una estructura mecánica que se acopla a la anatomía de la extremidad humana donde hay una correspondencia entre las articulaciones anatómicas humanas y las articulaciones del robot, tienen como objetivo principal restaurar la función o complementar la capacidad de la extremidad, que con frecuencia se puede ver afectada por el padecimiento de cierto tipo de enfermedades, condiciones neurológicas, entre otras. Los últimos, son dispositivos electromecánicos que sustituyen alguna extremidad amputada lo que hace posible reemplazar en cierta medida la función del miembro faltante.

Para que se dé una interacción entre el robot y el usuario es necesario hacer uso de una interfaz humano-robot, la cual permite conectar dos sistemas diferentes por medio de un enlace de hardware y software obteniendo como resultado una interacción cognitiva entre el robot y el humano, esta interfaz se basa en datos adquiridos por sensores que generalmente miden variables bioeléctricas y/o biomecánicas; así mismo la interfaz física se basa en una estructura y un conjunto de actuadores

que transmiten fuerzas al sistema musculoesquelético del usuario (Sakurada et al., 2013; Xiao et al., 2014; Zhang et al., 2014; Elnady et al., 2015; Lessard et al., 2018). Por medio de estas interfaces el humano está en la capacidad de controlar al robot y a su vez recibir información sobre las tareas o movimientos realizados. Como aspecto importante sobre los exoesqueletos esta la confiabilidad y seguridad, ya que la más mínima desalineación entre el exoesqueleto y las articulaciones anatómicas da como resultado fuerzas de interacción incómodas que pueden generar daños físicos a corto o largo plazo en la persona que use el exoesqueleto, en este caso las estrategias de control, los sensores y los actuadores empleados para el desarrollo del dispositivo están estrechamente relacionados con la correcta interacción entre humano y robot. Además cabe resaltar que la portabilidad es uno de los aspectos que aún es tema de investigación ya que se requieren tecnologías compactas, de tamaño reducido y con gran eficiencia energética.

Dentro de los usos que se les está dando en la actualidad está el del concepto de exoesqueleto de rehabilitación y compensación funcional que es propuesto en el año 1883 por el profesor H. Wangenstein quien imaginó el concepto de un asistente de movilidad para científicos sin capacidad funcional en las piernas, el cual sería neumático y se activaría mediante el reconocimiento de bioseñales; en la actualidad estudios han demostrado que su aplicación en rehabilitación es factible, efectiva y prometedora (Hu et al., 2013; Xiao, Elnady, Webb, & Menon, 2014; Elnady et al., 2015; Lessard et al., 2018).



Ilustración 6. Exoesqueleto para rehabilitación de los dedos.

Fuente: Zhang et al., 2014

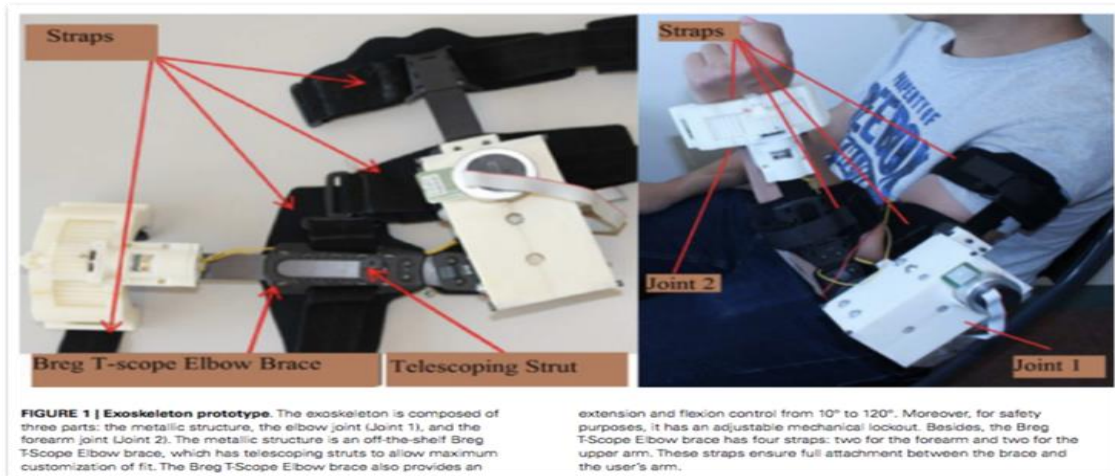


Ilustración 7. Exoesqueleto para rehabilitación de la extremidad superior.

Fuente: Elnady et al., 2015

4.6. Interfaz cerebro-computadora (BCI)

También llamada interfaz cerebro-maquina (BMI), interfaz neural directa o interfaz mente-maquina (MMI), Wolpaw et al. (2002) la definieron como "un sistema de comunicación en el que los mensajes o comandos que un individuo envía al mundo externo no pasan a través de las vías de salida normales del cerebro de los nervios y músculos periféricos" y Minguez (2012) la define como "un sistema de ingeniería capaz de traducir nuestras intenciones en interacción real con un mundo físico o virtual". Lo que quiere decir que esta interfaz permite utilizar salidas novedosas para interactuar con sistemas que buscan complementar el sistema nervioso central del usuario; este tipo de tecnología cobra importancia significativa para personas con el sistema nervioso central comprometido es decir que presentan algún tipo de discapacidad motora grave. Esta tecnología se ha aplicado en diversos campos: medicina (enfermedades neurológicas), rehabilitación, educación, ocio (videojuegos), entre otros (Minguez, 2012).

Para que un sistema BCI se pueda implementar exitosamente hay que tener en cuenta cuatro actividades principales: *generación de patrones de actividad cerebral*: representados por la actividad eléctrica, campos magnéticos, entre otros; *adquisición de señales*: existen diferentes técnicas de imagen cerebral que pueden ser invasivas o no invasivas, está debe ser elegida teniendo en cuenta la actividad cerebral que se desea medir; *extracción de características*: deben ser actividades cerebrales importantes; y *clasificación*: se usan algoritmos para deducir la intención y

el estado del usuario a partir de las características previamente extraídas (Nam, Choi, & Wadeson, 2018).

Dentro de los patrones de señales cerebrales se pueden encontrar algunos como: *Potenciales relacionados con eventos P300 (ERP)*: son señales que alcanzan un pico máximo en voltaje aproximadamente 300 ms después del inicio del estímulo que puede ser de carácter visual, auditivo, táctil, o menos frecuente, olfativo o gustativo, una de sus ventajas es que se requiere poco entrenamiento inicial. *Potenciales evocados en estado estacionario (SSEP)*: hacen referencia a la actividad eléctrica del cerebro como respuesta a la estimulación de vías nerviosas sensoriales específicas. Se pueden encontrar tres tipos, potenciales evocados auditivos en estado estable (SSAEP), se registran en el cuero cabelludo y se originan en el tronco cerebral; potenciales evocados visuales de estado estacionario (SSVEP), se ubican en el lóbulo occipital y son producidos al enfocarse en un estímulo visual constante, por ejemplo una luz intermitente, permitiendo su clasificación por frecuencia de parpadeo (Luth et al., 2007); y los potenciales evocados somatosensoriales de estado estacionario (SSSEP), es una respuesta cerebral electrofisiológica sinusoidal provocada por estímulos vibrotáctiles (Nam et al., 2018). *Imaginación motora*: consiste en la activación de circuitos neurales involucrados en el control motor a partir de la imaginación del movimiento de alguna extremidad, estos pensamientos generan actividad en la corteza motora relacionada con dicha extremidad, este último es un BCI de tipo asincrónico ya que es el usuario el que decide cuando enviar información al sistema (Minguez, 2012).

Dentro de los métodos de adquisición de señales cerebrales se pueden encontrar los invasivos y los no invasivos, los métodos no invasivos se caracterizan por que no requieren: la realización de cirugías para ser utilizados, de implantes internos de carácter químico o mecánico, de la introducción de agujas para medir las señales, por el contrario utilizan sensores que pueden ser ubicados sobre la piel o rodear la totalidad del cráneo, pueden detectar la actividad eléctrica o magnética del cerebro o medir indirectamente las características cerebrales (Bhattacharyya et al. 2015). El método no invasivo más común para trabajar con BCI es: la electroencefalografía (EEG) que mide la actividad eléctrica de grupos de neuronas activas dentro de la corteza cerebral a través de electrodos de superficie, los datos obtenidos se identifican por frecuencia y amplitud en microvoltios y tienen características específicas que pueden reflejar niveles específicos de actividad

cerebral y estados mentales; por lo general los electrodos están fabricados con oro, plata o cloruro de plata, pueden ser secos o húmedos, los húmedos necesitan de gel conductor entre la superficie de contacto y el electrodo. Como métodos de registro no invasivo también se pueden encontrar: la magnetoencefalografía, que registra los campos magnéticos generados por la activación de un grupo de neuronas; la resonancia magnética funcional, que identifica la respuesta hemodinámica del cerebro; la espectroscopia funcional del infrarrojo cercano, que se basa en los cambios de la sangre oxigenada y desoxigenada en la corteza cerebral; y la tomografía de emisión de positrones, que se utiliza imágenes de radiación tridimensional para medir procesos funcionales dentro del cuerpo humano (Nam et al., 2018).

Por otro lado, los métodos invasivos requieren del contacto directo de los electrodos con el tejido cerebral, debido a esto son más precisos pero pueden conllevar riesgos mayores. Un ejemplo de estos métodos es la electrocortigrafía conocida también como EEG intracraneal que registra impulsos eléctricos y el registro de neuronas intracorticales que permite medir la actividad neuronal en la materia gris del cerebro (Nam et al., 2018).

4.7 Parpadeo

Es el cierre de ambos párpados del ojo, suele ser involuntario e imperceptible ya que en condiciones normales puede tardar aproximadamente 400 milisegundos en completarse (Abd, 2009). Su propósito principal es humectar el globo ocular por medio de lágrimas y una sustancia lubricante secretadas por el ojo, ayuda a limpiar sustancias y a difundir nutrientes, además, otro de los propósitos del parpadeo está relacionado con la función cognitiva (atención, estabilización visual y regulación del flujo de información visual). La frecuencia de los parpadeos puede depender de diversos factores visuales, ambientales, la edad, la fatiga, entre otros; en la posición primaria de reposo la frecuencia esta entre los 12 y los 19 parpadeos por minuto, durante la lectura esta entre 4.6 y 11.2 parpadeos por minuto y durante la conversación esta entre 15.9 y 27.1 parpadeos por minuto. Los parpadeos pueden ser de diferente naturaleza: el *reflejo*, producido por un estímulo externo, por estimulación del nervio trigémino o por sensación de sequedad; el *voluntario*, este es realizado de forma consciente e involucra múltiples áreas de la corteza cerebral: el ganglio basal, el tronco cerebral y las estructuras del cerebelo; y el *involuntario*, este se origina sin que hayan estímulos externos que lo provoquen, es asociado con el estado psicofisiológico de los sujetos

(Tapia, 2015) y el *espontáneo*, que es el parpadeo cotidiano cuya frecuencia se ubica generalmente entre los 10 a 20 veces por minuto (León et.al).

Los parpadeos se caracterizan por presentar picos de voltajes fuertes en la medición de señales EEG, razón por la cual dificulta el análisis de las diferentes señales EEG, en la mayoría de los casos los dispositivos traen filtros que permiten eliminar la señal causada por los parpadeos, sin embargo, hay trabajos que aprovechan la amplitud de esta señal para procesarla como parámetro de control (Abd, 2009).

Para producir un parpadeo es necesario que se generen una serie de impulsos aferentes, los cuales se transmiten en buena parte por los nervios trigémino, auditivo y óptico, los eferentes por su parte terminan involucran al menos dos músculos, entre los que se encuentran el orbicular, el cual cuenta con fibras circulares irregulares y va inervado en el nervio facial, de ahí que permita el cierre del párpado, el otro es el elevador del párpado, el cual va inervado en el nervio motor ocular común. Las respuestas reflejas de apertura y cierre del párpado son generadas en el cerebro, el cerebelo y la porción superior de la médula espinal. (León et.al)

5. Metodología

5.1 Enfoque metodológico

Este trabajo se desarrolló basado en el modelo de investigación tecnológica aplicada, que tiene como característica principal estar dirigido a cumplir objetivos específicos, generar soluciones a problemas planteados, con frecuencia resultando en innovaciones, mejora de procesos y aumento en la calidad de los productos (Jaramillo,1999). Tiene como fundamento que la realidad puede ser transformada por el hombre, desarrollando modificaciones que propenden a las mejoras sobre desarrollos tecnológicos ya existentes, suele determinar afirmaciones particulares, operativas y aplicables, diferenciándose de los métodos cuantitativos donde se generan afirmaciones universales, teóricas y explicativas y de los métodos cualitativos donde se obtienen afirmaciones descriptivas, particulares, interpretativas o comprensivas (Casaño, 2016). Es importante mencionar

que aunque la investigación tecnológica se basa en un problema u objetivo particular es primordial articular resultados de una investigación básica o fundamental (teorías) con productos o desarrollos tecnológicos previos. En este proceso se pueden identificar tres etapas principales: 1. Proceso de investigación inicial, se refiere a la búsqueda y adaptación de teorías o planteamientos que son resultados del método científico; 2. Inclusión de necesidades sociales o industriales que dan paso a nuevos conceptos o aplicaciones; 3. Proceso de maduración y transferencia de tecnologías que permite integrar los nuevos conceptos y generar un producto final que satisfaga las necesidades sociales identificadas. Para que estas etapas se desarrollen correctamente es requerida la integración y colaboración de la academia, la industria y los usuarios finales (Lozada, 2014).

Casaño (2016) describe las etapas propuestas por García y Trejo (2012) para la realización de una investigación tecnológica: 1. Observación, se tienen en cuenta conocimientos previos, experiencia e intuición del observador; 2. Detectar el problema, se determina la situación que requiere atención; 3. Documentar, información que permita identificar y relacionar datos para tomar decisiones; 4. Reflexionar, se dan respuestas al problema o se reformula a partir de la información documentada anteriormente; 5. Elaboración de la intervención, se formula un plan para intervenir en la realidad; 6. Valorar, se evalúa la propuesta de intervención mediante la experimentación de la propuesta; 7. Comunicar, se comunica cual es la participación de los involucrados en el implementación de la propuesta; 8. Implementar, se ejecuta el plan de trabajo; 9. Seguimiento, se garantiza el cumplimiento del plan de trabajo; y 10. Evaluación, se evalúa si los objetivos se alcanzaron.

Las etapas anteriormente mencionadas además de incluir una fase de documentación e investigación hacen énfasis en el diseño, desarrollo y evaluación del producto tecnológico para solucionar una necesidad social identificada, es por esta razón que se elige como método para el desarrollo de este proyecto ya que se requirió de la identificación de una necesidad social (movilidad reducida a causa de la hemiparesia), avances tecnológicos previamente diseñados (emotiv), investigación (métodos de procesamiento de señales EEG), diseño del prototipo (exoesqueleto virtual), diseño de la intervención (ambientes de aprendizaje basados en bio-retroalimentación), implementación con los sujetos y evaluación de los objetivos (Casaño, 2016).

5.2 Muestra:

Para este trabajo de investigación se seleccionó una muestra de 4 sujetos sanos (2 hombres, 2 mujeres) con un promedio de edad de 28,75 y una desviación estándar de 2,75, quienes dieron su consentimiento para participar de este experimento.

5.3 Etapas del proyecto

Teniendo en cuenta el método seleccionado las etapas del proyecto quedaron establecidas como se muestra a continuación:

1. *Diseño del exoesqueleto virtual:* El exoesqueleto fue diseñado en el programa Solidworks para posteriormente ser importado desde Simulink utilizando la librería de SimMechanics, la cual permite representar transformaciones de coordenadas para definir la ubicación de un cuerpo en un espacio 3D. Este permite simular 4 grados de libertad, flexión-extensión del hombro, aducción- abducción del hombro, flexión- extensión del codo y flexión y extensión de la mano.
2. *Adquisición y procesamiento de señales:* Para la adquisición de señales se utiliza un casco Emotiv® EPOC del cual se selecciona un solo canal para la recepción de datos, el cual corresponde con el electrodo FP2 según el sistema internacional 10-20. El procesamiento de las señales EEG adquiridas se realiza por medio del software Simulink® de MATLAB®. Las señales que se utilizaran para el control del exoesqueleto virtual son las de los parpadeos voluntarios.
3. *Diseño de la intervención:* Para diseñar el protocolo de intervención se tomaron en cuenta tres fases importantes, la familiarización y apropiación del sujeto con la interfaz, la realización de tareas funcionales usando bio-retroalimentación visual y auditiva respectivamente y la etapa de evaluación la cual está basada en el test para extremidades superiores de Fugl-Meyer.
4. *Implementación:* Se hace la experimentación con 2 sujetos para el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual y a 2 sujetos para el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva, la experimentación se divide en 3 sesiones, cada una con una duración aproximada de 2 horas.

5. *Recolección y análisis de los datos obtenidos*: Se tienen en cuenta los datos de eficiencia y eficacia para cada una de las tareas propuestas en la intervención, para el análisis de los ejercicios de resolución de problemas se utilizan los reportes de protocolos verbales.

5.4 Intervención

A continuación se describen detalladamente las 4 fases que hacen parte del ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual como el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva:

FASE 1 (sesión 1):

El objetivo de esta fase es entrenar al sujeto para que realice los parpadeos y el sistema los reconozca apropiadamente con un 80% de precisión.

- *Etapa 1:*

El sujeto debe realizar los ejercicios sin utilizar el casco Emotiv® Epoc y no se presenta ninguna interfaz gráfica. Se realiza el entrenamiento para que la persona controle voluntariamente 2, 3, 4, 5, 6 y 7 parpadeos seguidos con una tasa de éxito de por lo menos 80%.

Ejercicio:

Se solicita al sujeto que realice 2 parpadeos en el momento que escuche la indicación (YA), este ejercicio se repetirá mínimo 10 veces. El mismo ejercicio se replica con 3, 4, 5, 6 y 7 parpadeos seguidos. El orientador indicará un tiempo de descanso de 30 segundos entre ejercicios.

- *Etapa 2:*

El sujeto debe realizar los ejercicios utilizando el casco Emotiv® Epoc y observando en la interfaz gráfica el número de parpadeos que registra el sistema y una gráfica que le permite ver en tiempo real cuando ejecuta un parpadeo (bioseñal visual) o un tono que se activa

cuando ejecuta el parpadeo (bioseñal auditiva), no se presenta la interfaz gráfica del exoesqueleto virtual. Se realiza el entrenamiento con bio-retroalimentación en orden ascendente de los parpadeos con la interfaz de parpadeo del sistema computacional, de esta manera el sujeto deberá implementar 10 repeticiones por cada una de las diferentes cantidades de parpadeos a ejecutar, se considera que un ensayo (referente a una cantidad específica de parpadeos) se supera, cuando la cantidad de veces que el sistema lo reconoce correctamente es igual o superior al 80%,

Ejercicio:

Se solicita al sujeto que realice el número de parpadeos que indica el orientador. La secuencia de trabajo definida se realiza en orden ascendente con mínimo 10 repeticiones para cada comando.

FASE 2 (sesión 2):

El objetivo de esta fase es entrenar al sujeto para que se familiarice con los comandos (número de parpadeos) que controlan cada articulación.

- *Etapa 1:*
 - Se explica al sujeto cada vista del exoesqueleto virtual y su ubicación: frontal, superior, lateral y de proyección.
 - Se explica cada una de las 4 articulaciones, con su nombre, movimiento que realiza y su color: El hombro 1 puede subir o bajar (flexión-extensión) y se representa por el color azul; el hombro 2 puede moverse hacia adentro o afuera (aducción - abducción) y se representa por el color amarillo; el codo puede subir o bajar (flexión-extensión) y se representa por el color naranja y la mano puede cerrarse o abrirse (flexión-extensión) y se representa por el color verde.

Articulación	Movimiento	Color
Hombro 1	Flexión-extensión	Azul
Hombro 2	Aducción - abducción	Amarillo
Codo	Flexión-extensión	Naranja
Mano	flexión-extensión	Verde

Tabla 1. Articulaciones y sus movimientos.

Fuente. Creación Propia

- Se explica al sujeto el número de parpadeos necesario para la activación de las articulaciones: 4 parpadeos para activar el hombro 1, 5 parpadeos para activar el hombro 2, 7 parpadeos para activar el codo, 6 parpadeos para activar la mano, 2 para detener el movimiento de todas las articulaciones y 3 para cambiar la dirección del movimiento de cada articulación.

Comando de activación (Número de parpadeos seguidos)	Articulación	Color	Movimiento
4	Hombro 1	Azul	Flexión - Extensión
5	Hombro 2	Amarillo	Aducción - Abducción
7	Codo	Naranja	Flexión - Extensión
6	Mano	Verde	Flexión - Extensión

Tabla 2. Comandos de activación para cada articulación.

Fuente. Creación Propia

Comando de activación (Número de parpadeos seguidos)	Función	Color
2	Detener el movimiento de todas las articulaciones	No aplica

3	Invertir la dirección de movimiento de las articulaciones	Rojo - Movimientos de flexión o rotación interna Azul- Movimientos de Flexión o rotación externa
---	---	---

Tabla 3. Comandos de control

Fuente. Creación Propia.

Ejercicio: En esta etapa no hay ejercicios asignados, se realizan preguntas al sujeto para verificar que la información proporcionada es clara. Las preguntas tendrían la siguiente estructura.

¿Cuántos parpadeos debo hacer para mover la articulación X en la dirección Y?

¿Qué articulación se movería con K número de parpadeos?

¿Si quiero realizar la siguiente rutina qué comandos emplearía?

- *Etapa 2:*

El sujeto debe realizar los ejercicios utilizando el casco Emotiv Epoc y observando en la interfaz gráfica el número de parpadeos que registra el sistema, la dirección de giro de los motores, gráfica que le permite ver en tiempo real cuando ejecuta un parpadeo (bioseñal visual) o un tono que se activa cuando ejecuta el parpadeo (bioseñal auditiva) y la interfaz gráfica del exoesqueleto con sus 4 vistas. Se realiza el entrenamiento con exoesqueleto virtual articulación hombro 1 (color azul) con bio-retroalimentación (Flexión - Extensión del hombro)

Ejercicio:

- Se solicita al sujeto que suba el hombro 1, lo deje activo por unos segundos y lo detenga (se realiza 5 veces).

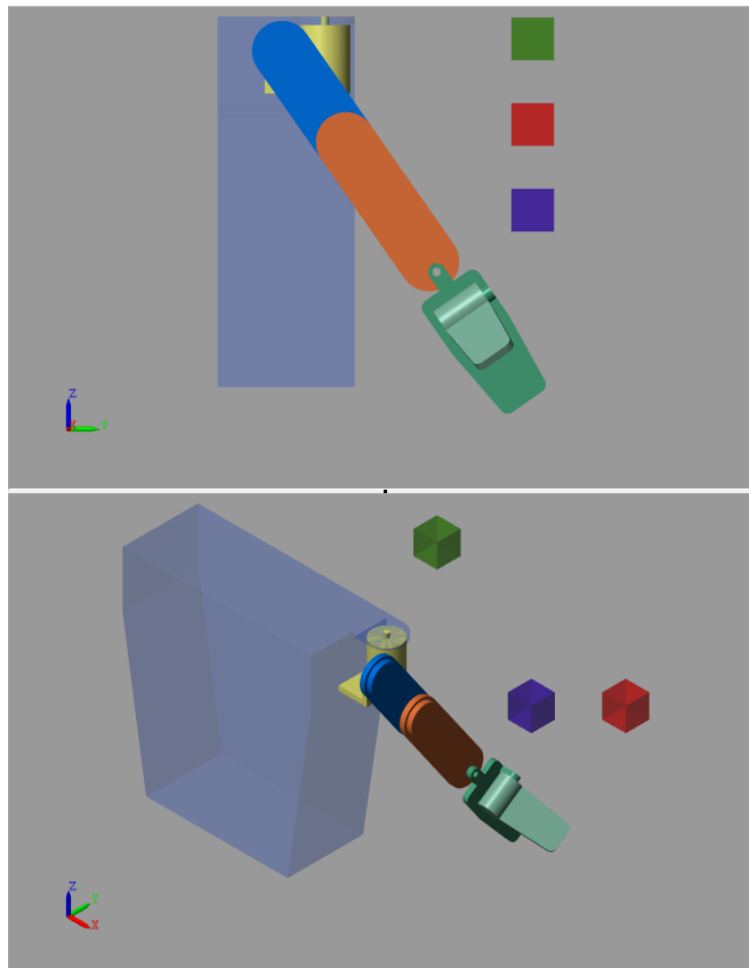


Ilustración 8. Exoesqueleto virtual flexión hombro 1.

Fuente: Creación propia

- Se solicita al sujeto que baje el hombro 1, lo deje activo por unos segundos y lo detenga (se realiza 5 veces).

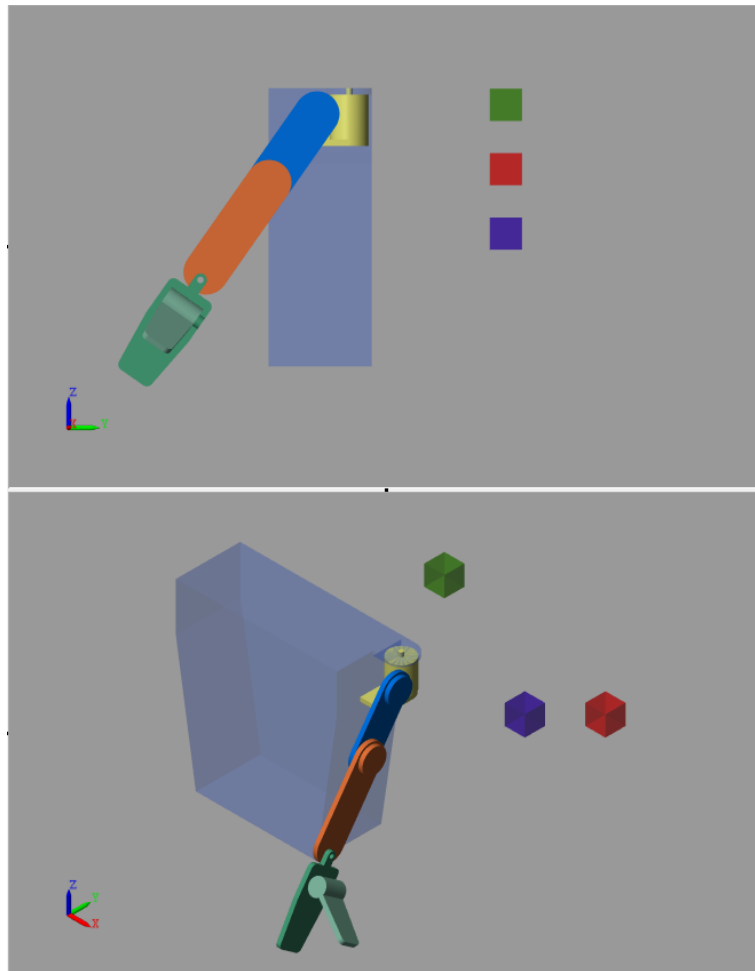


Ilustración 9. Exoesqueleto virtual extensión hombro 1.

Fuente: Creación propia.

- *Etapa 3:*

El sujeto debe realizar los ejercicios utilizando el casco Emotiv Epoc y observando en la interfaz gráfica el número de parpadeos que registra el sistema, la dirección de giro de los motores, gráfica que le permite ver en tiempo real cuando ejecuta un parpadeo (bioseñal visual) o un tono que se activa cuando ejecuta el parpadeo (bioseñal auditiva) y la interfaz gráfica del exoesqueleto con sus 4 vistas. Se realiza el entrenamiento con exoesqueleto virtual articulación hombro 2 (color amarillo) con bio-retroalimentación (Aducción - Abducción del hombro)

Ejercicio:

- Se solicita al sujeto que rote el hombro 2 hacia adentro, lo deje activo por unos segundos y lo detenga (se realiza 5 veces).

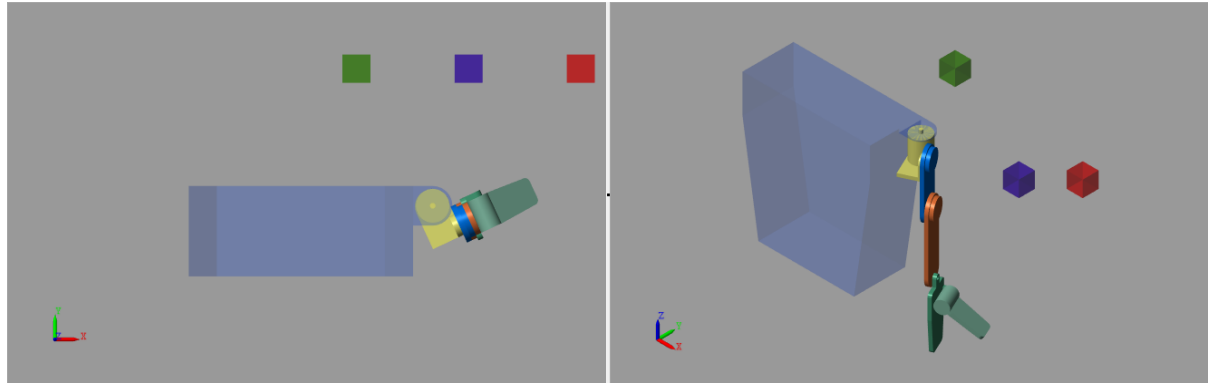


Ilustración 10. Exoesqueleto virtual aducción hombro 2.

Fuente: Creación propia.

- Se solicita al sujeto que rote el hombro 2 hacia afuera, lo deje activo por unos segundos y lo detenga (se realiza 5 veces).

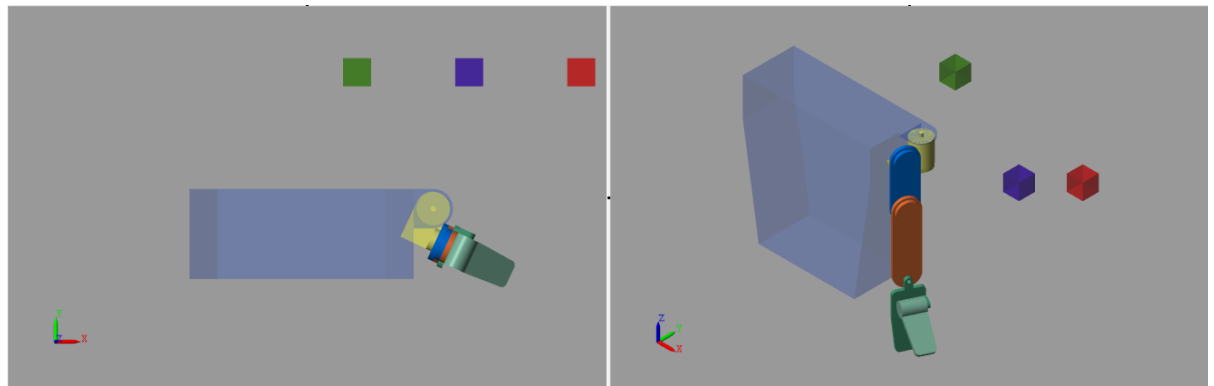


Ilustración 11. Exoesqueleto virtual abducción hombro 2.

Fuente: Creación propia.

- *Etapa 4:*

El sujeto debe realizar los ejercicios utilizando el casco Emotiv Epoc y observando en la interfaz gráfica el número de parpadeos que registra el sistema, la dirección de giro de los motores, la gráfica que le permite ver en tiempo real cuando ejecuta un parpadeo (bioseñal

visual) o un tono que se activa cuando ejecuta el parpadeo (bioseñal auditiva) y la interfaz gráfica del exoesqueleto con sus 4 vistas. Se realiza el entrenamiento con exoesqueleto virtual articulación codo (color naranja) con bio-retroalimentación (Aducción - Abducción del hombro)

Ejercicio:

- Se solicita al sujeto que suba el codo, lo deje activo por unos segundos y lo detenga (se realiza 5 veces).

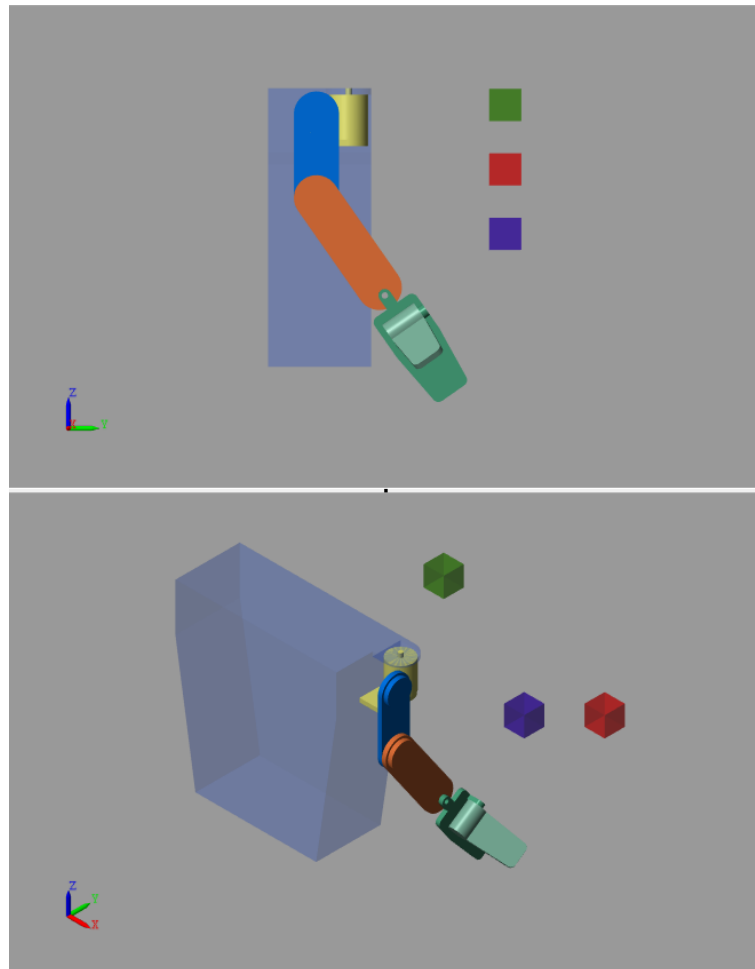


Ilustración 12. Exoesqueleto virtual flexión codo

Fuente: Creación propia.

- Se solicita al sujeto que baje el codo, lo deje activo por unos segundos y lo detenga (se realiza 5 veces).

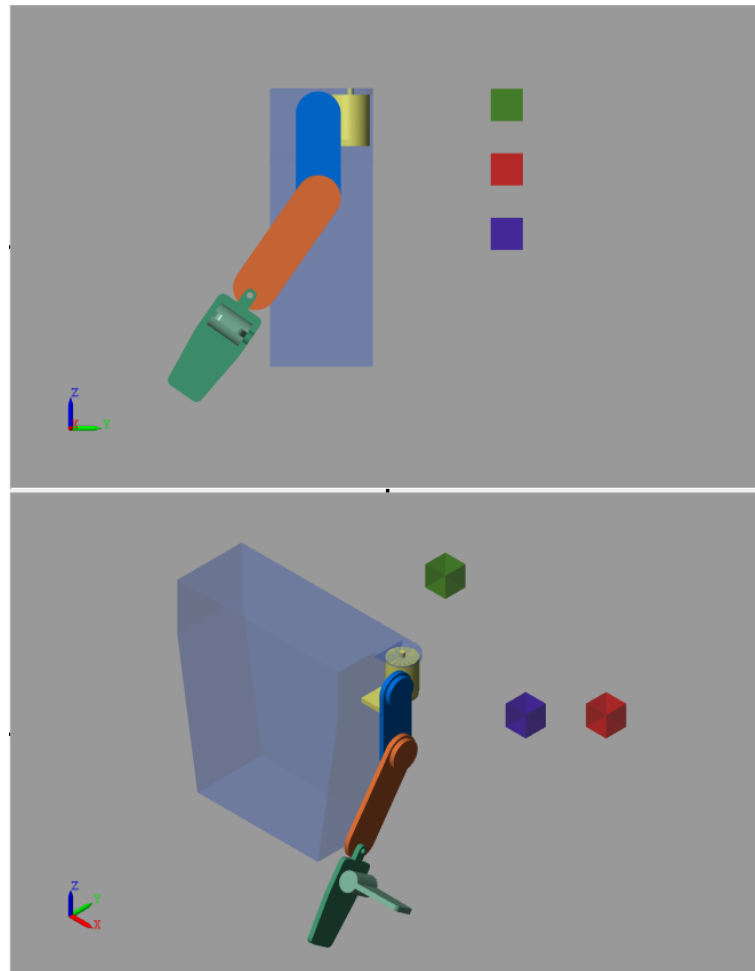


Ilustración 13. Exoesqueleto virtual extensión codo.

Fuente: Creación propia.

- *Etapa 5:*

El sujeto debe realizar los ejercicios utilizando el casco Emotiv Epoc y observando en la interfaz gráfica el número de parpadeos que registra el sistema, la dirección de giro de los motores, la gráfica que le permite ver en tiempo real cuando ejecuta un parpadeo (bioseñal visual) o un tono que se activa cuando ejecuta el parpadeo (bioseñal auditiva) y la interfaz gráfica del exoesqueleto con sus 4 vistas. Se realiza el entrenamiento con exoesqueleto virtual articulación mano (color verde) con bio-retroalimentación (Aducción - Abducción del hombro)

Ejercicio:

- Se solicita al sujeto que cierre la mano, la deje activa por unos segundos y la detenga (se realiza 5 veces).

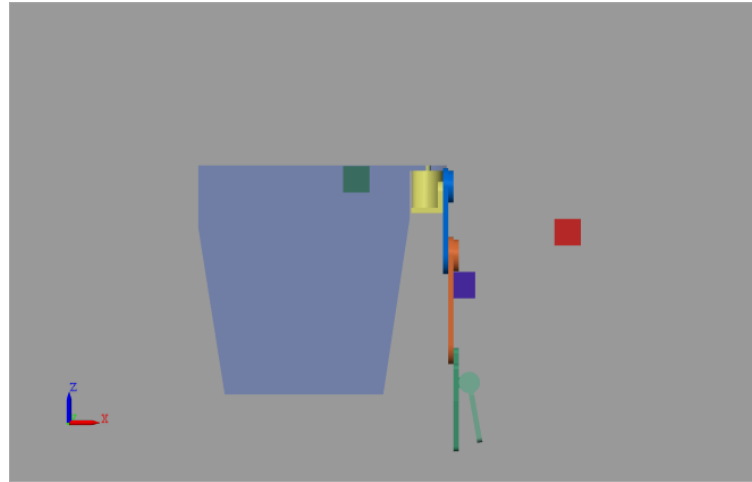


Ilustración 14. Exoesqueleto virtual flexión mano.

Fuente: Creación propia.

- Se solicita al sujeto que abra la mano, la deje activa por unos segundos y la detenga (se realiza 5 veces).

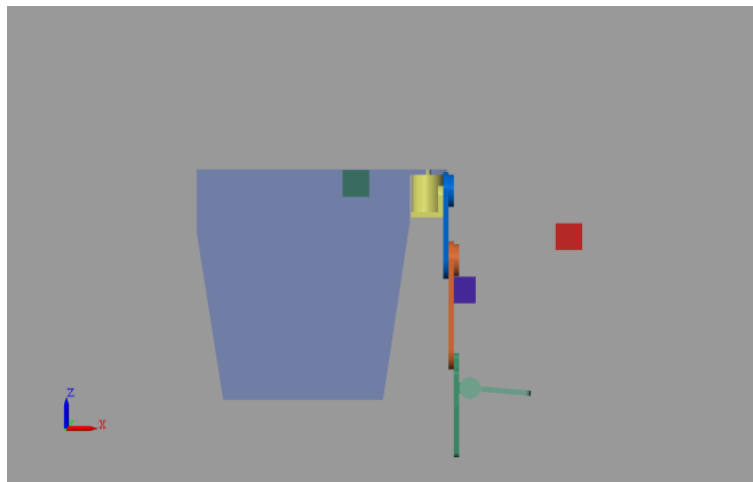


Ilustración 15. Exoesqueleto virtual extensión mano.

Fuente: Creación propia.

FASE 3 (sesión 3):

El objetivo de esta fase es que el sujeto resuelva problemas de indicación y captura.

- *Etapa 1:*

El sujeto debe solucionar problemas de indicación utilizando el exoesqueleto virtual y con apoyo de la bio-retroalimentación de parpadeos, la dirección de giro de los motores y la bioseñal. Es importante que verbalice mientras soluciona el problema.

Ejercicio:

- Se solicita al sujeto que apunte al cubo de color verde ubicado en la interfaz gráfica donde se encuentra el exoesqueleto (se realiza 2 veces).

- *Etapa 2:*

El sujeto debe solucionar problemas de captura utilizando el exoesqueleto virtual y con apoyo de la bio-retroalimentación de parpadeos, la dirección de giro de los motores y la bioseñal. Es importante que verbalice mientras soluciona el problema.

Ejercicio:

- Se solicita al sujeto que capture el cubo de color rojo ubicado en la interfaz gráfica donde se encuentra el exoesqueleto (se realiza 2 veces).

FASE 4 (sesión 3):

El objetivo de esta fase es evaluar el entrenamiento con bio-retroalimentación utilizando ejercicios basados en los numerales A (Items 3 y 4) y C del Test de Fugl-Meyer (Ver Anexo 1) para evaluar la función en la extremidad superior.

- *Etapa 1:*

En esta etapa el sujeto debe realizar los ejercicios solicitados, se utiliza solo la interfaz del exoesqueleto y el botón que indica la dirección de giro de los motores.

Ejercicio:

- Se solicita al sujeto que suba el hombro 1 de 0° a 90° (se realiza 2 veces).
- Se solicita al sujeto que suba el codo de 0° a 90° (se realiza 2 veces).
- Se solicita al sujeto que suba el hombro 1 a 90° y rote el hombro 2 hacia afuera 90° (se realiza 2 veces).
- Se solicita al sujeto que baje el hombro 1 de 90° a 180° (se realiza 2 veces).
- Se solicita al sujeto que cierre la mano de 120° a 0° (se realiza 2 veces).
- Se solicita al sujeto que abra la mano de 0° a 90° (se realiza 2 veces).

6. Descripción del desarrollo tecnológico

En este capítulo se explican cada una de las etapas que constituyen los ambientes con bio-retroalimentación desarrollados para este trabajo.

Los ambientes desarrollados en este trabajo de investigación cuentan con 5 etapas las cuales se enuncian a continuación: 1) Adquisición de la señal, 2) Procesamiento de la señal, 3) Sistema contador de parpadeos, 4) Controlador de articulaciones, 5) Exo-esqueleto virtual, 6) Bio-Retroalimentación Visual o Auditiva. 7) Interfaz gráfica contador.

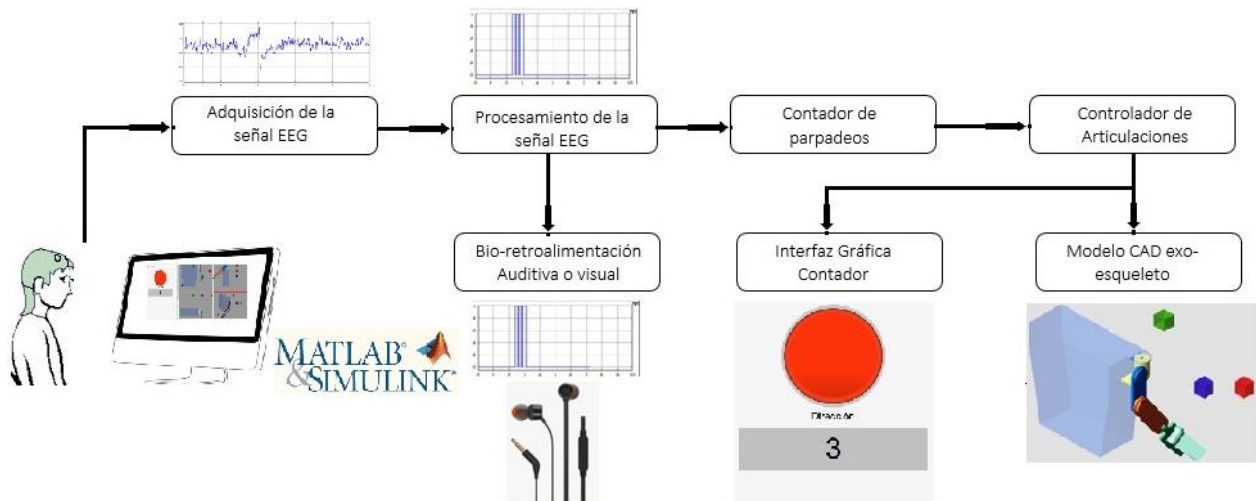


Ilustración 16. Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema.

Fuente: Elaboración Propia

6.1 Adquisición de la señal:

Este proceso es reconocido como aquel donde se toman las señales del medio para ser ingresadas posteriormente al sistema de información y en una etapa posterior someterlas a un procesamiento adecuado para darles un uso concreto dentro de una aplicación.

Las señales son adquiridas a través de un casco emotiv® EPOC adaptado, el cual posee un módulo conversor análogo digital con una resolución de 14 bits, donde el bit menos significativo equivale a $0,51\mu\text{V}$, cuenta además con una frecuencia de muestreo de 128 muestras por segundo y realiza un pre-procesado de la señal obtenida del cuero cabelludo con un filtro pasabanda de 0,16 a 43 Hz, además de un filtro notch para mitigar los efectos del ruido de la red eléctrica; cuenta con una conexión inalámbrica a través del protocolo Bluetooth de baja energía, sobre a banda de los 2,4 Hz.

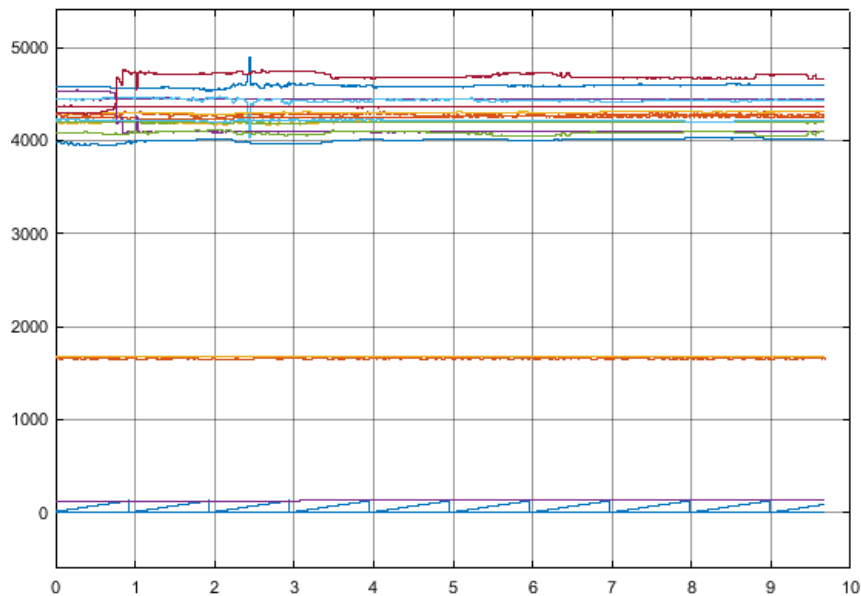


Ilustración 17. Señales de todos los canales del Emotiv® EPOC.

Fuente: Elaboración Propia

Una vez que la señal del electrodo, ubicado en la posición FP2 según el sistema internacional 10-20, es sensada por el casco emotiv® EPOC, esta fue transmitida de forma inalámbrica hacia un computador con el software MATLAB® y su entorno de diagramas de bloque para el diseño basado en modelos Simulink®, sobre el cual se efectuaron las demás etapas que integran los ambientes desarrollados.

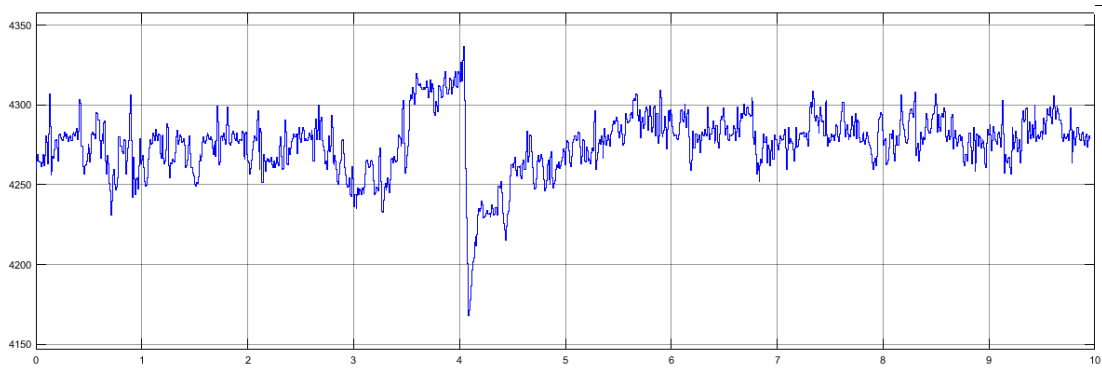


Ilustración 18. Señal del electrodo FP2 según el sistema internacional 10-20.

Fuente: Elaboración Propia

6.2 Procesamiento de la señal:

Sobre el entorno Simulink® de MATLAB® la señal se le suprimió el nivel DC, de forma que esta quedara sobre el eje del tiempo, posteriormente se pasó por una fase de detección de picos y se transformó en pulsante, de manera que cuando una parte de la señal superaba el un umbral, dicho evento se representaba en forma de pulso, dado que cuando se ejecuta un parpadeo aparecen sobrepicos notorios sobre la señal electroencefalográfica, con la fase mencionada se conseguía una señal sensible a los parpadeos, es decir, una señal donde se emitía un pulso cada vez que se ejecutaba un parpadeo. Esta señal posteriormente fue discretizada a una tasa de muestreo de 128 muestras por segundo y segmentada en paquetes de 60 muestras.

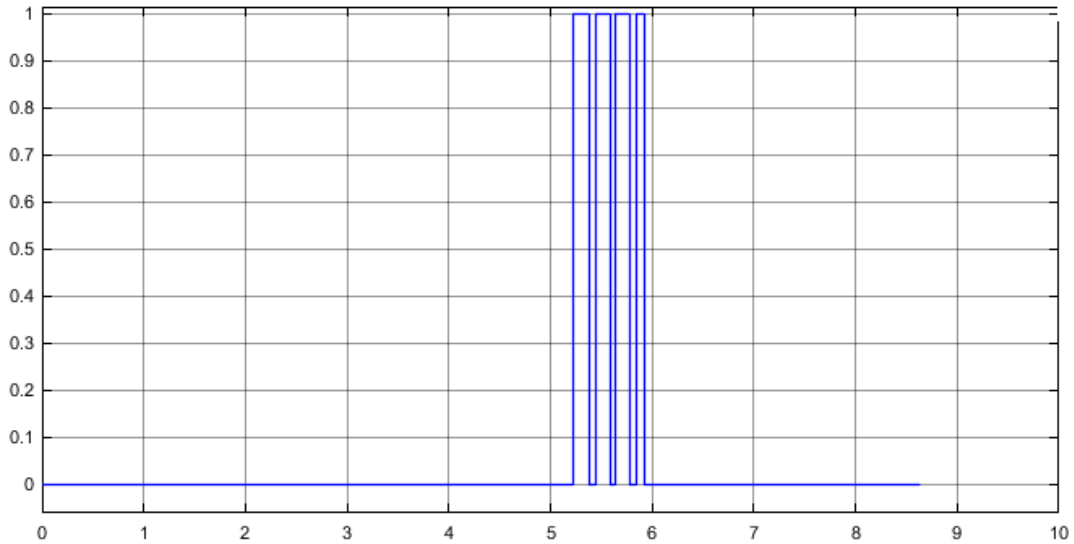


Ilustración 19. Señal de pulsos que registra los parpadeos. Muestra la ejecución de 4 parpadeos.

Fuente: Elaboración Propia

6.3 Contador de Parpadeos:

El bloque de conteo de parpadeos, toma de la etapa anterior las muestras que se reciben en los 2,8 segundo más recientes, esto equivale a recibir 360 muestras segmentados en 6 paquetes, sobre esta información, este bloque determina cuando el sujeto ha dejado de parpadear, asumiéndolo como un indicador para registrar los paquetes anteriores en búsqueda de los pulsos que contiene la señal, cabe destacar que este bloque, examina la distancia entre los parpadeos, de manera que si esta es superior a 50 muestras lo desestima arrojando la cantidad de parpadeos que si cumplen con el parámetro.

6.4 Controlador de articulaciones:

Este bloque recibe la información de la cantidad de parpadeos registrados en la etapa anterior, percibe un cambio en la cantidad de parpadeos actual, es decir, hubo un cambio en la cantidad de parpadeos ingresado por el usuario, el sistema procede a ejecutar la acción correspondiente con el valor de parpadeos más reciente, manteniéndose dicha ejecución

invariante hasta la detección de un número de parpadeos distinto. Entre los parámetros que se encarga de ajustar este bloque se encuentran el sentido de giro y la velocidad de los motores asociados a cada una de las articulaciones del exoesqueleto virtual. Este bloque arroja como salida, la velocidad de las articulaciones en función de la cantidad de parpadeos actual, dichos valores son pasados por integradores obteniendo con esto la posición, valor que servirá de referencia para orientar la posición de cada una de las articulaciones del exoesqueleto virtual.

6.5 Exo-esqueleto virtual:

La información acerca de la posición de la articulación, proveniente del bloque anterior, es tomada por el sub-modelo construido a partir de bloques del módulo SimScape® de MATLAB®, estos permiten construir modelos físicos dentro de un entorno de Simulink®, que permiten definir el comportamiento de las diferentes articulaciones del exo-esqueleto, estas partes fueron desarrolladas en el software de modelado CAD SolidWorks® 2018 y exportadas para trabajarlas en MATLAB®. De esta manera, el modelo desarrollado en SimScape permite definir las relaciones entre las diferentes articulaciones definiendo, así un sistema compuesto que debe responder de forma coherente a las leyes físicas. Los movimientos del exo-esqueleto son reflejados en una ventana con cuatro vistas, donde el recuadro superior derecho contiene la vista lateral, el recuadro superior izquierdo, la vista de atrás o posterior, el recuadro inferior izquierdo la vista superior o de techo y el último la vista en proyección.

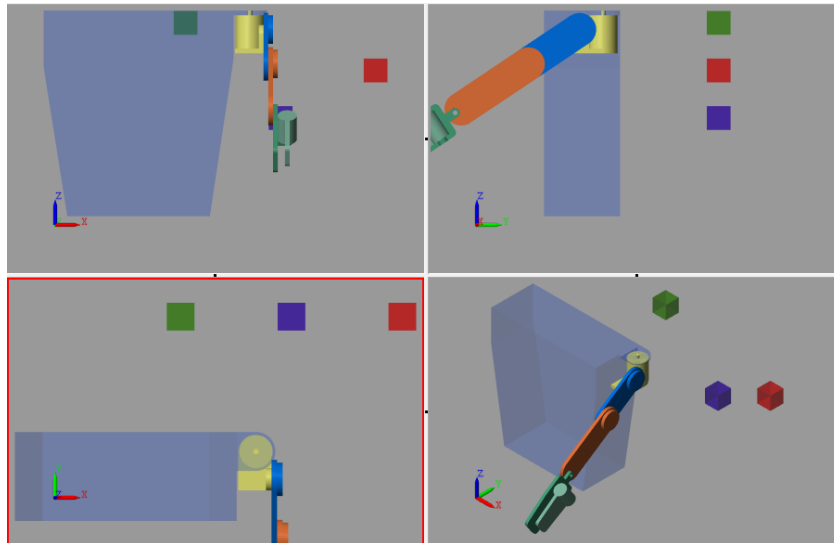


Ilustración 20. Exoesqueleto Virtual.

Fuente: Elaboración Propia

6.6 Bio-Retro alimentación Visual:

Para la ejecución de la bio-retroalimentación visual fue necesaria la presencia de una ventana donde se mostrará la evolución en tiempo real de la señal de pulsos obtenida en la etapa del procesamiento de señal.

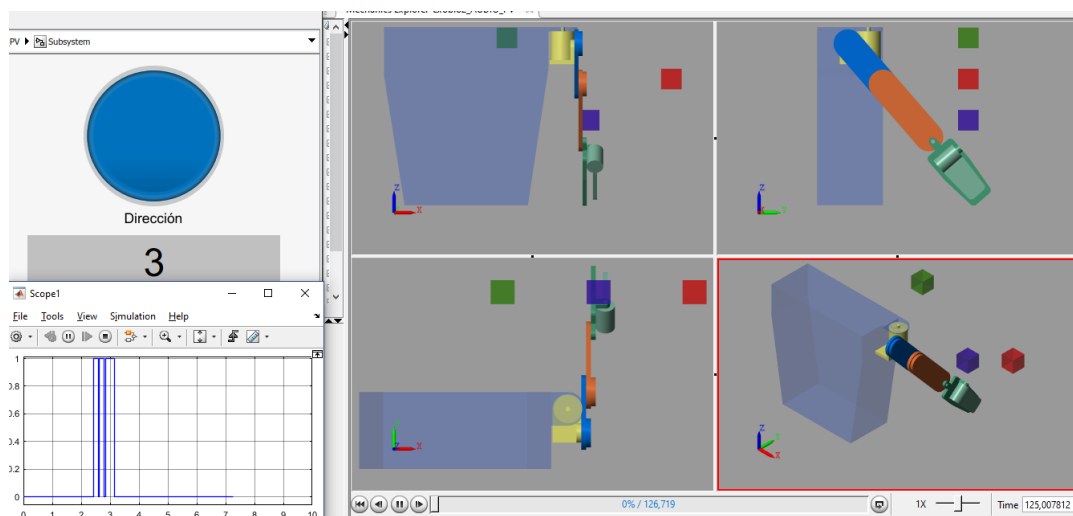


Ilustración 21. Interfaz Bio-Retroalimentación Visual.

6.7 Bio-Retro alimentación Auditiva:

Este bloque tiene como entrada la señal de pulsos obtenida de la fase de procesamiento de señal y que estaba relacionada con la cantidad de parpadeo ejecutados por el usuario, con la cual efectúa una detección de flanco de subida, para producir un pulso de un ancho particular, más angosto, que el de la señal de entrada, para con esto poder suavizar las transiciones hacia debajo de los pulsos recibidos, con el ánimo de que al acoplar esta señal resultante de ancho alterado y de transiciones suavizadas a un parlante se logre un tono audible claro y distinguible cada vez que se ejecute un parpadeo.

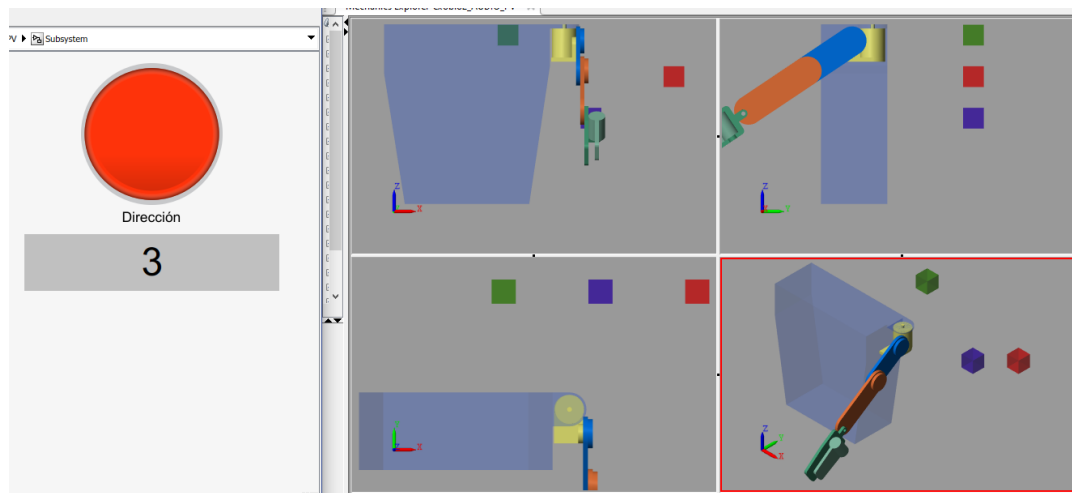


Ilustración 22. Interfaz Bio-Retroalimentación Auditiva.

Fuente: Elaboración Propia

6.8 Interfaz visual contador:

Este bloque contiene la parte de la interfaz que muestra el valor arrojado por la etapa del contador de parpadeos, es decir, contiene una etiqueta de texto que se actualiza con el valor más reciente de los parpadeos ejecutados por el usuario. Además, contiene un círculo cuyo color cambia en términos del sentido de giro actual para el movimiento de las articulaciones.



Ilustración 23. Interfaz visual contador e indicador de sentido de giro.

Fuente: Elaboración Propia

7. Descripción de los resultados

Teniendo en cuenta la intervención descrita en detalle anteriormente, se desarrollaron las cuatro fases con dos sujetos aplicando la bio-retroalimentación visual, esta consistía en una gráfica que presentaba pulsos que cambiaban en una medida de 0 a 1 cada vez que el sistema percibía un parpadeo. Y con dos sujetos aplicando la bio-retroalimentación auditiva, esta consistía en una serie de pulsos audibles que guardaban correlación con la cantidad de parpadeos efectuados, así si alguien parpadeaba dos veces, escucharía dos tonos de la misma intensidad con una distancia entre ellos tan grande como la que existía entre los parpadeos. Estas señales eran adquiridas por medio de un casco emotiv® EPOC utilizando únicamente un electrodo que correspondía con el FP2 según el sistema internacional 10-20, los datos se procesaron con el software Simulink de Matlab.

7.1 Desarrollo de la experimentación con el ambiente de aprendizaje de señales electroencefalográficas del parpadeo con bio-retroalimentación visual

A continuación, se presentan los resultados obtenidos por los dos sujetos en cada una de las fases:

Fase 1 – Etapa 1. En la tabla 4 se muestra en la primera columna el número determinado de parpadeos seguidos (2, 3, 4, 5, 6 y 7) que puede ser realizado por los sujetos 1 y 2. En la segunda y quinta columna están los aciertos al realizar la tarea del sujeto 1 y 2 respectivamente. En la tercera y sexta columna se presenta el número de errores obtenidos por el sujeto 1 y 2 respectivamente. En la cuarta y séptima columna se presenta el valor de la eficacia del sujeto 1 y 2 respectivamente al realizar la tarea. En la última columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2. En los datos obtenidos se puede evidenciar que el número de aciertos para cada sujeto varía entre 9 y 10 y para ambos casos la media de los aciertos fue de 9,33. El porcentaje de errores varía entre 0 y 1 y la media en ambos casos fue de 0,67. La eficacia obtenida por los sujetos varía entre un rango de 90 a 100, presentándose para ambos casos una eficacia promedio de 93,33, el promedio de la eficacia de los dos sujetos en la realización de todos los ejercicios es de 93,33 con una desviación estándar de 4,082. Los dos sujetos obtuvieron un promedio de eficacia del 100% para los ejercicios de 2 parpadeos seguidos, sin embargo, no se observa una relación entre el número de parpadeos y la eficacia.

Nº Parpadeos	Sujeto 1			Sujeto 2			Eficacia Promedio de sujetos 1 y 2 (%)
	Nº de Aciertos	Nº de Errores	Eficacia (%)	Nº de Aciertos	Nº de Errores	Eficacia (%)	
2	10	0	100	10	0	100	100
3	9	1	90	9	1	90	90
4	9	1	90	10	0	100	95
5	10	0	100	9	1	90	95
6	9	1	90	9	1	90	90
7	9	1	90	9	1	90	90
Media	9,33	0,67	93,33	9,33	0,67	93,33	93,33
Desviación Estándar	0,516	0,516	5,164	0,516	0,516	5,164	4,082

Tabla 4. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 1 Etapa 1

Fuente: Creación propia.

Fase 1 – Etapa 2. En la tabla 5 se muestra en la primera columna el número determinado de parpadeos seguidos (2, 3, 4, 5, 6 y 7) que puede ser realizado por los sujetos 1 y 2. En la segunda y sexta columna están el número de repeticiones (cada una consta de 10 ejercicios) que tuvo que

realizar cada sujeto respectivamente para garantizar una eficacia mayor a un 80%. En la tercera y séptima columna se presenta el número de aciertos obtenidos por el sujeto 1 y 2 respectivamente. En la cuarta y octava columna se presenta el número de errores obtenidos por el sujeto 1 y 2 respectivamente. En la quinta y novena columna se presenta el valor de la eficacia al realizar la tarea del sujeto 1 y 2 respectivamente. En la última columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2. Los datos que se presentan son los de la última repetición donde se garantiza que el sujeto tenga un 80% de eficacia.

En los datos obtenidos se puede evidenciar que el número de aciertos de los sujetos varía entre 8 y 10 y se observa que el sujeto 1 obtuvo una media de aciertos de 8,83 la cual es mayor a la del sujeto 2 de 8,33. El porcentaje de errores varía entre 0 y 2, el sujeto 1 tuvo una media de errores de 1,17 la cual es menor a la del sujeto 2 de 1,67. La eficacia obtenida por los sujetos varía entre un rango de 80 a 90, en este caso el sujeto 1 con 88,33 y el sujeto 2 con 83,33, el promedio de eficacia de los dos sujetos en la realización de todos los ejercicios es de 85,83 con una desviación estándar de 3,764.

Se puede observar que en el caso del sujeto 1 donde la media de repeticiones fue más alta (2,50), la media de eficacia también fue más alta. El sujeto 1 tuvo más dificultad para realizar la tarea con éxito en los 6 y 7 parpadeos mientras que el sujeto 2 tuvo dificultad con los parpadeos 5 y 6.

Nº Parpadeos	Sujeto 1				Sujeto 2				Eficacia Prom de sujetos 1 y 2 (%)
	Nº de Repeticiones	Nº de Aciertos	Nº de Errores	Eficacia (%)	Nº de Repeticiones	Nº de Aciertos	Nº de Errores	Eficacia (%)	
2	2	8	2	80	1	9	1	90	85
3	2	8	2	80	1	9	1	90	85
4	1	8	2	80	1	8	2	80	80
5	2	10	0	100	3	8	2	80	90
6	4	9	1	90	5	8	2	80	85
7	4	10	0	100	2	8	2	80	90
Media	2,50	8,83	1,17	88,33	2,17	8,33	1,67	83,33	85,83
Desviación	1,225	0,983	0,983	9,832	1,602	0,516	0,516	5,164	3,764

Estándar									
-----------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Tabla 5. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 1 Etapa 2.

Fuente: Creación propia.

Fase 2 – Etapa 2. En la tabla 6 se muestra en la primera columna la tarea asignada. En la segunda y quinta columna están el número de éxitos al realizar cada tarea del sujeto 1 y 2 respectivamente. En la tercera y sexta columna se presenta el número de errores obtenidos por el sujeto 1 y 2 respectivamente. En la cuarta y séptima columna se presenta el valor de la eficacia al realizar la tarea del sujeto 1 y 2 respectivamente. En la última columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2. En los datos obtenidos se puede evidenciar que la media de éxitos para el sujeto 1 fue de 5 y estuvo por encima de la del sujeto 2 que fue de 4,5. El porcentaje de errores varía entre 0 y 1 para el sujeto 2, la eficacia obtenida por los sujetos varía entre un rango de 80 a 100, en este caso el sujeto 1 obtuvo un promedio de eficacia de 100 el cual fue mayor al del sujeto 2 que fue de 90, el promedio de eficacia de los dos sujetos para las dos tareas es de 95,00 con una desviación estándar de 7,071. Los dos sujetos lograron realizar la tarea 2 con éxito.

Tarea	Sujeto 1			Sujeto 2			Eficacia Promedio de sujetos 1 y 2
	Nº de Éxitos	Nº de Errores	Eficacia (%)	Nº de Éxitos	Nº de Errores	Eficacia (%)	
1	5	0	100	4	1	80	90
2	5	0	100	5	0	100	100
Media	5,00	0,00	100,00	4,50	0,50	90,00	95,00
Desviación Estándar	0,000	0,000	0,000	0,707	0,707	14,142	7,071

Tabla 6. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 2 Etapa 2.

Fuente: Creación propia.

Fase 2 – Etapa 3. En la tabla 7 se muestra en la primera columna la tarea asignada. En la segunda y quinta columna están el número de éxitos al realizar cada tarea del sujeto 1 y 2 respectivamente. En la tercera y sexta columna se presenta el número de errores obtenidos por el sujeto 1 y 2 respectivamente. En la cuarta y séptima columna se presenta el valor de la eficacia al realizar la

tarea del sujeto 1 y 2 respectivamente. En la última columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2. En los datos obtenidos se puede evidenciar que la media de éxitos para el sujeto 1 fue de 5 y estuvo por encima de la del sujeto 2 que fue de 4. El porcentaje de errores varía entre 0 y 1 para el sujeto 2, la eficacia obtenida por los sujetos varía entre un rango de 80 a 100, en este caso el sujeto 1 obtuvo un promedio de eficacia de 100 el cual fue mayor al del sujeto 2 que fue de 80, el promedio de eficacia de los dos sujetos para las dos tareas es de 90,00 con una desviación estándar de 0. Los dos sujetos lograron realizar la tarea 2 con éxito.

Tarea	Sujeto 1			Sujeto 2			Eficacia Promedio de sujetos 1 y 2 (%)
	Nº de Éxitos	Nº de Errores	Eficacia (%)	Nº de Éxitos	Nº de Errores	Eficacia (%)	
1	5	0	100	4	1	80	90
2	5	0	100	4	1	80	90
Media	5,00	0,00	100,00	4,00	1,00	80,00	90
Desviación Estándar	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 7. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 2 Etapa 3.

Fuente: Creación propia.

Fase 2 – Etapa 4. En la tabla 8 se muestra en la primera columna la tarea asignada. En la segunda y quinta columna están el número de éxitos al realizar cada tarea del sujeto 1 y 2 respectivamente. En la tercera y sexta columna se presenta el número de errores obtenidos por el sujeto 1 y 2 respectivamente. En la cuarta y séptima columna se presenta el valor de la eficacia al realizar la tarea del sujeto 1 y 2 respectivamente. En la última columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2. En los datos obtenidos se puede evidenciar que la media de éxitos en ambos casos fue de 4. El porcentaje de errores varía entre 0 y 2 para los dos sujetos, la eficacia obtenida por los sujetos varía entre un rango de 60 a 100, en este caso el promedio de eficacia para cada sujeto fue de 80 y el promedio de eficacia de los dos sujetos para las dos tareas es de 80,00 con una desviación estándar de 28,284. Se puede evidenciar que la tarea 2 de la etapa 4 se le dificultó a los dos sujetos obteniendo una eficacia de 60.

Tarea	Sujeto 1			Sujeto 2			Eficacia Promedio de sujetos 1 y 2 (%)
	Nº de Éxitos	Nº de Errores	Eficacia (%)	Nº de Éxitos	Nº de Errores	Eficacia (%)	
1	5	0	100	5	0	100	100
2	3	2	60	3	2	60	60
Media	4,00	1,00	80,00	4,00	1,00	80,00	80,00
Desviación Estándar	1,414	1,414	28,284	1,414	1,414	28,284	28,284

Tabla 8. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 2 Etapa 4.

Fuente: Creación propia.

Fase 2 – Etapa 5. En la tabla 9 se muestra en la primera columna la tarea asignada. En la segunda y quinta columna están el número de éxitos al realizar cada tarea del sujeto 1 y 2 respectivamente. En la tercera y sexta columna se presenta el número de errores obtenidos por el sujeto 1 y 2 respectivamente. En la cuarta y séptima columna se presenta el valor de la eficacia al realizar la tarea del sujeto 1 y 2 respectivamente. En la última columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2. En los datos obtenidos se puede evidenciar que la media de éxitos para el sujeto 1 fue de 5 y estuvo por encima de la del sujeto 2 que fue de 3,5. El porcentaje de errores varía entre 1 y 2 para el sujeto 2, la eficacia obtenida por los sujetos varía entre un rango de 60 a 100, en este caso el sujeto 1 obtuvo un promedio de eficacia de 100 el cual fue mayor al del sujeto 2 que fue de 70, el promedio de eficacia de los dos sujetos para las dos tareas es de 85,00 con una desviación estándar de 7,071. Se puede evidenciar que la tarea 2 de la etapa 5 se le dificultó al sujeto 2 obteniendo una eficacia del 60 para la misma.

Tarea	Sujeto 1			Sujeto 2			Eficacia Promedio de sujetos 1 y 2 (%)
	Nº de Éxitos	Nº de Errores	Eficacia (%)	Nº de Éxitos	Nº de Errores	Eficacia (%)	
1	5	0	100	4	1	80	90
2	5	0	100	3	2	60	80
Media	5,00	0,00	100,00	3,50	1,50	70,00	85,00

Desviación Estándar	0,000	0,000	0,000	0,707	0,707	14,142	7,071
----------------------------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	-------

Tabla 9. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 2 Etapa 5.

Fuente: Creación propia.

Fase 3 – Etapa 1 y 2. En la tabla 10 se muestra en la primera columna la etapa de la fase. En la segunda columna están el intento 1 y 2 ya que cada etapa debía realizarse 2 veces. En la tercera y quinta columna están el número de comandos empleados por cada sujeto para realizar las tareas en cada intento respectivamente. En la cuarta y sexta columna se presenta el tiempo en segundos que se demoró el sujeto 1 y 2 respectivamente cumpliendo cada tarea. En la sexta columna se presenta la media de comandos usados por los 2 sujetos en la resolución de cada tarea. En la última columna se puede encontrar el tiempo promedio empleado para realizar cada tarea entre el sujeto 1 y el sujeto 2. Además se presentan 2 filas que hacen referencia a la media del número de comandos y tiempo para cada sujeto en cada una de las etapas.

En los datos obtenidos se puede evidenciar que para la etapa 1 el sujeto 1 empleo en promedio 37,5 comandos y un tiempo promedio de 292 s para la realización de la tarea, estos fueron más altos que los empleados por el sujeto 2, donde su promedio de comandos es de 19 y el tiempo promedio de 208,5 s. Se evidencia que para esta etapa en el segundo intento los dos sujetos redujeron el número de comandos y el tiempo empleado para la realización de la tarea, ya que el promedio de comandos de los dos sujetos paso de 36 a 20,5 en el segundo intento, así mismo el tiempo promedio de los dos sujetos se redujo de 288 s en el primer intento a 212,5 s en el segundo intento. Para esta primera etapa la media de comandos usados por los dos sujetos fue de 28,25 con una desviación estándar de 10,96 y el tiempo medio de los dos sujetos fue de 250,25s con una desviación estándar de 53,39. En la etapa 2 el sujeto 1 empleo en promedio 32,5 comandos y un tiempo promedio de 265 s para la realización de la tarea, estos fueron más altos que los empleados por el sujeto 2, donde su promedio de comandos es de 13,5 y el tiempo promedio de 156 s. Se evidencia que para esta etapa el promedio de comandos de los dos sujetos paso de 24 a 22 en el segundo intento, así mismo el tiempo promedio de los dos sujetos se redujo de 224 s en el primer intento a 197 s en el segundo intento. Se puede evidenciar que la tarea de la etapa 2 requirió menos tiempo para ser realizada. Para esta segunda etapa la media de comandos usados por los dos sujetos fue de 23,00 con una

desviación estándar de 1,41 y el tiempo medio de los dos sujetos fue de 210,50s con una desviación estándar de 19,09.

Tarea	Intento	Sujeto 1		Sujeto 2		Nº promedio de comandos de sujetos 1 y 2	Tiempo promedio de sujetos 1 y 2 (s)
		Nº de comandos	Tiempo (s)	Nº de comandos	Tiempo (s)		
Etapa 1	1	49	366	23	210	36	288
	2	26	218	15	207	20,5	212,5
Media		37,50	292,00	19,00	208,50	28,25	250,25
Desviación Estándar		16,26	104,65	5,66	2,12	10,96	53,39
Etapa 2	1	37	316	11	132	24	224
	2	28	214	16	180	22	197
Media		32,50	265,00	13,50	156,00	23,00	210,50
Desviación Estándar		6,36	72,12	3,54	33,94	1,41	19,09

Tabla 10. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 3 Etapa 1 y Etapa 2.

Fuente: Creación propia

Fase 4. En la tabla 11 se muestra en la primera columna el número de la tarea a realizar. En la segunda columna se encuentra el intento en el cual el sujeto logro realizar la tarea, ya que cada tarea debía realizarse máximo 2 veces. En la tercera columna se presenta el número de errores. En la cuarta columna se presenta el número de comandos empleados para la realización de cada tarea. En la quinta columna se presenta el tiempo empleado en realizar la tarea. En la sexta columna se encuentra la eficacia para cada una de las tareas. En la última columna se puede encontrar la eficiencia en cada una de las tareas. Los datos que se presentan son los de la última repetición, además se identifican las filas donde los datos pertenecen al sujeto 1 y los del sujeto 2. En los datos obtenidos se puede evidenciar que para el sujeto 1 en la realización de todas las tareas el promedio del número de intentos es de 1,33, el promedio de errores es 0,50 y el promedio de comandos es 6, estos promedios fueron mayores a los obtenidos para el sujeto 2, donde el promedio del número de intentos es de 1,17, el promedio de errores es 0,33 y el promedio de comandos es 4,83. El promedio del tiempo para el sujeto 1 fue de 53,33 s y para el sujeto 2 fue de 57,33 s. El sujeto 1 obtuvo una eficacia de 75 con una desviación estándar de 41,83, y su eficiencia fue de 2,23 con una desviación

estándar de 1,77. El sujeto 2 obtuvo una eficacia de 83,33 con una desviación estándar de 40,82, y su eficiencia fue de 2,64 con una desviación estándar de 1,48.

Se evidencia que las tareas que más causaron dificultad a los sujetos fueron la número 3 y la número 4, ya que en estas se encuentran los errores o los tiempos más altos, así mismo las tareas que menos les causaron dificultad fueron la número 2 y la número 5 ya que es allí donde se registraron los tiempos más bajos y el menor número de comandos empleados.

	Tarea	Nº de Intentos	Nº de Errores	Nº de Comandos	Tiempo (s)	Eficacia	Eficiencia
Sujeto 1	1	1	0	6	55	100	1,818
	2	1	0	2	26	100	3,846
	3	2	2	10	70	0	0,000
	4	2	1	10	95	50	1,053
	5	1	0	2	21	100	4,762
	6	1	0	6	53	100	1,887
	Media	1,33	0,50	6,00	53,33	75,00	2,23
	Desviación Estándar	0,52	0,84	3,58	27,60	41,83	1,77
Sujeto 2	1	1	0	3	47	100	2,128
	2	1	0	2	22	100	4,545
	3	2	2	14	157	0	0,637
	4	1	0	5	55	100	1,818
	5	1	0	2	24	100	4,167
	6	1	0	3	39	100	2,564
	Media	1,17	0,33	4,83	57,33	83,33	2,64
	Desviación Estándar	0,41	0,82	4,62	50,48	40,82	1,48

Tabla 11. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 4

Fuente: Creación propia.

En la tabla 12 se muestra en la primera columna el número de la tarea a realizar. En la segunda columna se encuentra el promedio de comandos usados por los dos sujetos para realizar la tarea. En la tercera columna se presenta el tiempo promedio de los dos sujetos para la realización de cada tarea. En la cuarta columna se presenta la eficacia promedio de los dos sujetos. En la última columna se puede encontrar el promedio de la eficiencia de los dos sujetos para cada una de las tareas. En los datos obtenidos se puede evidenciar que las dos tareas que tuvieron una eficacia menor a 80 fueron la número 3 con eficacia de 0 y la número 4 con eficacia de 75, además las dos

tareas en las cuales los sujetos tuvieron la mejor eficiencia fueron la número 2 con 4,196 y la número 5 con 4,464. La tarea que menos tardaron en completar fue la número 5 con un tiempo de 22,5 s y la que más tiempo les llevo fue la número 3 con un tiempo de 113,5 s. Las tareas en las que tuvieron que realizar menos comandos fueron la 2 y la 5 con un promedio de 2 comandos cada una, las que más comandos les exigieron fueron la número 3 con un promedio de 12 comandos y la número 4 con un promedio de 7,5 comandos.

Tarea	Promedio N° de Comandos	Tiempo Promedio (s)	Eficacia Promedio	Eficiencia Promedio
1	4,5	51	100	1,973
2	2	24	100	4,196
3	12	113,5	0	0,318
4	7,5	75	75	1,435
5	2	22,5	100	4,464
6	4,5	46	100	2,225
Media	5,417	55,333	79,167	2,435
Desviación Estándar	3,81	34,46	40,05	1,61

Tabla 12. Promedios obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 4.

Fuente: Creación propia.

7.1.1 Análisis de protocolos verbales para la fase 3 de la experimentación con el ambiente de aprendizaje de señales electroencefalográficas del parpadeo con bio-retroalimentación visual

En el desarrollo de la fase 3 se identificaron las estrategias empleadas por cada sujeto durante la resolución de las dos tareas propuestas, aplicando el análisis de protocolos verbales (Sanabria, 2008). A continuación se presenta la transcripción de la verbalización de cada sujeto, las proposiciones, inferencias, codificación y la caracterización de comandos y estrategias empleadas durante el desarrollo de tareas de posicionamiento y orientación de un exoesqueleto virtual.

Sujeto 1

Fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde

E: Listo para este ejercicio vamos a señalar el cubo verde me vas a comentar todo lo que vayas pensando, ehh si quieres expresar que piensas hacer antes de empezar la tarea y yo te activo la simulación cuando tú lo consideres necesario, entonces la idea es, que partes desde esta posición inicial (se señala en la pantalla de la simulación) y debes alcanzar o llegar acá (se señala el cubo verde en la pantalla) a señalar el cubo verde, ¿listo?.

S: listo, eentonces, lo primero como que haría sería como tratar de alcanzar la altura, ehh entonces pues voy mirando entre las vistas, cual me puede indicar mejor la altura que voy alcanzando y lo ideal después de alcanzar la altura, ehhh tratar de girar el hombro para poder apuntar el objeto, Ya iniciar la, la simulación, espera voy a repasar los movimientos y listo.

S: Chequeo el sentido del giro... a bueno se me movió el hombro, lo detuve pero no lo devuelvo porque ese movimiento me sirve, y voy otra vez entonces a intentar mover para lograr la altura, ehh hombro 1 son 4, ehh detengo el hombro 1 yyyyy voy a intentar seguir entonces alcanzando la altura, pero ya moviendo a partir del... codo.

Ya detengo para girar yirme acercando hacia el cubo, antes de subir más, giro con hombro 1 , 2!! El rojo es hacia adentro entonces esta correcto el sentido de giro, no me sale, ashhh se me cambio de giro, quieto quieto, ehh cambio el sentido de giro por que se me giro y sigo llevando el hombro hacia adentro, estoy chequeando donde se encuentra, lo veo que todavía no alcanza altura, entonces voy a intentar subir nuevamente el codo, ehmm me toca cambiar el sentido de giro que esta hacia afuera, y ahii subo el codo, ahiii, ahí ahí quieto, lo había logrado pero se bajó, voy a volver a subirlo un poquito. Mmm no se bajó todo, ya está subiendo otra vez, lo detuve voy a girarlo un poquito hacia adentro que es con el rojo voy a girar el hombro 2 chequeo que este bien el sentido de giro, momento, ehhh listo.

E: listo.

Episodio	No	Transcripción de la proposición
	P1	Chequeo el sentido de giro
	P2	Se me movió el hombro, lo detuve pero no lo devuelvo
	P3	Hombro 1 son 4
	P4	Detengo el hombro 1

Fase 3 Etapa 1a	P5	Voy a intentar seguir entonces alcanzando la altura, pero ya moviendo a partir del codo
	P6	Detengo para girar
	P7	Giro con hombro 2
	P8	Rojo es hacia adentro entonces esta correcto el sentido de giro
	P9	Se me cambio de giro
	P10	Cambio el sentido de giro
	P11	Sigo llevando el hombro hacia adentro
	P12	Voy a intentar subir nuevamente el codo
	P13	Me toca cambiar el sentido de giro que esta hacia afuera
	P14	Y ahí subo el codo
	P15	Lo había logrado pero se bajó, voy a volver a subirlo un poquito
	P16	Lo detuve
	P17	Voy a girarlo un poquito hacia adentro que es con el rojo

Tabla 13. Proposiciones del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Episodio	No	Transcripción de la inferencia
Fase 3 Etapa 1a	I1	Verifica la dirección de giro
	I2	Mueve el hombro, no es lo que quería hacer pero confirma que le sirve.
	I3	Confirma que mueve el hombro 1 con 4 parpadeos
	I4	Detiene el hombro 1
	I5	Sube el codo
	I6	Se detiene
	I7	Gira con hombro 2 hacia adentro
	I8	Verifica el color de la dirección, sí está bien
	I9	Cambia la dirección de giro por error
	I10	Cambia nuevamente la dirección de giro
	I11	Gira el hombro 2 hacia adentro
	I12	Sugiere que debe subir pero con el codo
	I13	Cambia la dirección de giro después de evaluar el color
	I14	Sube el codo
	I15	Verifica la posición, sube el codo
	I16	Detiene el movimiento
	I17	Verifica dirección de giro, mueve hombro 2

Tabla 14. Inferencias del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Para la codificación del protocolo se utilizaron las siguientes convenciones:

Símbolo	Significado
---------	-------------

H1	Hombro 1
H2	Hombro 2
Co	Codo
Ma	Mano
S	Subir
B	Bajar
A	Abrir
Ce	Cerrar
D	Detener
In	Invertir
Ve	Verificar
DiG	Dirección de Giro
M	Mover
P	Parpadeo
Ad	Adentro
Af	Afuera
Al	Altura
Vi	Vistas

Tabla 15. Convenciones de la codificación del protocolo

Fuente: Creación propia

Episodio	Transcripción de la codificación
Fase 3 Etapa 1a	Ve (DiG) M (H1) => Ve (4P) D(H1) S(Co) D(Co) M(H2,Ad) Ve (DiG) In(DiG) In(DiG) M(H2,Ad) In(DiG) S(Co) Ve (Co), S(Co) D(Co) Ve (DiG), M(H2)

Tabla 16. Codificación del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde

E: en esta etapa vamos a volver a repetir el ejercicio de apuntar al cubo verde.

S: aja

E: Te voy a reiniciar la simulación y recuerda comentarme todo lo que hagas, lo que pienses.

S: listo entonces inicialmente voy a tratar de ganar altura, eh y lo voy a iniciar primero desde el hombro ya como esta hacia arriba la idea es moverlo, ahí como que espero que llegue a cierta altura y luego voy a intentar pues alcanzar más altura desde el codo, ehh ahí voy a intentar con el codo ehhh ahí como que estoy mirando mucho entre la esta lateral y la cuarta. Ehh voy a parar ahí ya casi llego pero voy a intentar primero entonces acercarme ehh lateralmente acercarme con la rotación del codo, chequeo dirección ehh voy a cambiar la dirección para poderme acercar, ahh voy a pararlo primero, ehh listo ahora si como la tengo hacia adentro intento girar el hombro, ehh un momento, chequeo pues como que haya hecho correctamente los los parpadeos para ahí si dejarlo girar.

E: ¿con que chequeas que hayas hecho los parpadeos?

S: Estoy chequeando el número, para que vea lo haya leído bien espero que se acerque más, creo que ahí ya me estoy acercando, ehh lo detengo creo que ehh veo como en la está que ya me acerque lateralmente pero había como subido mucho entonces ahora voy a bajar desde el hombro 1 y creo que puede ayudarme a bajar más rápido y voy a cambiar la dirección , listo , chequeo el cambio de dirección y luego si intento bajar desde el hombro y ahí como lo tengo bajando utilizo como la vista lateral y la de la proyección para ir viendo ahii detengo y creo que ahí quedo señalando voy a acercarla un poquito más del lado del hombro ehh chequeo dirección primero para ver que voy en el sentido que es, y ya ahí quedo más cerca del cubo verde.

Episodio	No	Transcripción de la proposición
	P1	Lo voy a iniciar primero desde el hombro ya como esta hacia arriba la idea es moverlo
	P2	Ahí como que espero que llegue a cierta altura y luego voy a intentar pues alcanzar más altura desde el codo
	P3	Como que estoy mirando mucho entre la esta lateral y la cuarta
	P4	Voy a parar ahí ya casi llego pero voy a intentar primero entonces acercarme, lateralmente acercarme con la rotación del codo
	P5	Chequeo dirección, voy a cambiar la dirección para poderme acercar, voy a pararlo primero

Fase 3 Etapa 1b	P6	Intento girar el hombro, chequeo pues como que haya hecho correctamente los parpadeos para ahí si dejarlo girar
	P7	Lo detengo creo que, veo como en la está que ya me acerque lateralmente pero había como subido mucho entonces ahora voy a bajar desde el hombro 1
	P8	Voy a cambiar la dirección , listo , chequeo el cambio de dirección
	P9	Luego si intento bajar desde el hombro
	P10	Utilizo como la vista lateral y la de la proyección para ir viendo ahí detengo
	P11	Voy a acercarla un poquito más del lado del hombro, chequeo dirección primero para ver que voy en el sentido que es
	P12	Ya ahí quedo más cerca del cubo verde.

Tabla 17. *Proposiciones del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde*

Fuente: Creación propia

Episodio	No	Transcripción de la inferencia
Fase 3 Etapa 1b	I1	Verifica la dirección y sube el hombro 1
	I2	Verifica la altura y sube el codo
	I3	Mira la vista lateral y la de proyección
	I4	Detiene el movimiento del codo
	I5	Verifica la dirección de giro, Detiene el movimiento
	I6	Mueve el hombro 2 y verifica el número de parpadeos
	I7	Detiene el movimiento del hombro2
	I8	Cambia dirección y verifica el cambio.
	I9	Baja el hombro 1
	I10	Mira la vista lateral y la de proyección y detiene el hombro 1
	I11	Verifica la posición y mueve el hombro 1
	I12	Detiene el hombro 1

Tabla 18.

Tabla 18. *Inferencias del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.*

Fuente: Creación propia

Episodio	Transcripción de la codificación
Fase 3 Etapa 1b	Ve (DiG), S(H1) Ve (Al), S(Co) Ve (Vi) D(Co) Ve (DiG), D M(H2), Ve (P) D(H2) In(DiG), Ve (DiG) B(H1) Ve (Vi), D(H1) Ve (H1), M(H1) D(H1)

Tabla 19.

Tabla 19. Codificación del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo

E: Para esta tarea te voy a pedir que por favor captures el cubo rojo listo, la mano debe quedar como si tuviera el cubo rojo dentro de ella agarrándolo, listo, y ahí termina la tarea, entonces lo mismo te voy a pedir que por favor me digas ehh como las estrategias que quieres o que vas a usar para poder llegar a capturar el cubo rojo.

S: ehh listo, no pues seguiría en tratar de lograr primero la altura, de pronto de no subirlo tanto, chequear primero horizontalmente, o sea subirlo un poco girar el hombro hacia afuera para tratar de ubicarme más cerca del cubo y luego si como ajustar la altura y finalmente pues tratar, pues cuando este ahí sobre cerca del cubo rojo trataría de abrir la mano de forma que que se pueda agarrar.

E: ok

S: Listo, entonces voy a iniciar con altura desde el hombro, chequeo la dirección que este girando hacia arriba, voy a dejar ahí y intento desde el codo. Listo voy a intentar entonces subir desde el codo, eh detengo para tratar entonces de alcanzarlo hacia afuera, primero cambiaria de sentido para moverlo hacia afuera ya chequeo que haya cambio de sentido y empiezo a rotar el codo.... El hombro, eh hh ahí trato pues como de chequear en las vistas, en la superior parece que hubiera alcanzado lateralmente pero hay que ajustar la altura, subir un poco, entonces voy a chequeo que

la dirección está ya hacia arriba y voy a subir un poco desde el codo, ehhh me detengo se subió un poquito entonces voy a intentar bajar, chequeo primero el cambio de dirección bajo el codo, ok ya creo que toca con la mano ash se bajó muy rápido voy a ver si está listo voy a intentar ajustar un poco la mano para abrirla y no recuerdo bien el el para abrir la mano si es este sentido voy a mirar efectivamente como se está abriendo voy a estar un poco más a la altura del bloque. Voy a corregir altura, voy a bajarlo ahora corregir el sentido y voy a bajar desde el codo voy a intentar cerrar un poquito más el hombro, chequeo el sentido esta hacia afuera voy a corregir el sentido y lo voy a mover otro poquito hacia adentro, listo.

Episodio	No	Transcripción de la proposición
Fase 3 Etapa 2a	P1	Entonces voy a iniciar con altura desde el hombro chequeo la dirección que este girando hacia arriba, voy a dejar ahí
	P2	Listo voy a intentar entonces subir desde el codo, detengo
	P3	Primero cambiaria de sentido para moverlo hacia afuera ya chequeo que haya cambio de sentido y empiezo a rotar el codo.... El hombro
	P4	Ahí trato pues como de chequear en las vistas
	P5	Entonces voy y chequeo que la dirección está ya hacia arriba y voy a subir un poco desde el codo
	P6	Me detengo se subió un poquito entonces voy a intentar bajar
	P7	chequeo primero el cambio de dirección bajo el codo
	P8	Voy a intentar ajustar un poco la mano para abrirla
	P9	Voy a corregir altura, voy a bajarlo ahora corregir el sentido y voy a bajar desde el codo
	P10	Voy a intentar cerrar un poquito más el hombro, chequeo el sentido esta hacia afuera voy a corregir el sentido y lo voy a mover otro poquito hacia adentro

Tabla 20. Proposiciones del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.

Fuente: Creación propia

Episodio	No	Transcripción de la inferencia
Fase 3 Etapa 2a	I1	Verifica la dirección y sube el hombro 1, detiene
	I2	Sube el codo, detiene el movimiento del codo
	I3	Verifica la dirección, la cambia, verifica nuevamente y mueve el hombro 2
	I4	Mira las vistas
	I5	Verifica la dirección y sube el codo
	I6	Detiene el codo, para intentar bajarlo un poco cambia la dirección

	I7	Verifica el cambio de dirección y baja el codo
	I8	Abre la mano y detiene
	I9	Cambia el sentido y baja el codo
	I10	Verifica la dirección, la cambia y mueve el hombro 2 hacia adentro y detiene

Tabla 21. Inferencias del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.

Fuente: Creación propia

Episodio	Transcripción de la codificación
Fase 3 Etapa 2a	Ve (DiG), S(H1), D(H1) S(Co), D(Co) Ve(DiG), In(DiG), Ve (DiG), M(H2) Ve(Vi) Ve (DiG), S(Co) D(Co), In(DiG) Ve (DiG), B(Co) A(Ma), D(Ma) In(DiG), B(Co) Ve (DiG), In(DiG), M(H2,Ad), D(H2)

Tabla 22. Codificación del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.

Fuente: Creación propia

Fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo

E: listo nuevamente entonces te voy a pedir que por favor repitas la tarea de capturar el cubo rojo, bien y que me cuentes todo lo que piénsese hacer.

S: ehh pienso alcanzar altura a partir del hombro y el codo ehh chequear tratar de buscar la ubicación lateral girando el hombro y si es necesario pues corregir la altura y finalmente abrir la mano para para agarrar la ficha roja, listo.

Chequeo dirección primero y voy a subir el hombro , voy a subir hasta ahí y ya intento con el codo ehhe como se le cambio la dirección voy a corregir, paro los motores, cambio la dirección a lo que veo que ha corregido voy a subir el codo ehh voy a mirar ahí y voy a tratar de alcanzar lateralmente ehhe chequeo la dirección y es la que me sirve que es la de mover hacia afuera el hombro entonces ahí estoy como viendo la cantidad de parpadeos para ver si es el indicado para el movimiento que quiero, me voy a detener y le voy a tratar de alcanzar otra vez la altura debido a que no es la altura

que quería ehhh como es para arriba voy a cambiar la dirección chequeo que ya ha cambiado y voy a intentar subir desde el hombro un poco, ahí voy a intentar subir desde el codo como para ser un poco más preciso ehhh voy a abrir la mano para agarrar ehhh esta es la dirección de apertura de la mano y voy a intentar mmm ya.

Episodio	No	Transcripción de la proposición
Fase 3 Etapa 2b	P1	Chequeo dirección primero y voy a subir el hombro, voy a subir hasta ahí
	P2	Como se le cambio la dirección voy a corregir, paro los motores, cambio la dirección
	P3	A lo que veo que ha corregido voy a subir el codo
	P4	Chequeo la dirección y es la que me sirve que es la de mover hacia afuera el hombro
	P5	Entonces ahí estoy como viendo la cantidad de parpadeos para ver si es el indicado para el movimiento que quiero,
	P6	Me voy a detener
	P7	Le voy a tratar de alcanzar otra vez la altura debido a que no es la altura que quería, como es para arriba voy a cambiar la dirección
	P8	Chequeo que ya ha cambiado y voy a intentar subir desde el hombro un poco
	P9	Ahí voy a intentar subir desde el codo como para ser un poco más preciso
	P10	Voy a abrir la mano para agarrar, esta es la dirección de apertura de la mano... ya

Tabla 23. Proposiciones del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo

Fuente: Creación propia

Episodio	No	Transcripción de la inferencia
Fase 3 Etapa 2b	I1	Verifica la dirección y sube el hombro 1, detiene
	I2	Verifica la dirección, detiene, la cambia
	I3	Verifica la dirección y mueve el codo
	I4	Detiene el codo, verifica la dirección y mueve el hombro 2 hacia afuera
	I5	Verifica los parpadeos
	I6	Detiene el hombro 2
	I7	Verifica la dirección y la cambia
	I8	Verifica la dirección nuevamente y sube el hombro 1
	I9	Detiene el hombro y sube el codo
	I10	Verifica la dirección, abre la mano y la cierra.

Tabla 24. Inferencias del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.

Fuente: Creación propia

Episodio	Transcripción de la codificación
Fase 3 Etapa 2b	Ve (DiG), S(H1), D(H1) Ve (DiG), D, In (DiG) Ve (DiG), M(Co) D(Co), Ve (DiG), M(H2,Af) Ve(P) D(H2) Ve (DiG), In (DiG) Ve (DiG), S(H1) D(H1), S(Co) Ve(DiG), A(Ma), Ce(Ma)

Tabla 25. Codificación del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.

Fuente: Creación propia

Fase 3 Sujeto 1				
Tarea	Comandos	Dirección	Distancia al objeto	Estrategia Inferida
			(L – Mc – C-Meta)	
Fase 3 Etapa 1ª: 1 intento de apuntar hacia el cubo verde	0	→	L	El sujeto inicialmente observa las vistas para definir el orden y la dirección de activación de cada articulación que lo llevará a ubicar el exoesqueleto en una posición donde apunte al cubo. Este orden lo define antes de iniciar los movimientos de cada articulación.
	5	→	L	
	2	--	L	
	4	→	MC	
	2	--	MC	
	6	→	MC	
	2	--	MC	
	7	→	MC	
	2	--	MC	
	6	→	MC	
	2	--	MC	El sujeto tiende a corregir inmediatamente los errores de activación de las articulaciones. Para corregir estos errores el sujeto cambia la dirección de movimiento y activa la articulación que le permita posicionarse en la ubicación inmediatamente anterior a la ejecución del error.
	6	→	MC	
	2	--	MC	
	6	→	MC	
	2	--	MC	
	6	→	MC	
	2	--	MC	
	5	→	MC	
	3	-- ←	MC	
	2	--	MC	
6	←	MC		
2	--	MC		
3	-- →	MC		

	6	→	MC	más pasos y posiblemente cometer algunos errores de activación.
	2	--	MC	
	5	→	MC	
	3	-- ←	MC	
	2	--	MC	
	3	-- →	MC	
	7	→	C	
	3	-- ←	C	
	2	--	C	
	4	←	C	
	2	--	C	
	6	←	MC	
	7	←	MC	
	3	-- →	MC	
	6	→	MC	
	3	-- ←	MC	
	7	←	L	
	3	-- →	L	
	7	→	C	
	2	--	C	
	3	-- ←	C	
	2	--	C	
	3	-- →	C	
	2	--	C	
	5	→	C	
	4	→	Me	
	3	-- ←	Me	
Fase 3	0	→	L	
Etapa 1b:	4	→	L	
2 intento de apuntar hacia el cubo verde	2	--	L	
	5	→	L	
	2	--	L	
	7	→	MC	
	3	-- ←	MC	
	2	--	MC	
	3	-- →	MC	
	4	→	C	
	2	--	C	
	5	→	L	
	4	→	L	
	2	--	L	
	4	→	L	

	2	--	L	
	4	→	L	
	2	--	L	
	3	-- ←	L	
	5	←	L	
	2	--	L	
	4	←	C	
	3	-- →	C	
	6	→	C	
	2	--	C	
	5	→	C	
	2	--	Me	
Fase 3	0	→	L	
Etapa 2ª:	4	→	L	
1 intento de capturar el cubo rojo	2	--	L	El sujeto inicialmente observa las vistas para definir el orden y la dirección de activación de cada articulación que lo llevará a ubicar el exoesqueleto en una posición donde apunte al cubo. Este orden lo define antes de iniciar los movimientos de cada articulación.
	5	→	L	
	2	--	L	
	6	→	L	
	2	--	L	
	4	→	L	
	2	--	L	
	7	→	L	
	2	--	MC	
	3	-- ←	MC	
	5	←	C	El sujeto tiende a corregir inmediatamente los errores de activación de las articulaciones. Para corregir estos errores el sujeto cambia la dirección de movimiento y activa la articulación que le permita posicionarse en la ubicación inmediatamente anterior a la ejecución del error.
	3	-- →	C	
	2	--	C	
	7	→	C	
	2	--	C	
	3	-- ←	C	
	6	←	C	
	2	--	C	
	6	←	C	
	2	--	C	
	5	←	C	El sujeto tiende a buscar la exactitud en la posición del exoesqueleto virtual, aun cuando esto le implique realizar más pasos y posiblemente cometer algunos errores de activación.
	2	--	C	
	7	←	C	
	2	--	C	
	3	-- →	C	
	2	--	C	
6	→	C		
	2	--	C	

	7	→	C	
	2	--	C	
	3	-- ←	C	
	7	←	C	
	2	--	C	
	3	-- →	C	
	5	→	Me	
	2	--	Me	
Fase 3	0	→	L	El sujeto inicialmente observa las vistas para definir el orden y la dirección de activación de cada articulación que lo llevará a ubicar el exoesqueleto en una posición donde apunte al cubo. Este orden lo define antes de iniciar los movimientos de cada articulación.
Etapa 2b:	4	→	L	
1 intento de capturar el cubo rojo	3	-- ←	L	
	2	--	L	
	3	-- →	L	
	2	--	L	
	5	→	L	
	3	-- ←	L	
	2	--	L	
	3	-- →	L	
	7	→	MC	
	3	-- ←	MC	
	6	←	MC	
	2	--	MC	
	4	←	MC	
	2	--	MC	
	5	←	MC	
	2	--	MC	
	3	-- →	MC	
	4	→	C	
	3	-- ←	C	
	2	--	C	
	3	-- →	C	
	6	→	C	
	2	--	C	
	7	→	C	
	2	--	C	
	6	→	Me	
	2	--	Me	

Tabla 26. Caracterización de comandos y estrategias empleadas durante el desarrollo de tareas de posicionamiento y orientación de un exoesqueleto virtual del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual.

Fuente: Creación propia

Sujeto 2:

Fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde

S: para eso vamos a subir el hombro 1 a la altura del cubo verde vista lateral, lo detenemos, vamos a ehhh flexionar un poco, vamos a rotar hacia adentro, lo detenemos, rotamos hacia adentro, desde la vista de atrás nos orientamos, nos detenemos y vamos a subirlo un poco, listo, desde la vista de arriba vamos a irnos un poco más hacia adentro, corregimos, lo detenemos y ahora lo vamos a bajar un poco, cambiamos de dirección y bajamos, la detenemos y listo.

Episodio	No	Transcripción de la proposición
Fase 3 Etapa 1a	P1	Vamos a subir el hombro 1 a la altura del cubo verde
	P2	Lo detenemos
	P3	Vamos a rotar hacia adentro
	P4	Lo detenemos
	P5	Rotamos hacia adentro desde la vista de atrás nos orientamos
	P6	Nos detenemos y vamos a subirlo un poco
	P7	Vamos a irnos un poco más hacia adentro
	P8	Corregimos
	P9	Lo detenemos y ahora lo vamos a bajar un poco
	P10	Cambiamos de dirección y bajamos
	P11	La detenemos.

Tabla 27. Proposiciones del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Episodio	No	Transcripción de la inferencia
Fase 3 Etapa 1a	I1	Sube el hombro 1
	I2	Lo detiene
	I3	Rota hombro 2 hacia adentro
	I4	Lo detiene
	I5	Rota hombro 2 hacia adentro, orientándose con la vista de atrás
	I6	Lo detiene y lo sube
	I7	Rota hombro 2
	I8	Corrige
	I9	Lo detiene y lo baja
	I10	Cambia de dirección y baja
	I11	Lo detiene

Tabla 28. Inferencias del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Episodio	Transcripción de la codificación
Fase 3 Etapa 1a	S (H1) D (H1) M(H2,Ad) D(H2) M(H2,Ad), Ve(Vi) D(H2), S(H1) M(H2) Ve D, B In (DiG), B D

Tabla 29. Codificación del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde

S: para señalar el cubo de color verde me voy a basar en la vista de atrás voy a levantar el brazo, el hombro 1, no me salió el hombro 1 entonces, pero la rotación me sirve, entonces con esa orientación ehh voy aaa ehh a aprovecharla, voy a levantarla ahora si el hombro 1, pero antes voy a cambiar de dirección, no cambie de dirección lo mande hacia atrás entonces lo detengo, ahora si lo voy a hacer, entonces cambie de dirección ahora lo mando hacia arriba hasta tratar de alcanzar la altura de, el cubo verde visto desde la vista lateral entonces esperamos hasta que alcance la altura indicada y ya en breve le daré comando para que se detenga, entonces lo detengo, y ahora lo voy a hacer girar hacia la izquierda, quiere decir que habilitare el número 5, lo detengo , me pase un poco entonces me voy a devolver entonces baje el hombro ahora voy a subirlo de nuevo lo detengo, cambio de dirección y roto hacia afuera con el hombro 2 lo detengo.

Episodio	No	Transcripción de la proposición
	P1	Me voy a basar en la vista de atrás voy a levantar el brazo, el hombro 1
	P2	Voy a levantarla ahora si el hombro 1, pero antes voy a cambiar de dirección

Fase 3 Etapa 1b	P3	No cambie de dirección lo mande hacia atrás entonces lo detengo
	P4	Entonces cambie de dirección ahora lo mando hacia arriba hasta tratar de alcanzar la altura de, el cubo verde visto desde la vista lateral
	P5	Entonces lo detengo
	P6	Ahora lo voy a hacer girar hacia la izquierda, quiere decir que habilitare el número 5
	P7	Lo detengo
	P8	Me pase un poco entonces me voy a devolver entonces baje el hombro ahora voy a subirlo de nuevo, lo detengo
	P9	Cambio de dirección y roto hacia afuera con el hombro 2 lo detengo

Tabla 30. Propositiones del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Episodio	No	Transcripción de la inferencia
Fase 3 Etapa 1b	I1	Se basa en la vista de atrás, levanta el hombro 1
	I2	Cambia de dirección y levanta el hombro 1
	I3	Detiene el hombro 1
	I4	Cambia de dirección, sube el hombro 1
	I5	Detiene el hombro 1
	I6	Gira a la izquierda, con el número 5
	I7	Detiene el hombro 2
	I8	Baja el hombro 1, cambia de giro y sube el hombro 1, lo detiene
	I9	Cambia de dirección y rota hacia afuera con el hombro 2, lo detiene

Tabla 31. Inferencias del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Episodio	Transcripción de la codificación
Fase 3 Etapa 1b	Ve(Vi), S(H1) In(DiG), S(H1) D(H1) In(DiG), S(H1) D(H1) M(H2,Ad) D(H2) B(H1), In(DiG), S (H1), D(H1) In(DiG), M(H2,Af), D(H2)

Tabla 32. Codificación del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo

S: para eso voy a subir el brazo hasta la altura del color rojo, me oriento en la vista de atrás para identificar la altura, o inclusive la vista lateral, espero que alcance rápidamente la altura, lo detengo y ahora vamos a rotar hacia afuera entonces ahora cambio de dirección y vamos a rotar hacia afuera, ahí me voy a orientar en la vista de techo para saber en qué momento debo detenerme, entonces esperamos un poco y mientras nos vamos acercando vamos determinando el momento en que debemos detenernos, entonces en este momento lo detengo, ahora vamos a abrir la mano, lo detenemos no había notado un cambio de dirección entonces cambiamos la dirección y ahora si abrimos la mano esperamos a que realice la rotación de manera que cubra el cubo y lo detenemos.

Episodio	No	Transcripción de la proposición
Fase 3 Etapa 2a	P1	Voy a subir el brazo hasta la altura del color rojo
	P2	Me oriento en la vista de atrás para identificar la altura, o inclusive la vista lateral
	P3	Lo detengo y ahora vamos a rotar hacia afuera entonces ahora cambio de dirección y vamos a rotar hacia afuera
	P4	Ahí me voy a orientar en la vista de techo para saber en qué momento debo detenerme
	P5	Entonces en este momento lo detengo
	P6	ahora vamos a abrir la mano
	P7	Lo detenemos no había notado un cambio de dirección entonces cambiamos la dirección
	P8	Y ahora si abrimos la mano esperamos a que realice la rotación de manera que cubra el cubo y lo detenemos

Tabla 33. Proposiciones del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.

Fuente: Creación propia

Episodio	No	Transcripción de la inferencia
Fase 3	I1	Sube el hombro 1
	I2	Verifica la vista de atrás o la lateral
	I3	Detiene el hombro 1, cambia de dirección y rota hacia afuera el hombro 2
	I4	Verifica la vista de techo

Etapa 2a	I5	Detiene el hombro 2
	I6	Abre la mano
	I7	Detiene la mano y cambia de dirección
	I8	Abre la mano y la detiene al cubrir el cubo

Tabla 34. Inferencias del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.

Fuente: Creación propia

Episodio	Transcripción de la codificación
Fase 3 Etapa 2a	S(H1) Ve (Vi) D(H1), In (DiG), M(H2,Af) Ve (Vi) D(H2) A(Ma) D(Ma), In(DiG) A(Ma), D(Ma)

Tabla 35. Codificación del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.

Fuente: Creación propia

Fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo

S: capturar el cubo de color rojo, para eso entonces voy a levantar el brazo el hombro 1 a la altura del cubo dos desde la vista lateral, bien me salió un 5 lo voy a detener, listo le voy a cambiar de dirección, de acuerdo, ahora si voy a hacer subir el hombro 1, entonces esperamos un poco estoy mirando el punto en el que alcancemos la altura del cubo rojo, lo detengo, y ahora me voy a desplazar hacia la derecha o sea voy a mover hombro 2, primero voy a cambiar de dirección, ahora voy a mover hombro dos, hacia la derecha hasta alcanzar desde la vista de techo al al cubo rojo, me detengo, lo detengo vuelvo a activarlo, activo mano, la dejo abrir lo suficiente y la detengo, listo.

Episodio	No	Transcripción de la proposición
	P1	Para eso entonces voy a levantar el brazo el hombro 1 a la altura del cubo dos desde la visa lateral
	P2	Bien me salió un 5 lo voy a detener
	P3	Listo le voy a cambiar de dirección
	P4	Ahora si voy a hacer subir el hombro 1

Fase 3 Etapa 2b	P5	Entonces esperamos un poco estoy mirando el punto en el que alcancemos la altura del cubo rojo, lo detengo
	P6	Y ahora me voy a desplazar hacia la derecha o sea voy a mover hombro 2, primero voy a cambiar de dirección
	P7	Hasta alcanzar desde la vista de techo al cubo rojo
	P8	Lo detengo vuelvo a activarlo
	P9	Activo mano
	P10	La dejo abrir lo suficiente y la detengo

Tabla 36. Proposiciones del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.

Fuente: Creación propia

Episodio	No	Transcripción de la inferencia
Fase 3 Etapa 2b	I1	Levanta el hombro 1 teniendo en cuenta la vista lateral
	I2	Detiene el movimiento del 5
	I3	Cambia dirección
	I4	Sube el hombro 1
	I5	Lo detiene al alcanzar la altura del cubo rojo
	I6	Cambia de dirección y mueve el hombro 2 a la derecha
	I7	Verifica la vista de techo
	I8	Detiene el hombro 2, lo vuelve a activar, lo detiene
	I9	Abre la mano
	I10	Detiene la mano

Tabla 37. Inferencias del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.

Fuente: Creación propia

Episodio	Transcripción de la codificación
Fase 3 Etapa 2b	S(H1), Ve(Vi) D(H2) In(DiG) S(H1) D(H1) In(DiG), M(H2, Af) Ve(Vi) D(H2), M(H2,Af), D(H2) A(Ma), D(Ma)

Tabla 38. Codificación del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.

Fuente: Creación propia

Fase 3 Sujeto 2				
Tarea	Comandos	Dirección	Distancia	Estrategia Inferida
			al objeto (L – Mc – C-Meta)	
Fase 3 Etapa 1 ^a : 1 intento de apuntar hacia el cubo verde	0	→	L	El sujeto primero tiende a orientar el exoesqueleto virtual teniendo en cuenta la altura del cubo que quiere alcanzar, luego lo orienta teniendo en cuenta la posición del cubo en el eje horizontal. Esta estrategia lo lleva a no cambiar ningún comando hasta alcanzar las posiciones estimadas anteriormente.
	2	--	L	
	4	→	L	
	2	--	L	
	4	→	MC	
	2	--	MC	
	6	→	MC	
	2	--	MC	
	5	→	C	
	2	--	C	
	3	-- ←	C	
	2	--	C	
	3	-- →	C	
	4	→	C	
	2	--	C	
	6	→	C	
	2	--	C	
	4	→	C	
	2	--	C	
	5	→	C	
2	--	C		
3	-- ←	C		
4	←	C		
2	--	Me		
Fase 3 Etapa 1b: 2 intento de apuntar hacia el cubo verde	0	→	L	El sujeto primero tiende a orientar el exoesqueleto virtual teniendo en cuenta la altura del cubo que quiere alcanzar, luego lo orienta teniendo en cuenta la posición del cubo en el eje horizontal. Esta estrategia lo lleva a no cambiar ningún comando hasta alcanzar con el movimiento de una sola articulación las posiciones estimadas anteriormente.
	5	→	L	
	3	-- ←	L	
	4	←	L	
	3	-- →	L	
	4	→	MC	
	2	--	MC	
	5	→	C	
	3	-- ←	C	
	4	←	MC	
3	-- →	MC		

	4	→	C	El sujeto tiende a corregir inmediatamente los errores de activación de las articulaciones del exoesqueleto virtual, para corregir estos errores el sujeto cambia la dirección de movimiento y activa la articulación que le permita posicionarse en la ubicación inmediatamente anterior a la ejecución del error.
	2	--	C	
	3	-- ←	C	
	5	←	Me	
	2	--	Me	
Fase 3 Etapa 2ª:	0	→	L	El sujeto se orienta teniendo en cuenta por lo menos dos de las cuatro vistas proporcionadas del espacio virtual, además siempre confirma la dirección en la cual se va a mover la articulación y el número de parpadeos registrado por el sistema, lo que le permite realizar la corrección de errores en un tiempo corto.
1 intento de capturar el cubo rojo	2	--	L	
	4	→	MC	
	2	--	MC	
	3	-- ←	MC	
	5	←	C	
	2	--	C	
	6	←	C	
	2	--	C	
	3	-- →	C	
	6	→	Me	
	2	--	Me	
	Fase 3 Etapa 2b:	0	→	
2 intento de capturar el cubo rojo	5	→	L	
	3	-- ←	L	
	2	--	L	
	3	-- →	L	
	4	→	MC	
	2	--	MC	
	3	-- ←	MC	
	5	←	C	
	3	-- →	C	
	2	--	C	
	6	→	C	
	2	--	C	
	4	→	C	
	2	--	C	
	6	→	Me	
	2	--	Me	

				permite realizar la corrección de errores en un tiempo corto.
--	--	--	--	---

Tabla 39. Caracterización de comandos y estrategias empleadas durante el desarrollo de tareas de posicionamiento y orientación de un exoesqueleto virtual del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual.

Fuente: Creación propia

Las estrategias identificadas en el análisis de los protocolos verbales de los sujetos que pertenecían al grupo con bio-retroalimentación visual fueron:

Sujeto 1:

1. El sujeto inicialmente observa las vistas para definir el orden y la dirección de activación de cada articulación que lo llevará a ubicar el exoesqueleto en una posición donde apunte al cubo. Este orden lo define antes de iniciar los movimientos de cada articulación.
2. El sujeto tiende a corregir inmediatamente los errores de activación de las articulaciones. Para corregir estos errores el sujeto cambia la dirección de movimiento y activa la articulación que le permita posicionarse en la ubicación inmediatamente anterior a la ejecución del error.
3. El sujeto orienta el exoesqueleto virtual con respecto a la ubicación de los cubos teniendo en cuenta por lo menos dos de las cuatro vistas proporcionadas en la interfaz gráfica, además siempre confirma la dirección en la cual se va a mover la articulación y el número de parpadeos registrado por el sistema, lo que le permite realizar la corrección de errores en un tiempo corto.
4. El sujeto tiende a buscar la exactitud en la posición del exoesqueleto virtual, aun cuando esto le implique realizar más pasos y posiblemente cometer algunos errores de activación.

Sujeto 2:

1. El sujeto primero tiende a orientar el exoesqueleto virtual teniendo en cuenta la altura del cubo que quiere alcanzar, luego lo orienta teniendo en cuenta la posición del cubo en el eje horizontal. Esta estrategia lo lleva a no cambiar ningún comando hasta alcanzar las posiciones estimadas anteriormente.

2. El sujeto tiende a corregir inmediatamente los errores de activación de las articulaciones del exoesqueleto virtual, para corregir estos errores el sujeto cambia la dirección de movimiento y activa la articulación que le permita posicionarse en la ubicación inmediatamente anterior a la ejecución del error.
3. El sujeto orienta el exoesqueleto virtual con respecto a la ubicación de los cubos teniendo en cuenta por lo menos dos de las cuatro vistas proporcionadas en la interfaz gráfica, además siempre confirma la dirección en la cual se va a mover la articulación y el número de parpadeos registrado por el sistema, lo que le permite realizar la corrección de errores en un tiempo corto.

7.2 Desarrollo de la experimentación con el ambiente de aprendizaje de señales electroencefalográficas del parpadeo con bio-retroalimentación auditiva

A continuación se presentan los resultados obtenidos por los dos sujetos en cada una de las fases:

Fase 1 – Etapa 1. En la tabla 40 se muestra en la primera columna el número determinado de parpadeos seguidos (2, 3, 4, 5, 6 y 7) que puede ser realizado por los sujetos 1 y 2. En la segunda y quinta columna están los aciertos al realizar la tarea del sujeto 1 y 2 respectivamente. En la tercera y sexta columna se presenta el número de errores obtenidos por el sujeto 1 y 2 respectivamente. En la cuarta y séptima columna se presenta el valor de la eficacia del sujeto 1 y 2 respectivamente al realizar la tarea. En la última columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2. En los datos obtenidos se puede evidenciar que el número de aciertos para cada sujeto varía entre 9 y 10, para el caso del sujeto 1 y entre 8 y 10 para el caso del sujeto 2, la media de los aciertos fue de 9,5 para el caso del sujeto 1 y de 9,167 para el caso del sujeto 2. El número de errores varía entre 0 y 1 y la media de estos en el caso del sujeto 1 fue de 0,5 mientras que para el sujeto 2 fue de 1. La eficacia obtenida por el sujeto 1 varía entre un rango de 90 a 100, para el sujeto 2 lo hace entre 80 y 100, presentándose para el sujeto 1, una eficacia promedio de 95,00, y para el sujeto 2 de 91,667; el promedio de la eficacia de los dos sujetos en la realización de todos los ejercicios es de 93,333 con una desviación estándar de 4,082. Los dos sujetos obtuvieron un

promedio de eficacia del 100% para el ejercicio de 2 parpadeos seguidos, sin embargo, no se observa una relación entre el número de parpadeos y la eficacia.

Parpadeos	Sujeto 1			Sujeto 2			Eficacia Promedio de sujetos 1 y 2 (%)
	Nº de Aciertos	Nº de Errores	Eficacia (%)	Nº de Aciertos	Nº de Errores	Eficacia (%)	
2	10	0	100	10	0	100	100
3	9	1	90	9	1	90	90
4	10	0	100	9	1	90	95
5	9	1	90	9	1	90	90
6	10	0	100	8	2	80	90
7	9	1	90	10	1	100	95
Media	9,500	0,500	95,000	9,167	1,000	91,667	93,333
Desviación Estándar	0,548	0,548	5,477	0,753	0,632	7,528	4,082

Tabla 40. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva en la Fase 1 Etapa 1.

Fuente: Creación propia.

Fase 1 – Etapa 2. En la tabla 41 se muestra en la primera columna el número determinado de parpadeos seguidos (2, 3, 4, 5, 6 y 7) que puede ser realizado por los sujetos 1 y 2. En la segunda y sexta columna están el número de repeticiones (cada una consta de 10 ejercicios) que tuvo que realizar cada sujeto respectivamente para garantizar una eficacia mayor a un 80%. En la tercera y séptima columna se presenta el número de aciertos obtenidos por el sujeto 1 y 2 respectivamente. En la cuarta y octava columna se presenta el número de errores obtenidos por el sujeto 1 y 2 respectivamente. En la quinta y novena columna se presenta el valor de la eficacia al realizar la tarea del sujeto 1 y 2 respectivamente. En la última columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2. Los datos que se presentan son los de la última repetición donde se garantiza que el sujeto tenga un 80% de eficacia.

En los datos obtenidos se puede evidenciar que el número de aciertos de los sujetos varía entre 8 y 10 y se observa que el sujeto 1 obtuvo una media de aciertos de 9,167 la cual es mayor a la del sujeto 2 de 8,833. El número de errores varía entre 0 y 2, el sujeto 1 tuvo una media de errores de 0,833 la cual es menor a la del sujeto 2 de 1,167. La eficacia obtenida por los sujetos varía entre un rango de 80 a 90, en este caso el sujeto 1 con 91,667 y el sujeto 2 con 88,333, el promedio de

eficacia de los dos sujetos en la realización de todos los ejercicios es de 90,000 con una desviación estándar de 5,477.

Se puede observar que en el caso del sujeto 1 donde la media de repeticiones fue más alta (1,167), la media de eficacia también fue más alta. El sujeto 1 tuvo más dificultad para realizar la tarea con éxito en los 7 parpadeos.

Parpadeos	Sujeto 1				Sujeto 2				Eficacia Prom de sujetos 1 y 2 (%)
	Nº de Repeticiones	Nº de Aciertos	Nº de Errores	Eficacia (%)	Nº de Repeticiones	Nº de Aciertos	Nº de Errores	Eficacia (%)	
2	1	10	0	100	1	8	2	80	90
3	1	9	1	90	1	9	1	90	90
4	1	9	1	90	1	8	2	80	85
5	1	10	0	100	1	10	0	100	100
6	1	9	1	90	1	8	2	80	85
7	2	8	2	80	1	10	0	100	90
Media	1,167	9,167	0,833	91,667	1,000	8,833	1,167	88,33	90,000
Desviación Estándar	0,408	0,753	0,753	7,528	0,000	0,983	0,983	9,832	5,477

Tabla 41. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva en la Fase 1 Etapa 2.

Fuente: Creación propia.

Fase 2 – Etapa 2. En la tabla 42 se muestra en la primera columna la tarea asignada. En la segunda y quinta columna están el número de éxitos al realizar cada tarea del sujeto 1 y 2 respectivamente. En la tercera y sexta columna se presenta el número de errores obtenidos por el sujeto 1 y 2 respectivamente. En la cuarta y séptima columna se presenta el valor de la eficacia al realizar la tarea del sujeto 1 y 2 respectivamente. En la última columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2. En los datos obtenidos se puede evidenciar que la media de éxitos para el sujeto 1 y 2 fue de 4. El número de errores fue 1 para el sujeto 1 y 2, la eficacia obtenida por los sujetos fue de 80, en este caso el sujeto 1 y 2 obtuvieron un promedio de eficacia

de 80, el promedio de eficacia de los dos sujetos para las dos tareas es de 80,00 con una desviación estándar de 0,000. Los dos sujetos lograron realizar las tareas con éxito.

Tarea	Sujeto 1			Sujeto 2			Eficacia Promedio de sujetos 1 y 2
	Nº de Éxitos	Nº de Errores	Eficacia (%)	Nº de Éxitos	Nº de Errores	Eficacia (%)	
1	4	1	80	4	1	80	80
2	4	1	80	4	1	80	80
Media	4	1	80	4	1	80	80
Desviación Estándar	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 42. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva en la Fase 2 Etapa 2.

Fuente: Creación propia.

Fase 2 – Etapa 3. En la tabla 43 se muestra en la primera columna la tarea asignada. En la segunda y quinta columna están el número de éxitos al realizar cada tarea del sujeto 1 y 2 respectivamente. En la tercera y sexta columna se presenta el número de errores obtenidos por el sujeto 1 y 2 respectivamente. En la cuarta y séptima columna se presenta el valor de la eficacia al realizar la tarea del sujeto 1 y 2 respectivamente. En la última columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2. En los datos obtenidos se puede evidenciar que la media de éxitos para el sujeto 1 fue de 4,5 y estuvo por encima de la del sujeto 2 que fue de 4. El número de errores varía entre 0 y 1 para el sujeto 1, mientras que para el sujeto 2 se mantuvo en 1, la eficacia obtenida por el sujeto 1 varía entre un rango de 80 a 100, para el caso del sujeto 2 se mantiene en 80, el sujeto 1 obtuvo un promedio de eficacia de 90 el cual fue mayor al del sujeto 2 que fue de 80, el promedio de eficacia de los dos sujetos para las dos tareas es de 85,00 con una desviación estándar de 7,071. Los dos sujetos lograron realizar las tareas con éxito.

Tarea	Sujeto 1			Sujeto 2			Eficacia Promedio de sujetos 1 y 2 (%)
	Nº de Éxitos	Nº de Errores	Eficacia (%)	Nº de Éxitos	Nº de Errores	Eficacia (%)	

1	5	0	100	4	1	80	90
2	4	1	80	4	1	80	80
Media	4,5	0,5	90	4	1	80	85
Desviación Estándar	0,707	0,707	14,142	0,000	0,000	0,000	7,071

Tabla 43. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva en la Fase 2 Etapa 3.

Fuente: Creación propia.

Fase 2 – Etapa 4. En la tabla 44 se muestra en la primera columna la tarea asignada. En la segunda y quinta columna están el número de éxitos al realizar cada tarea del sujeto 1 y 2 respectivamente. En la tercera y sexta columna se presenta el número de errores obtenidos por el sujeto 1 y 2 respectivamente. En la cuarta y séptima columna se presenta el valor de la eficacia al realizar la tarea del sujeto 1 y 2 respectivamente. En la última columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2. En los datos obtenidos se puede evidenciar que la media de éxitos en ambos casos fue de 4,5. El número de errores varía entre 0 y 1 para los dos sujetos, la eficacia obtenida por los sujetos varía entre un rango de 80 a 100, en este caso el promedio de eficacia para cada sujeto fue de 90 al igual que el promedio de eficacia de los dos sujetos para las dos tareas con una desviación estándar de 14,142. Los dos sujetos lograron realizar las tareas con éxito.

Tarea	Sujeto 1			Sujeto 2			Eficacia Promedio de sujetos 1 y 2 (%)
	Nº de Éxitos	Nº de Errores	Eficacia (%)	Nº de Éxitos	Nº de Errores	Eficacia (%)	
1	5	0	100	5	0	100	100
2	4	1	80	4	1	80	80
Media	4,5	0,5	90	4,5	0,5	90	90
Desviación Estándar	0,707	0,707	14,142	0,707	0,707	14,142	14,142

Tabla 44. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 2 Etapa 4.

Fuente: Creación propia.

Fase 2 – Etapa 5. En la tabla 45 se muestra en la primera columna la tarea asignada. En la segunda y quinta columna están el número de éxitos al realizar cada tarea del sujeto 1 y 2 respectivamente. En la tercera y sexta columna se presenta el número de errores obtenidos por el sujeto 1 y 2

respectivamente. En la cuarta y séptima columna se presenta el valor de la eficacia al realizar la tarea del sujeto 1 y 2 respectivamente. En la última columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2. En los datos obtenidos se puede evidenciar que la media de éxitos para el sujeto 2 fue de 5 y estuvo por encima de la del sujeto 1 que fue de 4. El número de errores varía entre 0 y 2 para el sujeto 1, la eficacia obtenida por el sujetos 1 varía entre un rango de 60 a 100, mientras que la del sujeto 2 se mantuvo en 100, en este caso el sujeto 2 obtuvo un promedio de eficacia de 100 el cual fue mayor al del sujeto 1 que fue de 80, el promedio de eficacia de los dos sujetos para las dos tareas es de 90,00 con una desviación estándar de 14,142. Se puede evidenciar que la tarea 1 de la etapa 5 se le dificultó al sujeto 1 obteniendo una eficacia del 60 para la misma.

Tarea	Sujeto 1			Sujeto 2			Eficacia Promedio de sujetos 1 y 2 (%)
	Nº de Éxitos	Nº de Errores	Eficacia (%)	Nº de Éxitos	Nº de Errores	Eficacia (%)	
1	3	2	60	5	0	100	80
2	5	0	100	5	0	100	100
Media	4	1	80	5	0	100	90
Desviación Estándar	1,414	1,414	28,284	0,000	0,000	0,000	14,142

Tabla 45. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual en la Fase 2 Etapa 5.

Fuente: Creación propia.

Fase 3 – Etapa 1 y 2. En la tabla 46 se muestra en la primera columna la etapa de la fase. En la segunda columna están el intento 1 y 2 ya que cada etapa debía realizarse 2 veces. En la tercera y quinta columna están el número de comandos empleados por cada sujeto para realizar las tareas en cada intento respectivamente. En la cuarta y sexta columna se presenta el tiempo en segundos que se demoró el sujeto 1 y 2 respectivamente cumpliendo cada tarea. En la sexta columna se presenta la media de comandos usados por los 2 sujetos en la resolución de cada tarea. En la última columna se puede encontrar el tiempo promedio empleado para realizar cada tarea entre el sujeto 1 y el sujeto 2. Además se presentan 2 filas que hacen referencia a la media del número de comandos y tiempo para cada sujeto en cada una de las etapas.

En los datos obtenidos se puede evidenciar que para la etapa 1 el sujeto 1 empleó en promedio 15 comandos, menos que los utilizados por el sujeto 2, quién requirió 20,5, por otro lado, al sujeto 2 le tomó 163,5 s en promedio ejecutar la tarea de la etapa 1, menos de lo que le llevó al sujeto 1 que fueron 193,5 s. Se evidencia que para esta etapa en el segundo intento, el sujeto 2 redujo el número de comandos y el tiempo empleado para la realización de la tarea, mientras que con el sujeto 1 ocurrió lo contrario. Se aprecia que el tiempo promedio para ambos sujetos, incrementa de 17 a 18,5 del intento 1 al 2, mientras que el tiempo promedio decrece de 203 s a 154s. Para esta primera etapa la media de comandos usados por los dos sujetos fue de 17,75 con una desviación estándar de 1,061 y el tiempo medio de los dos sujetos fue de 178,5s con una desviación estándar de 34,648. En la etapa 2 el sujeto 1 empleó en promedio 21 comandos y un tiempo promedio de 426,5 s para la realización de la tarea, este último fue más alto que el empleado por el sujeto 2, donde su tiempo promedio fue de 312,75 s y el número de comandos promedio que obtuvo fue de 26, valor mayor que el del sujeto 1. Se evidencia que para esta etapa el promedio de comandos de los dos sujetos paso de 29 a 18 en el segundo intento, así mismo el tiempo promedio de los dos sujetos se redujo de 449 s en el primer intento a 176,5 s en el segundo intento. Se puede evidenciar que las tareas de la etapa 2 requirieron más tiempo para ser realizadas. Para esta segunda etapa la media de comandos usados por los dos sujetos fue de 23,5 con una desviación estándar de 7,778 y el tiempo medio de los dos sujetos fue de 312,75s con una desviación estándar de 192,687.

Tarea	Intento	Sujeto 1		Sujeto 2		Nº promedio de comandos de sujetos 1 y 2	Tiempo promedio de sujetos 1 y 2 (s)
		Nº de comandos	Tiempo (s)	Nº de comandos	Tiempo (s)		
Etapa 1	1	11	179	23	227	17	203
	2	19	208	18	100	18,5	154
Media		15	193,5	20,5	163,5	17,75	178,5
Desviación Estándar		5,657	20,506	3,536	89,803	1,061	34,648
Etapa 2	1	26	644	32	254	29	449
	2	16	209	20	144	18	176,5
Media		21	426,5	26	199	23,5	312,75
Desviación Estándar		7,071	307,591	8,485	77,782	7,778	192,687

Tabla 46. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva en la Fase 3 Etapa 1 y Etapa 2.

Fuente: Creación propia.

La fase 4. En la tabla 47 se muestra en la primera columna el número de la tarea a realizar, en la segunda columna se encuentra el intento en el que el sujeto logró realizar la tarea, ya que cada tarea debía realizarse máximo 2 veces, en la tercera columna se presenta el número de errores, en la cuarta columna se presenta el número de comandos empleados para la realización de cada tarea, en la quinta columna se presenta el tiempo empleado en realizar la tarea, en la sexta columna se encuentra la eficacia para cada una de las tareas y en la última columna se puede encontrar la eficiencia en cada una de las tareas. Los datos que se presentan son los de la última repetición, además se identifican las filas donde los datos pertenecen al sujeto 1 y los del sujeto 2. En los datos obtenidos se puede evidenciar que el promedio del número de intentos 1,167, el promedio del número de errores 0,333 y el promedio del número de comandos 8,50, fueron mayores en el sujeto 1, que en el sujeto 2, donde su promedio de intentos fue 1, el promedio del número de errores fue 0 y el promedio del número de comandos 3,333; sin embargo, en el promedio del tiempo el sujeto 1 se vio afectado por el tiempo que le tomó realizar la tarea número 3 por lo tanto su tiempo promedio fue 111,833, este promedio estuvo muy por encima que el tiempo promedio del sujeto 2, 44. La eficacia fue mayor en el sujeto 2 con un porcentaje de 100%, mientras que el sujeto 1 no logró realizar la tarea número 3 obteniendo una eficacia de 0%, la eficiencia promedio del sujeto 2 de 3,016 fue mayor que la del sujeto 1 el cual obtuvo una eficiencia de 1,535.

Se evidencia que las tareas que más causaron dificultad a los sujetos fueron la número 3 y la número 4, ya que en estas se encuentran los errores o los tiempos más altos, así mismo las tareas que menos les causaron dificultad fueron la número 2, la 5 y la 6, ya que es allí donde se registraron los tiempos más bajos y el menos número de comandos empleados.

	Tarea	Nº de Intentos	Nº de Errores	Nº de Comandos	Tiempo (s)	Eficacia	Eficiencia
Sujeto 1	1	1	0	4	55	100	1,818
	2	1	0	2	38	100	2,632
	3	2	2	31	366	0	0,000
	4	1	0	5	107	100	0,935
	5	1	0	5	56	100	1,786
	6	1	0	4	49	100	2,041

	Media	1,167	0,333	8,5	111,833	83,333	1,535
	Desviación Estándar	0,408	0,816	11,077	126,784	40,825	0,929
Sujeto 2	1	1	0	2	37	100	2,703
	2	1	0	4	36	100	2,778
	3	1	0	5	101	100	0,990
	4	1	0	4	48	100	2,083
	5	1	0	2	22	100	4,545
	6	1	0	3	20	100	5,000
	Media	1	0	3,333	44	100	3,016
	Desviación Estándar	0,000	0,000	1,211	29,793	0,000	1,510

Tabla 47. Resultados obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva en la Fase 4.

Fuente: Creación propia.

En la tabla 48 se muestra en la primera columna el número de la tarea a realizar, en la segunda columna se encuentra el promedio de comandos usados por los dos sujetos para realizar la tarea, en la tercera columna se presenta el tiempo promedio que tardaron los dos sujetos para la realización de cada tarea, en la cuarta columna se presenta la eficacia promedio de los sujetos y en la última columna se puede encontrar el promedio de la eficiencia de los dos sujetos para cada una de las tareas. En los datos obtenidos se puede evidenciar que la tarea que tuvo una eficacia menor al 80% fue la número 3, en las demás los sujetos alcanzaron la mayor eficacia. La tarea que menos tardaron en completar fue la número 6 con un tiempo promedio de 34,5 s y la que más tiempo les llevó fue la número 3 con un tiempo promedio de 233,5 s, así mismo las tareas en las que tuvieron que realizar menos comandos fueron la 1 y la 1 cada una con 3 comandos y las que más comandos les exigió fue la número 3 con un promedio de 18 comandos.

Tarea	Promedio N° de Comandos de sujetos 1 y 2	Tiempo Promedio de sujetos 1 y 2	Eficacia Promedio de sujetos 1 y 2	Eficiencia Promedio de sujetos 1 y 2
1	3	46	100	2,260
2	3	37	100	2,705

3	18	233,5	50	0,495
4	4,5	77,5	100	1,509
5	3,5	39	100	3,166
6	3,5	34,5	100	3,520
Media	5,917	77,917	91,667	2,276
Desviación Estándar	5,945	77,844	20,412	1,121

Tabla 48. Promedios obtenidos por los sujetos 1 y 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva en la Fase 4.

Fuente: Creación propia.

7.2.1 Análisis de protocolos verbales para la fase 3 de la experimentación con el ambiente de aprendizaje de señales electroencefalográficas del parpadeo con bio-retroalimentación auditiva

En el desarrollo de la fase 3 se identificaron las estrategias empleadas por cada sujeto durante la resolución de las dos tareas propuestas, aplicando el análisis de protocolos verbales (Sanabria, 2008). A continuación se presenta la transcripción de la verbalización de cada sujeto, las proposiciones, inferencias, codificación y la caracterización de comandos y estrategias empleadas durante el desarrollo de tareas de posicionamiento y orientación de un exoesqueleto virtual.

Vistas distribuidas por cuadrantes:

1er Cuadrante → Vista Lateral.

2do Cuadrante → Vista de atrás.

3er Cuadrante → Vista Superior.

4to Cuadrante → Vista en proyección

Sujeto 1

Fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde

Tengo 4 vistas..., noto que en dos vistas los objetos se ven co-lineales pero en las otras dos no, significa que la profundidad y la altura están variando, entonces lo que voy a hacer primero es a levantar el brazo y lo voy a levantar por hombro_1....

--trate de irme contando qué está haciendo—

Ok, pues... fallé en el parpadeo y creo que no me tomó bien la instrucción e invirtió el giro entonces lo que estoy haciendo es devolver el brazo para que quede alineado con el cubo verde y... me estoy guiando por la vista 4, la que está resaltada en el cuadro rojo, eh..., para guiarme y ahora voy a intentar levantar... el brazo, noto también que la vista 3, o bueno la que está junto a la que está resaltada en rojo, me puede ayudar para buscar la trayectoria más adecuada para interceptar el cubo..., noto que la pinza no toca directamente el...
 --listo, se da por cumplida la tarea, ¿de acuerdo?—

Episodios	N°	Transcripción de la proposición
Señalar cubo verde. Intento 1.	P1	Tengo 4 vistas y noto que en dos de ellas los objetos se ven colineales pero en las otras no.
	P2	La profundidad y la altura están variando en las vistas.
	P3	Levanto el hombro 1
	P4	Fallé en el parpadeo, creo que no me tomó bien la instrucción e invirtió el giro.
	P5	Devuelvo el brazo para que quede alineado con el cubo verde.
	P6	Me guio por la vista 4.
	P7	Levanto el hombro 1.
	P8	La vista 3 me ayuda a buscar más fácil una trayectoria para interceptar el cubo.

Tabla 49. Proposiciones del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Episodios	N°	Inferencias del protocolo
Señalar cubo verde. Intento 1.	I1	Se ubica espacialmente con relación a las vistas.
	I2	Detecta que los cubos no tienen la misma altura.
	I3	Levanto el hombro 1.
	I4	Invirtió el giro por error.
	I5	Baja el hombro 1.
	I6	Observa la vista 4.
	I7	Levanta el hombro 1.
	I8	Observa la vista 3.

Tabla 50. Inferencias del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Episodios	Transcripción de la codificación
Señalar cubo verde. Intento 1.	Vi(*)
	Ve()
	S(H1)
	Inv(DiG)
	B(H1)
	Vi()
	S(H1)
	Vi(3)

Tabla 51. Codificación del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde

Bueno, ahora estoy girando el hombro para buscar el ángulo para poder tocar con plena comodidad el cubo verde,..., cuando sienta que ya estoy llegando al ángulo voy a parar y después voy a flexionar un poco el codo,..., ahora quiero invertir el sentido de giro...

--Párelo primero y luego vuelva a aplicar el 3, ¿listo?—

Ah..., ok, ahora voy a levantar el hombro completo, uy..., me faltó un poco...

--No olvide verbalizar, estar contándonos qué está haciendo—

Eh..., me equivoqué en la instrucción, eh..., se me invirtió el sentido de giro, pues ya noté que dentro del algoritmo tengo que parar primero para poder volver a invertir el giro, eh..., entonces lo que estoy haciendo ahora es parar el sistema, voy a mandar tres parpadeos para invertir el sentido de giro y voy a buscar ahora si tocar el cubo verde.

--Listo—

Episodios	Nº	Transcripción de la proposición
Señalar cubo verde. Intento 2.	P1	Giro el hombro un ángulo para poder tocar el cubo verde.
	P2	Pararé cuando ya esté cerca.
	P3	Flexiono el codo.
	P4	Invierto el sentido de giro.
	P5	Levanto el hombro 1 completo.

	P6	Me equivoqué en la instrucción, se invirtió el sentido de giro.
	P7	Noté que tengo que parar poder volver a invertir el giro.
	P8	Paro el sistema.
	P9	Mando tres parpadeos para invertir el sentido de giro.
	P10	Ahora busco tocar el cubo verde.

Tabla 52. Propositiones del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Episodios	N°	Inferencias del protocolo
Señalar cubo verde. Intento 2.	I1	Gira el codo hacia adentro.
	I2	Espera para detenerse.
	I3	Levanta el codo.
	I4	Invierte sentido de giro.
	I5	Levanta hombro 1.
	I6	Invierte el giro por error.
	I7	Se detiene para invertir giro.
	I8	Se detiene.
	I9	Invierte el sentido de giro.
	I10	Levanta hombro 1.

Tabla 53. Inferencias del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Episodios	Transcripción de la codificación
Señalar cubo verde. Intento 2.	M(H2,Ad)
	D()
	S(Co)
	Inv(DiG)
	S(H1)
	Inv(DiG)
	D(), Inv(DiG)
	D()
	Inv(DiG)
	S(H1)

Tabla 54. Codificación del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo

Bueno, ahora lo que voy a hacer es, eh..., lo inverso del ejercicio anterior, entonces el hombro iba hacia adentro ahora va a ir hacia afuera, entonces lo que voy a hacer primero es invertir el sentido de giro, ahora voy a buscar mover el hombro para encontrar el ángulo para tocar el cubo rojo.

--Si puede, trate de hablar un poquito más fuerte—

Sí, señor. Eh..., me estoy basando en la vista 3, en este momento, creo que es la que me brinda mejor información para encontrar el ángulo óptimo, ahora voy a parar el sistema, ahora lo que voy a hacer es invertir el sentido de giro,..., voy a flectar un poco el codo, creo que fue mucho, me faltó,..., creo que me faltó un poco de ángulo, voy a trabajar con hombro 1, a ver qué ocurre,..., creo que ahí está perfecto, ahora voy a abrir la pinza, bueno o la mano, perdón,..., noto que desde la vista 3 se bien pero al,..., mirar la 4 la 1 y la 2, noto que estoy completamente desfasado,..., pues ya hablando desde una superior, estoy bien, me faltaría,..., no, en realidad ahora se está volviendo confuso, cuando hago la construcción por,..., cada una de las vistas, porque siento que una me está indicando bien el camino, pero la otra me está diciendo, estás totalmente desfasado, entonces ahora lo que estoy haciendo es intentando reconstruir, para ubicarme espacialmente, pero siento que para este ejercicio no me están ayudando,..., las vistas, porque tienden a confundirme, pienso hacia qué lugar debo mandar...

--Mire la vista de atrás para ubicarse en altura—

Para ubicarme,..., pero noto que, si comparo la 1 y la 4, es dispersa y si comparo la 2 y la 3 también es un poco confuso, osea, siento que hay algo raro, jeje..., entonces voy a intentar doblar el hombro, ups..., no era la que quería,..., paro el sistema porque siento que estoy perdiendo el rumbo, lo que voy a hacer es invertir el giro,..., otra vez estoy en la..., me estoy guiando con,..., la vista número 3, eh..., intento utilizar también las otras vistas, creo que voy a utilizar la vista uno, para levantar más el,..., para levantar, bueno primero invierto el sentido de giro, ahora creo que voy a levantar más el brazo y creo que debería ya llegar al punto que yo quiero...

-- Correcto—

Episodios	N°	Transcripción de la proposición
-----------	----	---------------------------------

Capturar cubo rojo. Intento 1.	P1	Esto es lo inverso al ejercicio anterior. El hombro iba hacia adentro ahora va a ir hacia afuera.
	P2	Invierto el sentido de giro.
	P3	Muevo el hombro para encontrar el ángulo para tocar el cubo rojo.
	P4	En la vista 3 puedo encontrar más fácil el ángulo.
	P5	Paro el sistema. Invierto el sentido de giro.
	P6	Flexiono el hombro. Fue mucho.
	P7	Muevo el hombro 1. Ahí está perfecto
	P8	Abro la pinza.
	P9	Miro la vista 3, pero no veo la relación con las otras vistas.
	P10	Me confunden las vistas.
	P11	Siento que las vistas me confunden.
	P12	Muevo el hombro 1. No era la que quería.
	P13	Paro el sistema. Siento que pierdo el rumbo.
	P14	Invierto el sentido de giro. Me guio por la vista 3.
	P15	Utilizo también las otras vistas. Uso la vista 1.
	P16	Invierto el sentido de giro.
	P17	Levanto hombro 1. Debería llegar al punto que quiero.

Tabla 55. Propositiones del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.

Fuente: Creación propia

Episodios	N°	Inferencias del protocolo
Capturar cubo rojo. Intento 1.	I1	Decide girar hombro 2 hacia adentro.
	I2	Invierto sentido de giro.
	I3	Sube hombro 2.
	I4	Observa la vista 3.
	I5	Se detiene, invierte el sentido de giro.
	I6	Mueve hombro 1.
	I7	Sigue moviendo hombro 1.
	I8	Abre la mano.
	I9	Observa la vista 3.
	I10	Se confunde espacialmente.
	I11	Se confunde espacialmente.
	I12	Activa hombro 1 involuntariamente.
	I13	Se detiene, está confundido.
	I14	Invierte el sentido de giro. Observa vista 3.
	I15	Observa las otras vistas.

I16	Invierte el sentido de giro.
I17	Levanta hombro 1.

Tabla 56. Inferencias del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.

Fuente: Creación propia

Episodios	Transcripción de la codificación
Capturar cubo rojo. Intento 1.	M(H2,Ad)
	Inv(DiG)
	S(H2)
	Vi(3)
	D(), Inv(DiG)
	S(H1)
	S(H1)
	A(Ma)
	Vi(3)
	Vi(*)
	Vi(*)
	S(H1)
	D(), Vi(*)
	Inv(DiG), Vi(3)
	Vi(*)
	Inv(DiG)
	S(H1)

Tabla 57. Codificación del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.

Fuente: Creación propia

Fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo

Ahora estoy tomando las cuatro figuras de forma general y estoy notando que sí me están suministrando más información cada una de las vistas, porque desde la vista 3 noto que se ven las tres co-lineales, cuando me voy a las otras vistas, noto que están a diferentes alturas una de la otra, entonces lo que voy a hacer ahora es levantar, no, voy a girar el codo, entonces, voy a parar, cambiar

al 2, cambiar de dirección y voy a girar el hombro,..., eh..., acabo de notar que puedo hacer dos movimientos al tiempo y,..., cuando lo... paro el sistema, paro todo en su totalidad,..., entonces ahora lo que voy a hacer es invertir el sentido de giro, esta práctica me gusta porque,..., ya estoy olvidando que al frente existe un papel, sino ya de forma automática estoy sintiendo que puedo dominar cada uno de los movimientos, sin tener que remitirme al papel para leer y saber qué movimiento es el que quiero hacer, osea, el ejercicio me está evocando a mecanizarme, aquí lo que estoy haciendo es buscar la vista 3, para buscar el ángulo, ahora lo que voy a hacer es flectar un poco el codo como en el ejercicio anterior,..., pero para ello primero voy a cambiar la dirección. Siento que el desplazamiento del codo es muchísimo más rápido que los otros, siento que estar muchísimo más pendiente,..., ahora lo que voy a hacer es levantar el brazo completo,..., ahora utilizo todas las vistas para ubicarme espacialmente, paro el sistema y ahora lo que quiero hacer es abrir la pinza, o bueno, la mano, utilizo todas las vistas.

--Listo--

Episodios	N°	Transcripción de la proposición
Capturar cubo rojo. Intento 2.	P1	Miro las cuatro vistas. Ahora entiendo la información.
	P2	En la vista 3 se ven colineales, en las demás no, tienen diferentes alturas.
	P3	Levanto hombro 1, mejor levanto el codo.
	P4	Me detengo y cambio de dirección.
	P5	Noto que puede hacer dos movimientos al tiempo.
	P6	Si detengo el sistema, todas paran.
	P7	Invierto el sentido de giro.
	P8	Esta práctica me gusta. Domino los movimientos de forma automática, ya no leo.
	P9	Miro la vista 3 para buscar el ángulo.
	P10	Cambio de dirección para poder doblar el codo.
	P11	El desplazamiento del codo es más rápido que los demás.
	P12	Levanto hombro 1.
	P13	Me ubico espacialmente con todas las vistas.
	P14	Paro el sistema. Abro la pinza.

Tabla 58. Proposiciones del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.

Fuente: Creación propia

Episodios	N°	Inferencias del protocolo
------------------	-----------	----------------------------------

Capturar cubo rojo. Intento 2.	I1	Observa las 4 vistas.
	I2	Ve que las alturas no son las mismas.
	I3	Quiere levantar hombro 1, se decide por levantar el codo.
	I4	Se detiene, cambia de dirección.
	I5	Puede hacer dos movimientos simultáneamente.
	I6	Todo para sí activa el 2.
	I7	Invierte el sentido de giro.
	I8	Le gusta manipular el exoesqueleto.
	I9	Observa la vista 3.
	I10	Invierte el sentido de giro.
	I11	El codo en más rápido que los otros.
	I12	Levanta hombro 1.
	I13	Se ubica espacialmente con las vistas.
	I14	Para el sistema. Abre pinza.

Tabla 59. Inferencias del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo

Fuente: Creación propia

Episodios	Transcripción de la codificación
Capturar cubo rojo. Intento 2.	Vi(*)
	Ve()
	S(Co)
	D(), Inv(DiG)
	Ve()
	Ve()
	Inv(DiG)
	Ve()
	Vi(3)
	Inv(DiG)
	Ve()
	S(H1)
	Vi(*)
	D(),A(Ma)

Tabla 60. Codificación del protocolo del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.

Fuente: Creación propia

Fase 3 Sujeto 1				
Tarea	Comandos	Dirección	Distancia al objeto	Estrategias Inferida

			(L-C-Mc- Meta)	
1A	0	--	L	El sujeto observa detenidamente las vistas de las que dispone para ubicarse espacialmente, luego determina que acciones va a seguir, posteriormente persigue rotar el hombro 2 hasta que la orientación del brazo coincida con la dirección del cubo verde y finalmente levanta hombro 1 hasta que la posición de la pinza coincida con la del cubo.
	2	--	L	
	5	←	L	
	2	--	L	
	3	--	L	
	4	←	C	
	2	--	C	
	5	→	C	
	2	--	C	
	3	--	C	
	4	→	Meta	
	2	--	Meta	
1B	0	--	L	El sujeto manifiesta una tendencia a rotar el hombro 2 hasta que la orientación del brazo coincida con la dirección del cubo verde, posteriormente levanta hombro 1 hasta que la posición de la pinza coincida con la del cubo.
	2	--	L	
	5	←	L	
	2	--	L	
	7	→	L	
	3	--	L	
	2	--	L	
	3	--	L	
	4	→	C	
	2	--	C	
	6	→	C	
	3	--	C	
2	--	C		

	3	--	C	
	4	→	Mc	
	3	--	Mc	
	2	--	Mc	
	3	--	Mc	
	5	←	Meta	
2A	0	--	L	El sujeto intenta adaptar la estrategia del ejercicio anterior a las características del ejercicio actual, de manera que rota el hombro 2 hacia afuera hasta orientar el brazo en la misma dirección del cubo rojo, posteriormente sube el hombro 2, buscando que la posición de la pinza coincida con la del cubo rojo, sin embargo, requiere detenerse para orientarse espacialmente porque no reconoce qué tan cerca está del cubo, luego de orientarse retoma la trayectoria que llevaba alcanza la posición del cubo ubica la pinza en la cara izquierda del cubo y abre la pinza.
	3	--	L	
	5	→	L	
	2	--	L	
	3	--	L	
	7	→	L	
	2	--	L	
	4	→	L	
	2	--	L	
	6	→	L	
	2	--	L	
	3	--	L	
	2	--	L	
	3	--	L	
	6	→	L	
	3	--	L	
	2	--	L	
	3	--	L	
	5	←	L	
	2	--	L	
3	--	L		
5	→	L		
2	--	L		
3	--	L		
4	→	Meta		
2B	0	--	L	Analiza las vistas para orientarse espacialmente, comunica qué va a hacer antes de ejecutar, rota el hombro 2 hasta que la orientación del brazo
	3	--	L	
	2	--	L	

3	--	L	coincide con la dirección del cubo, luego levanta el hombro 1 hasta que la posición de la pinza coincida con el borde izquierdo del cubo, luego abre la pinza.
5	←	L	
4	→	L	
2	--	L	
3	--	L	
5	→	L	
2	--	L	
3	--	L	
7	→	L	
2	--	L	
4	→	Mc	
6	→	Meta	
2	--	Meta	

Tabla 61. Caracterización de comandos y estrategias empleadas durante el desarrollo de tareas de posicionamiento y orientación de un exoesqueleto virtual del sujeto 1 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva.

Fuente: Creación propia

Sujeto 2:

Fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde

Ok, entonces, lo primero que voy a intentar hacer es tratar de hallar la altura, entonces..., voy a mover el hombro 1 hacia atrás, me quedó mal, di 3 pero no, igual se fue hacia adelante, no importa, ahora voy a cambiar a mover el codo hacia arriba y me estoy guiando por la vista, ...um...lateral, es la que me deja ver cómo cual es la altura del cubo,..., estoy esperando que llegue de pronto cerca y lo detengo, ahí marqué los dos parpadeos pero pues no los tomó y está tomando un 4, ok, 3, ahora como me pasé voy a tratar de devolverme,..., activé uno que no era, otra vez estoy tratando de hacer el 4, volví a activar uno que no era, se me cambió la dirección y no noté a qué horas, entonces como se cambió la dirección voy a dejar que llegue y apunte de pronto al cubo verde, nuevamente se cambió la dirección, voy a volver a intentar bajar el brazo, miro la fichita porque..., ya, no, entonces, voy como a tratar de mover el hombro 2, se empezó a desplazar, lo trato de detener y ahora voy a tratar de llevar el hombro 1 hacia atrás, eh...., di 4 pulsos pero no los coge, nuevamente di 4 pulsos pero no los coge,...y lo detengo.

--Listo--

Episodios	N°	Transcripción de la proposición
Señalar cubo verde. Intento 1.	P1	Hallo la altura. Muevo el hombro 1.
	P2	Lo hice mal, igual fue hacia adelante.
	P3	Muevo el codo hacia arriba. Me guío por la vista lateral.
	P4	Cuando esté cerca, me detengo.
	P5	Marqué 2 parpadeos, tomo un 4 luego un 3.
	P6	Me pasé, ahora me devuelvo.
	P7	Se cambió la dirección. No lo noté. Voy a dejar que llegue y apunte al cubo.
	P8	Se cambió la dirección. Bajo el brazo.
	P9	Muevo el hombro 2. Se empieza a desplazar.
	P10	Lo detengo. Muevo el hombro 1 hacia atrás.
	P11	No coge los 4 pulsos.
	P12	Lo detengo.

Tabla 62. Proposiciones del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Episodios	N°	Inferencias del protocolo
Señalar cubo verde. Intento 1.	I1	Observa la altura. Mueve hombro 1.
	I2	Activa hombro 1 involuntariamente.
	I3	Levanta el codo. Observa la vista lateral.
	I4	Espera para detenerse.
	I5	Salió un número distinto al marcado.
	I6	No se detuvo a tiempo.
	I7	Cambió la dirección involuntariamente.
	I8	Cambió la dirección involuntariamente. Baja hombro 1.
	I9	Gira hombro 2 hacia adentro.
	I10	Se detiene. Lleva hombro 1 hacia atrás.
	I11	No cambia el número en pantalla.
	I12	Se detiene.

Tabla 63. Inferencias del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Episodios	Transcripción de la codificación
Señalar cubo verde. Intento 1.	Vi(1), S(H1)
	S(H1)
	S(Co), Vi(1)

D()
Ve()
Ve()
Inv(DiG)
Inv(DiG), B(H1)
M(H2,Ad)
D(),B(H1)
Ve()
D()

Tabla 64. Codificación del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde

Voy a intentar subir el codo, hasta la altura del cubo verde,..., lo detuve, y ahora voy a tratar de girar el hombro 2, es con 5, activé el 6 sin querer, nuevamente voy con el 5, ah..., no parece querer, lo detengo.

--Listo--

Episodios	N°	Transcripción de la proposición
Señalar cubo verde. Intento 2.	P1	Subo el codo a la altura del cubo verde.
	P2	Lo detengo, giro el hombro 1.
	P3	Activé el 6 sin querer.
	P4	Voy con el 5 de nuevo, no quiere tomarlo.
	P5	Lo detengo.

Tabla 65. Proposiciones del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Episodios	N°	Inferencias del protocolo
Señalar cubo verde. Intento 2.	I1	Levanta el codo.
	I2	Se detiene. Levanta hombro 1.
	I3	Activa la mano involuntariamente.
	I4	No cambia el número en pantalla.
	I5	Se detiene.

Tabla 66. Inferencias del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Episodios	Transcripción de la codificación
Señalar cubo verde. Intento 2.	S(Co)
	D()
	A(Ma)
	Ve()
	D()

Tabla 67.

Tabla 67. Codificación del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Señalar cubo verde.

Fuente: Creación propia

Fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo

Voy a mover el codo, hacia arriba, voy a tratar de alcanzar la altura del cubo rojo y me baso en la vista lateral para poder saber más o menos cuando llegue a esa altura, trato de detenerlo, bien, ahora que llegué a la altura voy a tratar de desplazarme hacia la derecha, para eso tengo que hacer cambio de giro, bien lo logré, hombro 2, tengo que..., darle..., eh... 5 parpadeos, y se empieza a desplazar hacia la derecha, cuando ya llegue más o menos, estoy mirando la vista superior, eh, voy a tratar de hacer nuevamente 5, ok, detengo, y voy a tratar, voy a volver a hacer 5,..., detengo, ok, ahora voy a intentar abrir la mano, para eso tengo que cambiar de dirección, trato de hacer 3, y ahora tengo que hacer 6, para poder abrir la mano, eh, entonces, voy a intentarlo, y lo detengo porque me tomó 5, voy a intentar nuevamente abrir la mano, me tomó 7, lo detengo, nuevamente intento abrir la mano, lo logré, lo detengo, y voy a intentar bajar el brazo, ah..no, ah..si, tengo que cambiar, la dirección, se me activó el 6, eh...para cambiar de dirección tengo que darle el 3, y tengo que darle el 7 para bajar el codo, lo detengo, y..., tengo que acercarme un poquito más, ¿verdad?

--Sí—

Lo voy a cambiar de dirección,..., y voy a tratar de llegar a él, el dos se me activó sin querer, con el hombro 1, un segundito, lo detengo, cambio de dirección, voy a..., listo.

--Listo—

Episodios	N°	Transcripción de la proposición
Capturar cubo rojo. Intento 1.	P1	Muevo el codo hacia arriba. Hasta alcanzar altura del cubo rojo en la vista lateral.
	P2	Ahora en la altura me desplazo a la derecha.
	P3	Cambio de giro. Muevo hombro 2. Se desplaza a la derecha.
	P4	Miro la vista superior. Hago nuevamente 5.
	P5	Lo detengo. Trato de hacer 5 nuevamente.
	P6	Me detengo. Intento abrir la mano. Cambio de dirección, hago 6.
	P7	Lo detengo, pues tomé 5.
	P8	Intento abrir la mano, lo detengo. Tomé 7.
	P9	Abro la mano. Lo detengo.
	P10	Intento bajar el brazo. Cambio dirección. Me tomó el 6.
	P11	Hago el 3, luego 7 para bajar el codo. Lo detengo.
	P12	Debo acercarme más, ¿verdad?
	P13	Se activó el 2 sin querer. Hombro 1. Cambio de dirección. Listo.

Tabla 68. *Proposiciones del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo*

Fuente: Creación propia

Episodios	N°	Inferencias del protocolo
Capturar cubo rojo. Intento 1.	I1	Levanta el codo.
	I2	Gira hombro 2 hacia afuera.
	I3	Invierte sentido de giro. Gira hombro 2 hacia afuera.
	I4	Observa vista superior.
	I5	Se detiene. Gira el hombro 2 hacia afuera.
	I6	Se detiene. Abre mano. Invierte sentido de giro. Levanta codo.
	I7	Se equivoca. Se detiene.
	I8	Se equivoca.
	I9	Abre la mano. Se detiene.
	I10	Se equivoca.
	I11	Invierte sentido de giro. Baja el codo. Se detiene.
	I12	No reconoce si cumplió la tarea.
	I13	Se equivoca. Levanta hombro 1. Invierte sentido de giro.

Tabla 69. *Inferencias del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.*

Fuente: Creación propia

Episodios	Transcripción de la codificación
Capturar cubo rojo. Intento 1.	S(Co)
	M(H2,Ad)
	Inv(DiG), M(H1,Ad)
	Vi(3)
	D(), M(H2,Af)
	D(),A(Ma), Inv(DiG), S(Co)
	D()
	Ve()
	A(Ma), D()
	Ve()
	Inv(DiG), B(Co), D()
	Ve()
	Ve(), S(H1), Inv(DiG)

Tabla 70. Codificación del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 1: Capturar cubo rojo.

Fuente: Creación propia

Fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo

Voy a intentar subir el hombro 2, perdón el hombro 1,..., lo detengo, voy a subir el codo, lo voy a detener, voy a darle dirección, eh.., 3, para cambiarle de dirección, tomó otro, lo detengo, listo 3, ahora voy a tratar de desplazarlo a la derecha con el 5, nuevamente voy a tratar de hacer el 5, espero que esto funcione cerca al cubo rojo,..., lo detengo, y ahora voy a intentar abrir la mano, y... lo detengo.

--Listo--

Episodios	N°	Transcripción de la proposición
Capturar cubo rojo. Intento 2.	P1	Intento subir hombro 1.
	P2	Lo detengo. Subo el codo.
	P3	Lo detengo. Le doy dirección. Tomó otro.
	P4	Lo detengo. Listo 3.
	P5	Me desplazo a la derecha. Nuevamente lo trato.
	P6	Espero que funcione cerca al cubo rojo. Lo detengo.
	P7	Ahora intento abrir la mano. Lo detengo. Listo.

Tabla 71. Proposiciones del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.

Fuente: Creación propia

Episodios	N°	Inferencias del protocolo
Capturar cubo rojo. Intento 2.	I1	Levanta hombro 1.
	I2	Se detiene. Levanta el codo.
	I3	Se detiene. Se equivoca.
	I4	Se detiene.
	I5	Gira hombro 2 hacia afuera.
	I6	Se detiene.
	I7	Abre la mano. Se detiene.

Tabla 72. Inferencias del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo

Fuente: Creación propia

Episodios	Transcripción de la codificación
Capturar cubo rojo. Intento 2.	S(H1)
	D(), S(Co)
	D(), Ve()
	D()
	M(H2,Af)
	D()
	A(Ma), D()

Tabla 73. Codificación del protocolo del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva para la fase 3 Intento 2: Capturar cubo rojo.

Fuente: Creación propia

Fase 3 Sujeto 2				
Tarea	Comandos	Dirección	Distancia al objeto (L-C-Mc-Meta)	Estrategias Inferida
1A	0	--	L	El sujeto observa las vistas y menciona lo que va a hacer antes de ejecutar, luego levanta el hombro 1 hasta que la altura de este coincida por la altura del cubo verde desde la vista lateral, luego rota el hombro 2 hacia adentro, orientando el brazo hacia
	4	→	L	
	2	--	L	
	7	→	L	
	4	→	C	

	2	--	C	el cubo verde, hasta que la posición de la pinza coincida con la del cubo.
	6	→	L	
	2	--	L	
	4	→	L	
	3	--	L	
	5	→	L	
	2	--	L	
	3	--	L	
	2	--	L	
	5	→	L	
	3	--	L	
	2	--	L	
	6	←	L	
	3	--	L	
	5	←	C	
	3	--	C	
	4	←	Meta	
1B	0	--	L	
	7	→	L	
	2	--	C	
	6	→	C	
	2	--	C	
	5	←	Meta	
2A	2	--	Meta	El sujeto sube ligeramente el hombro 1, posteriormente sube el codo hasta observar que la posición de la pinza coincide con la del cubo rojo desde la vista lateral, cuando se equivoca, el sujeto tiende a llevar el brazo a la posición en la que estaba antes del error, luego rota el hombro dos hacia afuera hasta que el borde de la posición de la pinza coincide con la cara izquierda del cubo. Finalmente abra la pinza.
	0	--	L	
	7	→	C	
	2	--	C	
	3	--	C	
	2	--	C	
	5	→	C	
	2	--	C	
	5	→	C	
	2	--	C	
	5	→	C	
	2	--	C	
	3	--	C	
	5	→	C	
2	--	C		
7	→	C		

	2	--	C	
	6	→	C	
	2	--	C	
	6	→	C	
	2	--	C	
	3	--	C	
	7	←	C	
	2	--	C	
	3	--	C	
	7	→	C	
	2	--	C	
	6	→	C	
	2	--	C	
	4	→	C	
	2	--	C	
	3	--	C	
	4	→	C	
	2	--	C	
	7	←	Meta	
	3	--	Meta	
2B	0	--	L	El sujeto sube el hombro 1 levemente, luego sube el codo hasta que la posición de la pinza coincida con la del cubo rojo en la vista lateral, después rota el hombro 2 hacia afuera orientando el brazo en dirección al cubo, cuando la posición de la pinza coincide con la cara izquierda (visto de atrás) del cubo, detiene el hombro 2 y abre la pinza.
	3	→	L	
	2	--	L	
	3	--	L	
	4	→	L	
	2	--	L	
	7	→	C	
	2	--	C	
	4	→	C	
	2	--	C	
	4	→	C	
	3	--	C	
	6	←	C	
	2	--	C	
	4	→	C	
	2	--	C	
	5	→	Mc	
6	←	Mc		
3	--	Mc		

	2	--	Mc
	6	→	Meta

Tabla 74. Caracterización de comandos y estrategias empleadas durante el desarrollo de tareas de posicionamiento y orientación de un exoesqueleto virtual del sujeto 2 entrenado en un ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva.

Fuente: Creación propia

Las estrategias reconocidas desde el análisis de los protocolos verbales en los sujetos que pertenecían al grupo con bio-retroalimentación auditiva fueron:

Sujeto 1:

1. El sujeto observa detenidamente las vistas de las que dispone para ubicarse espacialmente, luego determina que acciones va a seguir, para posicionar y orientar adecuadamente las articulaciones del exoesqueleto respecto de la ubicación de los cubos.
2. El sujeto busca orientar el brazo desde la posición inicial de forma que desde la vista de proyección, la dirección del brazo interseque al cubo, para posteriormente darle elevación a este y hacer que coincida la articulación más distante del cuerpo con el cubo, esto observado desde la vista de atrás.
3. El sujeto redefine la trayectoria que debe seguir para lograr la tarea, de forma que esta sea la más efectiva desde las condiciones bajo las cuales se encuentra luego de haber cometido un error

Sujeto 2:

1. El sujeto observa detenidamente las vistas de las que dispone para ubicarse espacialmente, luego determina que acciones va a seguir, para posicionar y orientar adecuadamente las articulaciones del exoesqueleto respecto de la ubicación de los cubos.
2. El sujeto propende por igualar la posición de la articulación más alejada del cuerpo con la del cubo de referencia desde la vista lateral para posteriormente reorientar el brazo hacia el cubo desde las perspectivas de otras vistas como la superior, hasta verificar espacialmente la coincidencia posicional entre el cubo y la articulación que puede coincidir con él.

3. El sujeto muestra una tendencia a regresar a la posición que conservaban las articulaciones antes de cometer un error, para posteriormente continuar orientando el exoesqueleto como la había definido inicialmente.

7.3.1 Comparación resultados experimentación con bio-retroalimentación visual y resultados experimentación con bio-retroalimentación auditiva

A continuación se presentan los resultados obtenidos en las dos experimentaciones aplicadas con bio-retroalimentación visual y auditiva en cada una de las fases de la intervención:

Fase 1 – Etapa 1. En la tabla 75 se muestra en la primera columna el número determinado de parpadeos seguidos (2, 3, 4, 5, 6 y 7). En la segunda columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2 de la experimentación con bio-retroalimentación visual. En la última columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2 de la experimentación con bio-retroalimentación auditiva. En los datos obtenidos se puede evidenciar que en los dos ambientes de aprendizaje se obtuvo un promedio de eficacia de 93,33 con una desviación estándar de 4,082. La actividad que contempla 2 parpadeos tuvo en los dos grupos una eficacia de 100.

	BF visual	BF auditiva
Nº Parpadeos	Eficacia Promedio, Sujetos 1 y 2 (%)	Eficacia Promedio, Sujetos 1 y 2 (%)
2	100	100
3	90	90
4	95	95
5	95	90
6	90	90
7	90	95
Media	93,33	93,33
Desviación Estándar	4,082	4,082

Tabla 75. Promedio de los resultados obtenidos por los sujetos en los ambientes de aprendizaje con bio-retroalimentación visual y auditiva en la Fase 1 Etapa 1.

Fuente: Creación propia.

Fase 1 – Etapa 2. En la tabla 76 se muestra en la primera columna el número determinado de parpadeos seguidos (2, 3, 4, 5, 6 y 7). En la segunda columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2 de la experimentación con bio-retroalimentación visual. En la última columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2 de la experimentación con bio-retroalimentación auditiva. En los datos obtenidos se puede evidenciar que el promedio de eficacia del ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva es mayor con un valor promedio de 90 y una desviación estándar de 5,477. En el caso del ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual su valor promedio de eficacia es 85,83 con una desviación estándar de 3,764.

	BF visual	BF auditiva
Nº Parpadeos	Eficacia Promedio, Sujetos 1 y 2 (%)	Eficacia Promedio, Sujetos 1 y 2 (%)
2	85	90
3	85	90
4	80	85
5	90	100
6	85	85
7	90	90
Media	85,83	90
Desviación Estándar	3,764	5,477

Tabla 76. Promedio de los resultados obtenidos por los sujetos en los ambientes de aprendizaje con bio-retroalimentación visual y auditiva en la Fase 1 Etapa 2.

Fuente: Creación propia.

Fase 2 – Etapa 2. En la tabla 77 se muestra en la primera columna la tarea asignada. En la segunda columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2 de la experimentación con bio-retroalimentación visual. En la última columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2 de la experimentación con bio-retroalimentación

auditiva. En los datos obtenidos se puede evidenciar que el promedio de eficacia del ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual es mayor con un valor promedio de 95 y una desviación estándar de 7,071. En el caso del ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva su valor promedio de eficacia es 80 con una desviación estándar de 0.

	BF visual	BF auditiva
Tarea	Eficacia Promedio, Sujetos 1 y 2 (%)	Eficacia Promedio, Sujetos 1 y 2 (%)
1	90	80
2	100	80
Media	95,00	80
Desviación Estándar	7,071	0

Tabla 77. Promedio de los resultados obtenidos por los sujetos en los ambientes de aprendizaje con bio-retroalimentación visual y auditiva en la Fase 2 Etapa 2.

Fuente: Creación propia.

Fase 2 – Etapa 3. En la tabla 78 se muestra en la primera columna la tarea asignada. En la segunda columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2 de la experimentación con bio-retroalimentación visual. En la última columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2 de la experimentación con bio-retroalimentación auditiva. En los datos obtenidos se puede evidenciar que el promedio de eficacia del ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual es mayor con un valor promedio de 90 y una desviación estándar de 0. En el caso del ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva su valor promedio de eficacia es 85 con una desviación estándar de 7,071.

	BF visual	BF auditiva
Tarea	Eficacia Promedio, Sujetos 1 y 2 (%)	Eficacia Promedio, Sujetos 1 y 2 (%)
1	90	90

2	90	80
Media	90,00	85
Desviación Estándar	0,000	7,071

Tabla 78. Promedio de los resultados obtenidos por los sujetos en los ambientes de aprendizaje con bio-retroalimentación visual y auditiva en la Fase 2 Etapa 3.

Fuente: Creación propia.

Fase 2 – Etapa 4. En la tabla 79 se muestra en la primera columna la tarea asignada. En la segunda columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2 de la experimentación con bio-retroalimentación visual. En la última columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2 de la experimentación con bio-retroalimentación auditiva. En los datos obtenidos se puede evidenciar que el promedio de eficacia del ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditivo es mayor con un valor promedio de 90 y una desviación estándar de 14,142. En el caso del ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual su valor promedio de eficacia es 80 con una desviación estándar de 28,284.

	BF visual	BF auditiva
Tarea	Eficacia Promedio, Sujetos 1 y 2 (%)	Eficacia Promedio, Sujetos 1 y 2 (%)
1	100	100
2	60	80
Media	80,00	90
Desviación Estándar	28,284	14,142

Tabla 79. Promedio de los resultados obtenidos por los sujetos en los ambientes de aprendizaje con bio-retroalimentación visual y auditiva en la Fase 2 Etapa 4.

Fuente: Creación propia.

Fase 2 – Etapa 5. En la tabla 80 se muestra en la primera columna la tarea asignada. En la segunda columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2 de la experimentación con bio-retroalimentación visual. En la última columna se puede encontrar la eficacia promedio entre el sujeto 1 y el sujeto 2 de la experimentación con bio-retroalimentación auditiva. En los datos obtenidos se puede evidenciar que el promedio de eficacia del ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditivo es mayor con un valor promedio de 90 y una

desviación estándar de 14,142. En el caso del ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual su valor promedio de eficacia es 85 con una desviación estándar de 7,071.

	BF visual	BF auditiva
Tarea	Eficacia Promedio, Sujetos 1 y 2 (%)	Eficacia Promedio, Sujetos 1 y 2 (%)
1	90	80
2	80	100
Media	85,00	90
Desviación Estándar	7,071	14,142

Tabla 80. Promedio de los resultados obtenidos por los sujetos en los ambientes de aprendizaje con bio-retroalimentación visual y auditiva en la Fase 2 Etapa 5.

Fuente: Creación propia.

Fase 3 – Etapa 1 y 2. En la tabla 81 se muestra en la primera columna la etapa de la fase. En la segunda columna están el intento 1 y 2 ya que cada etapa debía realizarse 2 veces. En la tercera columna se presenta la media de comandos usados por los dos sujetos en la resolución de cada tarea con bio-retroalimentación visual. En la cuarta columna se puede encontrar el tiempo promedio empleado para realizar cada tarea con bio-retroalimentación visual entre el sujeto 1 y el sujeto 2. En la quinta columna se presenta la media de comandos usados por los 2 sujetos en la resolución de cada tarea con bio-retroalimentación auditiva. En la última columna se puede encontrar el tiempo promedio empleado para realizar cada tarea con bio-retroalimentación auditiva entre el sujeto 1 y el sujeto 2.

En los datos obtenidos se puede evidenciar que para la etapa 1 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual los sujetos emplearon en promedio 28,25 comandos para completar la tarea con una desviación estándar de 10,96 en un tiempo promedio de 250,25 s con una desviación estándar de 53,39. Para el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva los sujetos emplearon en promedio 17,75 comandos para completar la tarea con una desviación estándar de 1,06 en un tiempo promedio de 178,5 s con una desviación estándar de 34,65.

Para la etapa 2 en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual los sujetos emplearon en promedio 23 comandos para completar la tarea con una desviación estándar de 1,41 en un tiempo promedio de 210,5 s con una desviación estándar de 19,09. Para el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva los sujetos emplearon en promedio 23,5 comandos para completar la tarea con una desviación estándar de 7,78 en un tiempo promedio de 312,75 s con una desviación estándar de 192,69.

Tarea	Intento	BF visual		BF auditiva	
		Nº promedio de comandos	Tiempo promedio	Nº Promedio de Comandos	Tiempo Promedio
Etapa 1	1	36	288	17	203
	2	20,5	212,5	18,5	154
Media		28,25	250,25	17,75	178,5
Desviación Estándar		10,96	53,39	1,06	34,65
Etapa 2	1	24	224	29	449
	2	22	197	18	176,5
Media		23	210,5	23,5	312,75
Desviación Estándar		1,41	19,09	7,78	192,69

Tabla 81. Promedio de los resultados obtenidos por los sujetos en los ambientes de aprendizaje con bio-retroalimentación visual y auditiva en la Fase 3 Etapa 1 y 2.

Fuente: Creación propia.

Fase 4. En la tabla 82 se muestra en la primera columna el número de la tarea a realizar. En la segunda columna se encuentra el promedio de comandos usados por los dos sujetos que fueron entrenados con bio-retroalimentación visual. En la tercera columna se presenta el promedio del tiempo empleado en realizar una tarea por los dos sujetos que fueron entrenados con bio-retroalimentación visual. En la cuarta columna se presenta la eficacia promedio de los dos sujetos entrenados con bio-retroalimentación visual. En la quinta columna se encuentra la eficiencia promedio de los dos sujetos entrenados con bio-retroalimentación visual. En la sexta columna se encuentra el promedio de comandos usados por los dos sujetos que fueron entrenados con bio-retroalimentación auditiva. En la séptima columna se presenta el promedio del tiempo empleado en realizar una tarea por los dos sujetos que fueron entrenados con bio-retroalimentación auditiva. En la octava columna se presenta la eficacia promedio de los dos sujetos entrenados con bio-

retroalimentación auditiva. En la última columna se encuentra la eficiencia promedio de los dos sujetos entrenados con bio-retroalimentación auditiva.

En los datos obtenidos se puede evidenciar que en el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual los sujetos emplearon en promedio 5,417 comandos para completar las 6 tareas de la fase de evaluación con una desviación estándar de 3,813; en un tiempo promedio de 55,333 s con una desviación estándar de 34,455; una eficacia promedio de 79,167 con una desviación estándar de 40,052 y una eficiencia promedio de 2,435 con una desviación estándar de 1,610.

Para el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva los sujetos emplearon en promedio 5,917 comandos para completar las 6 tareas de la fase de evaluación con una desviación estándar de 5,945; en un tiempo promedio de 77,917 s con una desviación estándar de 77,844; una eficacia promedio de 91,667 con una desviación estándar de 20,412 y una eficiencia promedio de 2,276 con una desviación estándar de 1,121.

En el ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación visual las tareas que tuvieron una eficacia menor a 80 fueron la número 3 con eficacia de 0 y la número 4 con eficacia de 75, en el caso del ambiente de aprendizaje con bio-retroalimentación auditiva la tarea que tuvo eficacia menor a 80 fue la número 3 con eficacia de 50.

Tarea	BF visual				BF auditiva			
	Promedio Nº de Comandos	Tiempo Promedio (s)	Eficacia Promedio	Eficiencia Promedio	Promedio Nº de Comandos	Tiempo Promedio (s)	Eficacia Promedio	Eficiencia Promedio
1	4,5	51	100	1,973	3	46	100	2,260
2	2	24	100	4,196	3	37	100	2,705
3	12	113,5	0	0,318	18	233,5	50	0,495
4	7,5	75	75	1,435	4,5	77,5	100	1,509
5	2	22,5	100	4,464	3,5	39	100	3,166
6	4,5	46	100	2,225	3,5	34,5	100	3,520
Media	5,417	55,333	79,167	2,435	5,917	77,917	91,667	2,276
Desviación Estándar	3,813	34,455	40,052	1,610	5,945	77,844	20,412	1,121

Tabla 82. Promedio de los resultados obtenidos por los sujetos en los ambientes de aprendizaje con bio-retroalimentación visual y auditiva en la Fase 4.

Fuente: Creación propia.

En la tabla 83 se muestra en la primera columna las estrategias identificadas a partir del análisis de protocolos verbales empleadas por los dos sujetos con bio-retroalimentación visual durante el desarrollo de tareas de posicionamiento y orientación de un exoesqueleto virtual. En la segunda columna se presentan las estrategias identificadas a partir del análisis de protocolos verbales empleadas por los dos sujetos con bio-retroalimentación auditiva durante el desarrollo de tareas de posicionamiento y orientación de un exoesqueleto virtual.

Estrategias identificadas en los dos sujetos con Bio-retroalimentación visual	Estrategias identificadas en los dos sujetos con Bio-retroalimentación auditiva
<ol style="list-style-type: none"> 1. El sujeto inicialmente observa las vistas para definir el orden y la dirección de activación de cada articulación que lo llevará a ubicar el exoesqueleto en una posición donde apunte al cubo. Este orden lo define antes de iniciar los movimientos de cada articulación. 2. El sujeto tiende a corregir inmediatamente los errores de activación de las articulaciones. Para corregir estos errores el sujeto cambia la dirección de movimiento y activa la articulación que le permita posicionarse en la ubicación inmediatamente anterior a la ejecución del error. 3. El sujeto primero tiende a orientar el exoesqueleto virtual teniendo en cuenta la altura del cubo que quiere alcanzar, luego lo orienta teniendo en cuenta la posición del cubo en el eje horizontal. Esta estrategia lo lleva a no cambiar ningún comando hasta alcanzar las posiciones estimadas anteriormente. 4. El sujeto orienta el exoesqueleto virtual con respecto a la ubicación de los cubos teniendo en cuenta por lo menos dos de 	<ol style="list-style-type: none"> 1. El sujeto observa detenidamente las vistas de las que dispone para ubicarse espacialmente, luego determina que acciones va a seguir, para posicionar y orientar adecuadamente las articulaciones del exoesqueleto respecto de la ubicación de los cubos. 2. El sujeto muestra una tendencia a regresar a la posición que conservaban las articulaciones antes de cometer un error, para posteriormente continuar orientando el exoesqueleto como la había definido inicialmente. 3. El sujeto propende por igualar la posición de la articulación más alejada del cuerpo con la del cubo de referencia desde la vista lateral para posteriormente reorientar el brazo hacia el cubo desde las perspectivas de otras vistas como la superior, hasta verificar espacialmente la coincidencia posicional entre el cubo y la articulación que puede coincidir con él. 4. El sujeto busca orientar el brazo desde la posición inicial de forma que desde

<p>las cuatro vistas proporcionadas en la interfaz gráfica, además siempre confirma la dirección en la cual se va a mover la articulación y el número de parpadeos registrado por el sistema, lo que le permite realizar la corrección de errores en un tiempo corto.</p> <p>5. El sujeto tiende a buscar la exactitud en la posición del exoesqueleto virtual, aun cuando esto le implique realizar más pasos y posiblemente cometer algunos errores de activación.</p>	<p>la vista de proyección, la dirección del brazo interseque al cubo, para posteriormente darle elevación a este y hacer que coincida la articulación más distante del cuerpo con el cubo, esto observado desde la vista de atrás.</p> <p>5. El sujeto redefine la trayectoria que debe seguir para lograr la tarea, de forma que esta sea la más efectiva desde las condiciones bajo las cuales se encuentra luego de haber cometido un error.</p>
--	---

Tabla 83. Estrategias utilizadas por los sujetos con bio-retroalimentación visual y auditiva durante el desarrollo de tareas de posicionamiento y orientación de un exoesqueleto virtual

Fuente: Creación propia.

8. Discusión y conclusiones

8.1 Discusión

Considerando los resultados presentados en la tabla 75, en el desarrollo de la fase 1 etapa 1 de la intervención, se encuentra que el valor de la eficacia promedio para los dos ambientes de aprendizaje, uno con bio-retroalimentación visual y otro con bio-retroalimentación auditiva es de 93,33% con una desviación estándar de 4,082%, creemos que la igualdad en los resultados obtenidos en los dos ambientes puede estar dada por lo expuesto por Tapia (2015) que indica que los sujetos que están inmersos en los mismos ambientes visuales y ambientales pueden presentar características fisiológicas del parpadeo similares.

En la tabla 76, se observa que para el grupo con retroalimentación auditiva la eficacia promedio fue del 90 en comparación con el de retroalimentación visual que fue de 85,83%. Esto indica que las estrategias de bio-retroalimentación son útiles para la mejora de la autoeficacia y el control interno de los sujetos como lo menciona Nelson (2007). Para estos sujetos en particular se encuentra que la bio-retroalimentación auditiva es aproximadamente 5% más eficiente que la visual.

En la tabla 77 se puede advertir que en la ejecución de la tarea relacionada con la flexión y extensión del hombro 1 el grupo con bio-retroalimentación visual tiene un promedio de eficacia de 95% con una desviación estándar de 7,071. Estos resultados son más altos comparados con el grupo de bio-retroalimentación auditiva, que tiene un promedio de eficacia de 80% con una desviación estándar de 0. Esto puede sugerir que el primer grupo implementó las tareas monitoreando los parpadeos generados, ejerciendo mayor control sobre los movimientos para evitar la realización de pulsos incorrectos, estos resultados concuerdan con lo manifestado por los autores Barandas, Gamboa & Fonseca (2015), ellos expresan que con la bio-retroalimentación visual se puede disminuir significativamente el error medio en la realización de ejercicios al proporcionar información que le indique el momento en el que realiza movimientos correctos e incorrectos, lo cual contribuye a incrementar la autonomía del sujeto.

Según la tabla 78 que refleja los resultados obtenidos para la tarea de aducción-abducción del hombro 2, se aprecia que el grupo con bio-retroalimentación visual mantiene un promedio de eficacia de 90% en comparación con el grupo de bio-retroalimentación auditiva que obtuvo 85%. Sin embargo, en los resultados de esta tarea se evidencia que el desempeño de ambos grupos es más homogéneo en comparación con los resultados obtenidos en la tarea de flexión y extensión del hombro 1. Esto podría implicar una mejora en la forma de realizar los ejercicios indicados desde los dos ambientes lo cual podría redundar en que ambos contribuyan a mejorar la actividad muscular y el rango de movimiento articular en las extremidades superiores, ya que de implementarse físicamente se podrían obtener hallazgos similares a los presentados por Doan-Aslan, Nakipolu-Yüzer, Doan, Karabay, & Özgirgin (2012) donde aplicaron tanto bio-retroalimentación visual como auditiva y encontraron mejoras postratamiento estadísticamente significativas en la escala de Ashworth, Brunnstrom y test de función de la extremidad superior.

Teniendo en cuenta la información presentada en la tabla 79, se puede observar que en la implementación de la tarea flexión y extensión de la mano, el grupo con bio-retroalimentación auditiva presenta un valor promedio de eficacia de 90% con una desviación estándar de 14,142, la cual es mayor comparada con el grupo con bio-retroalimentación visual que obtuvo un promedio de eficacia de 80% con una desviación estándar de 28,284. Estos resultados podrían sugerir que en el caso del experimento con bio-retroalimentación visual la cantidad de elementos en pantalla

contribuyeron a la fatiga y a la generación involuntaria de pulsos de error en la señal electroencefalográfica producto de movimientos oculares muy amplios tal como ocurría en el trabajo de Abd. et al. (2009), en donde se empleaban los parpadeos y los movimientos oculares como señales de control del sistema de iluminación de una casa.

Respecto a los datos contenidos en la tabla 80 se puede mencionar que en relación con la tarea de flexión y extensión del codo, el grupo con bio-retroalimentación auditiva mantiene el promedio de eficacia de 90% con una desviación estándar de 14,142, el cual sigue siendo superior en comparación al promedio de eficacia alcanzado por el grupo con bio-retroalimentación visual que obtuvo un valor promedio de eficacia de 85% con una desviación estándar de 7,071. Esto podría indicar que el efecto del uso continuo de los parpadeos sumado a los movimientos oculares amplios que demandaba el ambiente con bio-retroalimentación visual influyeron en la posible aparición de un mayor nivel de fatiga en los sujetos que estaban bajo la condición de bio-retroalimentación visual comparado con los sujetos bajo la otra condición experimental, lo cual coincidiría con lo mencionado por Tapia (2015) donde la frecuencia de los parpadeos puede verse afectada por factores visuales, ambientales, de fatiga, entre otros.

Considerando los datos obtenidos en las tablas 77, 78, 79 y 80 podemos afirmar que el promedio de eficiencia en la fase 2 está en un rango de 80% a 100%, donde para la bio-retroalimentación visual los promedios de eficiencia obtenidos para cada articulación son: hombro1=95% , hombro2=90%, mano=80%, codo=85%; y para la bio-retroalimentación auditiva son: hombro1=80% , hombro2=85%, mano=90%, codo=90%. Lo cual permitió validar el movimiento de los cuatro grados de libertad del exoesqueleto virtual de miembro superior controlado por señales electroencefalográficas del parpadeo, cumpliendo con el primer objetivo específico trazado en este trabajo.

En la tabla 81 se presenta información obtenida en la fase 3 donde se desarrollan dos tareas con dos repeticiones cada una, la primera tarea está orientada a apuntar a un cubo verde ubicado en el espacio de trabajo y la segunda tarea está orientada a capturar un cubo rojo ubicado en el mismo espacio. De los datos obtenidos, puede observarse que para el grupo con bio-retroalimentación visual la media entre los promedios del número de comandos fue de 28,25 y la media del tiempo

promedio fue de 288s, la cual fue mayor en comparación con el grupo con bio-retroalimentación auditiva donde la media de promedios de numero de comandos fue de 17,75 y la media de tiempos promedios fue de 178,5s en la etapa 1. Lo contrario ocurre en la etapa 2, pues las medias de los promedios del número de comandos y el promedio de tiempo en esta etapa, son mayores en el grupo con bio-retroalimentación auditiva (media de promedios de numero de comandos = 23,5; media de tiempos promedios = 312,75s), en comparación con el grupo con bio-retroalimentación visual (media de promedios de numero de comandos = 23; media de tiempos promedios = 210s). Esto vislumbraría una aparente facilidad para que los sujetos del grupo con bio-retroalimentación auditiva ejecuten mejor las tareas relacionadas con apuntar a un objeto. Y que los sujetos del grupo con bio-retroalimentación visual ejecuten mejor las tareas relacionadas con la captura de objetos lo que requiere de más precisión. Estos resultados podrían indicar que ambos ambientes contribuyen al incremento del autocontrol, lo que según Fernández, et al., (1998) permite que los sujetos modifiquen sus estrategias al ejecutar alguna actividad para llegar a cumplirla de forma exitosa, utilizando la bio-retroalimentación para desarrollar autonomía en los sujetos y llevarlos a que autoevalúen sus procesos haciéndolos responsables de sus propios resultados.

En relación con la tabla 82, esta presenta los datos que surgieron de la fase 4 donde se deben ejecutar 6 tareas concretas, estas son: 1) subir el hombro 1 de 0° a 90° , 2) subir el codo de 0° a 90° , 3) subir el hombro 1 a 90° y luego rotar hacia afuera 90° el hombro 2, 4) bajar el hombro 1 de 0° a -90° , 5) cerrar la mano de 120° a 0° , 6) abrir la mano de 0° a 90° , cada una de estas tareas puede ejecutarse un máximo de dos veces. De los datos recabados puede apreciarse que en general a los sujetos del grupo con retroalimentación auditiva les toma un mayor tiempo ejecutar cada una de las tareas propuestas También se aprecia que en las tareas 1, 4 y 6 los sujetos del grupo con bio-retroalimentación visual requieren de más comandos para ejecutar las tareas comparado con los de bio-retroalimentación auditiva. Además, las tareas 2, 3 y 5 son ejecutadas con un menor número promedio de comandos por los sujetos con bio-retroalimentación auditiva comparado con el otro grupo. También se advirtió que el grupo con bio-retroalimentación auditiva obtuvo un promedio de eficacia de 91,667% con una desviación estándar de 20,412, el cual es superior al alcanzado por el grupo con bio-retroalimentación visual donde su promedio de eficacia es de 79,167% con una desviación estándar de 40,052. Esto último conservaría relación con lo expuesto por Montaña-Murillo et al. (2013) quien al evaluar el funcionamiento de un sistema de bio-retroalimentación

auditiva – vibro – táctil para la rehabilitación neuromotora de extremidades superiores, encontró efectos favorables de la estrategia de retroalimentación sobre la velocidad de usuarios con lesiones de hombro para ejecutar ejercicios, así como el mejoramiento del rango de movilidad de la extremidad afectada.

Los resultados obtenidos en la fase 4, la cual fue diseñada en respuesta al tercer objetivo específico de este trabajo y se compone por ejercicios basados en los numerales A (Items 3 y 4) y C del Test de Fugl-Meyer (Ver Anexo 1) para evaluar la función en la extremidad superior, nos permitieron establecer que el entrenamiento para los sujetos del grupo con el ambiente de bio-retroalimentación visual no fue suficiente para permitirles la correcta ejecución de la tarea 3 y de la tarea 4, ya que la eficacia promedio obtenida fue inferior al 80% para los dos casos. Por otra parte los sujetos del grupo de bio-retroalimentación auditiva no registraron buenos resultados en la tarea 3 pues obtuvieron una eficacia promedio final de 50%.

De las estrategias definidas en la Tabla 83, puede apreciarse que los sujetos entrenados con ambos ambientes cuentan con algunas características comunes frente a las estrategias definidas para alcanzar las tareas definidas en la fase 3 del experimento, pues varios de ellos manifiestan la tendencia a reconocer primero el espacio de trabajo, a través de la observación de las 4 vistas disponibles para posteriormente definir como alcanzar los cubos y luego seguir con la ejecución de la trayectoria definida, se advierte también una similitud entre los sujetos de los dos ambientes frente a la ejecución de las tareas de la etapa 1, pues coinciden en propender por alcanzar la altura del cubo desde la vista lateral para después moverse horizontalmente hasta que la mano y el cubo coincidieran en su posición observada desde la vista de atrás, también se puede definir como punto de convergencia la tendencia de los sujetos a retornar a la posición que conservaban las articulaciones antes de haber cometido un error, verificando continuamente el comando elegido, para realizar las correcciones más rápido. Estas similitudes pueden apreciarse en las estrategias 1 a 3 determinadas en los dos ambientes. Sin embargo, también pueden destacarse distinciones entre las estrategias de ambos ambientes, dado que en el grupo con bio-retroalimentación los sujetos buscaban aproximarse al cubo de la forma más fiel posible, de manera que coincidiera con las expectativas definidas por el sujeto, además estos sujetos propendían por usar al menos dos vistas para orientarse espacialmente y definir los movimientos restantes para finalizar la tarea, por otro

lados los sujetos del ambiente con bio-retroalimentación auditiva, buscan en la ejecución de la tarea de la etapa dos orientar el brazo desde la configuración inicial hasta que la dirección adoptada, coincidiera con la orientación del cubo, en cuyo caso propendían por levantar el brazo hasta alcanzar la altura del cubo en la vista lateral, además algunos de estos al equivocarse decidían modificar la trayectoria que habían definido inicialmente aprovechando la posición en la que se encontraban para alcanzar desde allí el cubo.

La anterior discusión pretendió comparar las características principales en cuanto a eficacia, eficiencia, número de comandos ejecutados, tiempo promedio de ejecución y las estrategias implementadas por los sujetos en el cumplimiento de las tareas de los dos ambientes de aprendizaje motor con bio-retroalimentación visual y auditiva.

8.2 Conclusiones

- Se diseñó un exoesqueleto virtual de miembro superior con cuatro grados de libertad (dos para el hombro, uno para el codo y uno para abrir y cerrar la mano) que se controla por medio de señales electroencefalográficas del parpadeo. El sistema es funcional y sus articulaciones son activadas por un número determinado de parpadeos seguidos: el hombro 1 se activa con 4 parpadeos, el hombro 2 se activa con 5 parpadeos, el codo se activa con 7 parpadeos, la mano se activa con 6 parpadeos, para detener el movimiento de las articulaciones se emplearon 2 parpadeos y para cambiar dirección de desplazamiento se emplearon 3 parpadeos. Además, el promedio de eficacia en actividades que involucran el movimiento específico de cada articulación está en un rango de 80% a 100%. El grupo con bio-retroalimentación visual obtuvo promedios de eficacia para el hombro 1 de 95%, para el hombro 2 de 90%, para la mano de 80% y para el codo de 85%; y el de bio-retroalimentación auditiva obtuvo promedios de eficacia de 80% para el hombro 1, 85% para el hombro 2, 90% para la mano y 90% para el codo.
- Se diseñaron e implementaron dos ambientes de aprendizaje motor de señales electroencefalográficas, uno basado en bio-retroalimentación visual y el otro basado en bio-retroalimentación auditiva; la implementación de cada ambiente se dividió en cuatro fases.

Los ejercicios desarrollados en estas fases tenían como objetivo el control del movimiento de las articulaciones de un exoesqueleto virtual de miembro superior. Los resultados obtenidos en este trabajo en la primera fase, demostraron que para el entrenamiento sin la interfaz con el exoesqueleto virtual, la bio-retroalimentación auditiva es aproximadamente 5% más eficiente que la visual. En la primera etapa de la segunda fase se encontró que para ejercicios específicos de flexión y extensión del hombro 1 el promedio de eficacia del grupo con bio-retroalimentación visual esta 15% por encima del grupo con bio-retroalimentación auditiva. En la etapa 2 de la segunda fase se encontró que para ejercicios específicos de aducción-abducción del hombro 2 el promedio de eficacia del grupo con bio-retroalimentación visual esta 5% por encima del grupo con bio-retroalimentación auditiva. En la tercera etapa de la segunda fase se encontró que para ejercicios específicos de flexión y extensión de la mano el promedio de eficacia del grupo con bio-retroalimentación auditiva esta 10% por encima del grupo con bio-retroalimentación visual. Y en la última etapa de la segunda fase se encontró que para ejercicios específicos de flexión y extensión del codo el promedio de eficacia del grupo con bio-retroalimentación auditiva esta 5% por encima del grupo con bio-retroalimentación visual. En la tercera fase se obtuvieron resultados que permiten afirmar que los sujetos del grupo con bio-retroalimentación auditiva ejecutan mejor las tareas relacionadas con apuntar a un objeto y los sujetos del grupo con bio-retroalimentación visual, ejecutan mejor las tareas relacionadas con la captura de objetos lo que requiere de más precisión.

- A partir de los resultados obtenidos en la fase 4 se evidencia que los sujetos del grupo entrenado con el ambiente de bio-retroalimentación visual no obtiene buenos resultados en la ejecución de la tarea 3 ya que ninguno de los 2 sujetos logro terminar la tarea, obteniendo una eficacia promedio de 0%; en el caso de la tarea 4 tampoco se cumple con el parámetro de aprobación ya que la eficacia promedio fue de 75%. Al grupo con bio-retroalimentación auditiva también se le dificultó el desarrollo de la tarea 3, obteniendo un promedio de eficacia del 50%. Para las otras tareas los dos grupos obtuvieron una eficacia promedio del 100%.

- Frente a las estrategias utilizadas por los sujetos de los ambientes de aprendizaje con bio-retroalimentación visual y auditiva para la ejecución de las tareas de la fase 3, se pudo establecer que se presentan similitudes frente a la tendencia de los sujetos de orientarse espacialmente con la ayuda de las vistas para definir qué acciones tomar y luego ejecutarlas, también en la ejecución de la tareas de la etapa se advierten elementos comunes en tanto que los sujetos se orientan por la vista lateral para alcanzar la altura del cubo y luego desplazarse sobre el plano horizontal hasta cumplir la tarea, otro punto de convergencia se dio en la tendencia de los sujetos a corregir de inmediato los errores llevando al exoesqueleto a la posición inmediatamente anterior al momento en que se cometió la equivocación; por otro lado también se hallaron estrategias disímiles entre ambos grupos, por ejemplo en el grupo con retroalimentación visual los sujetos tendían a ejecutar la tareas con una gran precisión, aun sabiendo que esto les podría significar usar más comandos, de la misma forma los sujetos de este grupo recurrían continuamente a verificar la dirección y la cantidad de parpadeos registrados por el sistema con el ánimo de corregir los errores en el menor tiempo, en el caso de los sujetos con bio-retroalimentación auditiva se observó que uno de ellos tendía a modificar la trayectoria según la posición en la que quedara el exoesqueleto después de cometer una equivocación, descartando con esto tener que regresar a la posición en la que se encontraba el brazo antes de haber caído en el error, estos sujetos también mostraron una tendencia a orientar primero el brazo en la dirección del objeto de referencia para posteriormente elevarlo hasta coincidir con la posición del cubo.

Encontrando con esto que las estrategias de los sujetos que participaron del experimento podían ser disímiles entre participantes del mismo grupo de bio-retroalimentación, pero ser similares a las de los sujetos del otro grupo. De esta manera, podría mencionarse que los ambientes de aprendizaje con retroalimentación tanto auditiva como visual favorecieron la ejecución de diferentes estrategias para la orientación y posicionamiento de las articulaciones de un exoesqueleto virtual, haciendo las veces de potenciador y estimulador, antes que una limitador u obstáculo.

Bibliografía

- Abd, M., Mansor, W. (2009). Detection Of Eye Blinks From EEG Signals For Home Lighting System Activation. Proceeding of the 6th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA09), Sharjah, UAE. DOI: 10.1109/ISMA.2009.5164828
- Belkacem, A., Saetia, S., Zintus-art, K., Shin, D., Kambara, H., Yoshimura, N., Berrached, N., Koike, Y. (2015). Real-Time Control of a Video Game Using Eye Movements and Two Temporal EEG Sensors. Hindawi, Computational Intelligence and Neuroscience. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/653639>.
- Barandas, M., Gamboa, H., & Fonseca, J. M. (2015). A Real Time Biofeedback System Using Visual User Interface for Physical Rehabilitation. *Procedia Manufacturing*, 3(Ahfe), 823–828. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.337>
- Batalla Flores, A. (2000). *Habilidades Motrices*. Barcelona, España: INDE publicaciones.
- Bhattacharyya, S., Khasnobish, A., Ghosh, P., Mazumder, A., & Tibarewala, D. N. (2015). A review on brain imaging techniques for BCI applications. *Biomedical Image Analysis and Mining Techniques for Improved Health Outcomes*, 39.
- Cano de la cuerda, R., Molero, A., Carratalá, M., Alguacil, I., Molina, F., Miangolarra, J. & Cardinali, D.(2007). *Neurociencia aplicada, Sus fundamentos*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Médica Panamericana.
- Carr, J., & Shepherd, R. (2003). Stroke Rehabilitation: Guidelines for Exercise and Training to Optimise Motor Skill. *Australian Journal of Physiotherapy*, 49(4), 279. [https://doi.org/10.1016/S0004-9514\(14\)60149-5](https://doi.org/10.1016/S0004-9514(14)60149-5)
- Casaño, C. (2016). Metodología de la investigación tecnológica en ingeniería. *Revista Ingenium*, 1(1), 43 – 46. <http://dx.doi.org/10.18259/ing.2016007>

- Caudron, S., Guerraz, M., Eusebio, A., Gros, J. P., Azulay, J. P., & Vaugoyeau, M. (2014). Evaluation of a visual biofeedback on the postural control in Parkinson's disease. *Neurophysiologie Clinique*, 44(1), 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2013.10.134>
- Chaturvedi, P., Gupta, L. (2018). Study and Detection of Eye Blink Artifacts in EEG Signals. IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science. DOI: 0.1109/SCEECS.2018.8546907.
- Cordo, P., Wolf, S., Lou, J. S., Bogey, R., Stevenson, M., Hayes, J., & Roth, E. (2013). Treatment of severe hand impairment following stroke by combining assisted movement, muscle vibration, and biofeedback. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, 37(4), 194–203. <https://doi.org/10.1097/NPT.0000000000000023>
- Cox, R. (2008). *Psicología del deporte: Conceptos y sus aplicaciones*. Madrid, España: Editorial Médica Panamericana.
- Curtis Kathleen, A. & DeCelle Newman, K. (2005). *The PTA Handbook: Keys to Success in School and Career for the Physical Therapist Assistant*. Boston: SLACK Incorporated
- Díaz Lucea, J. (1999). *La enseñanza y aprendizaje de las habilidades y destrezas motrices básicas*. Barcelona, España: INDE publicaciones.
- Doan-Aslan, M., Nakipolu-Yüzer, G. F., Doan, A., Karabay, I., & Özgirgin, N. (2012). The effect of electromyographic biofeedback treatment in improving upper extremity functioning of patients with hemiplegic stroke. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, 21(3), 187–192. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2010.06.006>
- Elnady, A. M., Zhang, X., Xiao, Z. G., Yong, X., Randhawa, B. K., Boyd, L., & Menon, C. (2015). A Single-Session Preliminary Evaluation of an Affordable BCI-Controlled Arm Exoskeleton and Motor-Proprioception Platform. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00168>

- Fernández, R., Rodríguez, B., Barcia, M., Souto, S., Chouza, M. y Martínez, S. (1998). Generalidades sobre feedback (o retroalimentación). *Fisioterapia*, 20(91), 3-11.
- Halická, Z., Lobotková, J., Bučková, K., & Hlavačka, F. (2014). Effectiveness of different visual biofeedback signals for human balance improvement. *Gait and Posture*, 39(1), 410–414. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.08.005>
- Hatem, S. M., Saussez, G., della Faille, M., Prist, V., Zhang, X., Dispa, D., & Bleyenheuft, Y. (2016). Rehabilitation of Motor Function after Stroke: A Multiple Systematic Review Focused on Techniques to Stimulate Upper Extremity Recovery. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10(September), 1–22. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00442>
- Heart & Stroke Foundation Canadian Partnership for Stroke Recovery. (2016). *Fugl-Meyer Assessment of Sensorimotor Recovery After Stroke (FMA)*. Recuperado de http://www.stroking.ca/psycho/fma_psycho/
- Hemiweb asociación de hemiparesia infantil. (2015). Hemiparesia y entorno escolar. Recuperado de <http://www.hemiweb.org/web/guias/>
- Hu, X. L., Tong, K. Y., Wei, X. J., Rong, W., Susanto, E. A., & Ho, S. K. (2013). The effects of post-stroke upper-limb training with an electromyography (EMG)-driven hand robot. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 23(5), 1065–1074. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2013.07.007>
- Jaramillo Sierra, L. (1999). Ciencia, tecnología, sociedad y desarrollo. Módulo 1. Series Aprender a investigar.
- Kasper, D., Braunwald, E., Fauci, A., Hauser, S., Longo, D., & Jameson, J. L. (2005). *Harrison's Principles of Internal Medicine 16th Edition*. Western Journal of Medicine. McGraw-Hill Professional. <https://doi.org/10.1036/0071402357>

- Kim, J. H., & Lee, B.-H. (2015). Mirror Therapy Combined With Biofeedback Functional Electrical Stimulation for Motor Recovery of Upper Extremities After Stroke: A Pilot Randomized Controlled Trial. *Occupational Therapy International*, 22(2), 51–60.
<https://doi.org/10.1002/oti.1384>
- León, F., Gutierrez, C., Contreras, V. El marcapasos del parpadeo en un abrir y cerrar de ojos. Recuperado de: <http://revecuatneurol.com/wp-content/uploads/2015/06/El-marcapasos-del-parpadeo-en-un-abrir-y-cerrar-de-ojos.pdf>.
- Lessard, S., Pansodtee, P., Robbins, A., Trombadore, J. M., Kurniawan, S., & Teodorescu, M. (2018). A Soft Exosuit for Flexible Upper-Extremity Rehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(8), 1604–1617.
<https://doi.org/10.1109/TNSRE.2018.2854219>
- López, R., Aguilar, H., Salazar, S., Lozano, R. Y Torres, J. (2014). Modelado y Control de un Exoesqueleto para la Rehabilitación de Extremidad Inferior con dos grados de libertad. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 11, 304-314.
doi:10.1016/j.riai.2014.02.008
- Lozada, J. (2014). Investigación aplicada: Definición, propiedad intelectual e industria. *CienciAmérica: Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica*, 3(1), 47 - 50.
- Luth, T., Ojdanic, D., Friman, O., Prenzel, O. & Graser, A. (2007). Low level control in a semi-autonomous rehabilitation robotic system via a Brain-Computer Interface. *2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Noordwijk, 721-728.
doi: 10.1109/ICORR.2007.4428505
- Maciaszek, J., Borawska, S., & Wojcikiewicz, J. (2014). Influence of posturographic platform biofeedback training on the dynamic balance of adult stroke patients. *Journal of Stroke and*

Cerebrovascular Diseases, 23(6), 1269–1274.

<https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2013.10.029>

Mant, J. & Walker, M. (Eds.). (2011). *ABC of Stroke*. Oxford, UK: Blackwell Publishing.

Micheli, F. & Fernández, P. (2010). *Neurología*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Médica Panamericana.

Minguez, J. (2012). Tecnología de Interfaz Cerebro - Computador. *Departamento de Informatica e Ingeniería de Sistemas Universidad de Zaragoza*, 1–12.

Montaño-Murillo, R., Posada-Gómez, R., Martínez-Sibaja, A., Gonzalez-Sanchez, B. E., Aguilar-Lasserre, A. A., & Cornelio-Martínez, P. (2013). Design and Assessment of a Remote Vibrotactile Biofeedback System for Neuromotor Rehabilitation Using Active Markers. *Procedia Technology*, 7, 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.04.012>

Morris, C. Y Maisto, A. (2005). *Introducción a la psicología*. México: Pearson Educación.

Mudie, M. H., and Matyas, T. A. (1996). Upper extremity retraining following stroke: effects of bilateral practice. *Neurorehabil. Neural Repair* 10, 167–184. doi: 10.1177/154596839601000304

Nam, C. S., Choi, I., & Wadeson, A. (2018). An Emerging Interaction Technology Brain – Computer Interface. In *Brain–Computer Interfaces Handbook. Technological and Theoretical Advances*.

Navarro, M., García, J., Brito, M., Ruiz, J., Navarro, R. & Egea, A. (2001). Principales modelos explicativos del aprendizaje motor. Mecanismos y factores. *XV jornadas canarios de traumatología y cirugía ortopédica*, 15(1), 82-87.

Pons, J. L., Ceres, R., & Calderón, L. (2008). Introduction to wearable robotics. In *Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons*.

- Rihana, S., Damien, P., Moujaess, T. (2013). EEG-Eye Blink Detection System for Brain Computer Interface. *Converging Clinical & Engineering Research on NeuroRehabilitation, BIOSYSROB 1*, pp. 605–609. DOI: 10.1007/978-3-642-34546-3_98.
- Roos, L., Harvey, L. y Lannin, N. (2009). Do people with acquired brain impairment benefit from additional therapy specifically directed at the hand? A randomized controlled trial. *Clinical Rehabilitation, 23* , 492-503. doi:10.1177/0269215508101733
- Sakurada, T., Kawase, T., Takano, K., Komatsu, T., & Kansaku, K. (2013). A BMI-based occupational therapy assist suit: Asynchronous control by SSVEP. *Frontiers in Neuroscience, 7*(7 SEP), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fnins.2013.00172>
- Sanabria, L. (2008). Representación espacial en invidentes estimulados de manera háptica con un dispositivo mecatrónica, DMREI y con el bastón clásico. *Tecné, Episteme y Didaxis*(24).
- Schaechter, J. (2004). Motor rehabilitation and brain plasticity after hemiparetic stroke. *Progress in Neurobiology, 73* , 61-72. doi:10.1016/j.pneurobio.2004.04.001
- Tapia, L. (2015). Valoración de la frecuencia y regularidad del parpadeo en usuarios de tablet, con y sin la incorporación de un filtro de absorbanza selectiva. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Torricelli, D. (2015). Teorías y modelos de control y aprendizaje motor. Aplicaciones clínicas en neurorrehabilitación. *Neurología, 30*(1), 32-41. doi: 10.1016/j.nrl.2011.12.010
- Van Der Logt, R. P., Findling, O., Rust, H., Yaldizli, O., & Allum, J. H. J. (2016). The effect of vibrotactile biofeedback of trunk sway on balance control in multiple sclerosis. *Multiple Sclerosis and Related Disorders, 8*, 58–63. <https://doi.org/10.1016/j.msard.2016.05.003>
- Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G., & Vaughan, T. M. (2002). Brain– computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology, 113*(6), 767–791. [http://doi.org/10.1016/S1388-2457\(02\)00057-3](http://doi.org/10.1016/S1388-2457(02)00057-3)

Xiao, Z. G., Elnady, A. M., Webb, J., & Menon, C. (2014). Towards a brain computer interface driven exoskeleton for upper extremity rehabilitation. *5th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, 432–437.

<https://doi.org/10.1109/BIOROB.2014.6913815>

Zhang, F., Hua, L., Fu, Y., Chen, H., & Wang, S. (2014). Design and development of a hand exoskeleton for rehabilitation of hand injuries. *Mechanism and Machine Theory*, 73, 103–

116. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2013.10.015>

ANEXO 1 VALORACIÓN DE FUGL-MEYER EXTREMIDAD SUPERIOR

PROTOCOLO FMA –ES Traducción de la versión original sueca del FMA, Universidad de Gotemburgo, Suecia
www.neurophys.gu.se/sektioner/klinisk-neurovetenskap/forskning/rehab_med/fugl-meyer

Versión española: Hospital Militar Central, Universidad Nacional de Colombia Barbosa NE, Forero SM, Galeano CP, Hernández ED, Landinez NS

VALORACIÓN DE FUGL-MEYER Identificación: EXTREMIDAD SUPERIOR (FMA-ES) Fecha:

Valoración de la función sensoriomotora Examinador:

Fugl-Meyer AR, Jääskö L, Leyman I, Olsson S, Steglind S. The post-stroke hemiplegic patient. A method for evaluation of physical performance. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine* 1975, 7:13-31.

A. EXTREMIDAD SUPERIOR, posición sedente					
I. Actividad refleja		ning.	puede ser provocada		
Flexores: Bíceps y flexores de los dedos (al menos uno)		0	2		
Extensores: Tríceps		0	2		
Subtotal I (máx. 4)					
II. Movimiento voluntario dentro de sinergias, sin ayuda gravitacional		ning.	parcial	total	
Sinergia flexora: Mano desde rodilla contralateral hasta oído ipsilateral. Desde la sinergia extensora (aducción de hombro/rotación interna, extensión del codo, pronación del antebrazo) hasta la sinergia flexora (abducción del hombro /rotación externa, flexión del codo, supinación del antebrazo).	Hombro	Retracción	0	1	2
		Elevación	0	1	2
		Abducción (90°)	0	1	2
		Rotación externa	0	1	2
	Codo	Flexión	0	1	2
	Antebrazo	Supinación	0	1	2
Sinergia extensora: Mano desde el oído ipsilateral hasta la rodilla contralateral	Hombro	Aducción/rotac. inter	0	1	2
	Codo	Extensión	0	1	2
	Antebrazo	Pronación	0	1	2
Subtotal II (máx. 18)					
III. Movimiento voluntario mezclando sinergias, sin compensación		ning.	parcial	total	
Mano hasta la columna lumbar Mano sobre regazo	No puede realizar, mano en frente a espina iliaca antero- superior		0	1	2
	Mano detrás de espina iliaca antero-superior (sin compensación)				
	Mano hasta la columna lumbar (sin compensación)				
Flexión de hombro 0°-90° Codo a 0° Pronación-supinación 0°	Abducción inmediata o flexión de codo		0	1	2
	Abducción o flexión de codo durante movimiento 90° de flexión, no abducción de hombro ni flexión de codo				
Pronación-supinación Codo a 90° Hombro a 0°	No pronación/supinación, imposible posición inicio		0	1	2
	Pronación/supinación limitada, mantiene posición de inicio				
		Pronación/supinación completa, mantiene posición de inicio			
Subtotal III (máx. 6)					
IV. Movimiento voluntario con poca o ninguna sinergia		ning.	parcial	total	
Abducción de hombro 0°-90° Codo a 0° Antebrazo pronado	Supinación inmediata o flexión de codo		0	1	2
	Supinación o flexión de codo durante movimiento 90° de abducción, mantiene extensión y pronación				
Flexión de hombro 90°-180° Codo a 0° Pronación-supinación 0°	Abducción inmediata o flexión de codo		0	1	2
	Abducción o flexión de codo durante movimiento 90° de flexión, no abducción de hombro ni flexión de codo				

Pronación/supinación Codo a 0°	No pronación/supinación, imposible posición inicio Pronación/supinación limitada, mantiene posición de inicio	0	1	2
Hombro a flexión de 30°-90°	Pronación/supinación completa, mantiene posición de inicio			
Subtotal IV (máx. 6)				
V. Actividad refleja normal evaluada solo si se logra puntaje total de 6 en parte IV				
Bíceps, Tríceps, Flexores de dedos	0 puntos en parte IV o 2 de 3 reflejos marcadamente hiperactivos 1 reflejo marcadamente hiperactivo o al menos 2 reflejos enérgicos Máximo de 1 reflejo enérgico, ninguno hiperactivo	0	1	2
Subtotal V (máx. 2)				
Total A. EXTREMIDAD SUPERIOR (máx. 36)				

B. MUÑECA se puede dar apoyo en el codo para adoptar o mantener la posición, no apoyo en muñeca, verifique rango pasivo de movimiento antes de realizar prueba		ning.	parcial	total
Estabilidad a flexión dorsal de 15° Codo a 90°, antebrazo pronado Hombro a 0°	Flexión dorsal activa menor de 15° 15° de Flexión dorsal, no tolera resistencia Mantiene flexión dorsal contra resistencia	0	1	2
Flexión dorsal/volar repetida Codo a 90°, antebrazo pronado Hombro a 0° leve (flexión de los dedos)	No puede realizar voluntariamente Rango de movimiento activo limitado Rango de movimiento activo completo, fluido	0	1	2
Estabilidad a flexión dorsal de 15° Codo a 0°, antebrazo pronado Leve flexión/abducción de hombro	Flexión dorsal activa menor de 15° 15° de flexión dorsal, sin resistencia Mantiene posición contra resistencia	0	1	2
Flexión dorsal/volar repetida Codo a 0°, antebrazo pronado Leve flexión/abducción de hombro	No puede realizar voluntariamente Rango de movimiento activo limitado Rango de movimiento activo completo, fluido	0	1	2
Circunducción Codo a 90°, antebrazo pronado, hombro a 0°	No puede realizar voluntariamente Movimiento brusco o incompleto Circunducción completa y suave	0	1	2
Total B (máx. 10)				

C. MANO se puede dar apoyo en el codo para mantener flexión de 90°, no apoyo en la muñeca, compare con mano no afectada, los objetos están interpuestos, agarre activo		ning.	parcial	total
Flexión en masa	Desde extensión total activa o pasiva	0	1	2
Extensión en masa	Desde flexión total activa o pasiva	0	1	2
AGARRE				
a. Agarre de gancho flexión en IFP y IFD (dígitos II – V) Extensión en MCF II-V	No puede realizar Puede mantener posición pero débil Mantiene posición contra resistencia	0	1	2
b. Aducción de pulgar 1er CMC, MCF, IFP a 0°, trozo de papel Entre pulgar y 2da articulación MCF	No puede realizar Puede sostener papel pero no contra tirón Puede sostener papel contra tirón	0	1	2
c. Agarre tipo pinza, oposición Pulpejo del pulgar, contra pulpejo del 2do dedo, se tira o hala el lápiz hacia arriba	No puede realizar Puede sostener lápiz pero no contra tirón Puede sostener lápiz contra tirón	0	1	2
d. Agarre cilíndrico Objeto en forma cilíndrica (pequeña lata) Se tira o hala hacia arriba con oposición en dígitos I y II	No puede realizar Puede sostener cilindro pero no contra tirón Puede sostener cilindro contra tirón	0	1	2
e. Agarre esférico Dedos en abducción/flexión,	No puede realizar Puede sostener bola pero no contra tirón	0	1	2

pulgar opuesto, bola de tenis	Puede sostener bola contra tirón			2
Total C (máx. 14)				

D. COORDINACIÓN/VELOCIDAD después de una prueba con ambos brazos, con los ojos vendados, punta del dedo índice desde la rodilla hasta la nariz, 5 veces tan rápido como sea posible		marcado	leve	ninguno
Temblor	Al menos 1 movimiento completo	0	1	2
Dismetría Al menos 1 movimiento completo	Pronunciada o asistemática	0		
	Leve y sistemática		1	
	No dismetría			2
		> 6s	2 - 5s	< 2s
Tiempo Inicio y final con la mano sobre la rodilla	Al menos 6 seg. más lento que el lado no afectado 2-5 seg. más lento que el lado no afectado Menos de 2 segundos de diferencia	0	1	2
Total D (máx. 6)				
Total A-D (máx.6)				

H. SENSACIÓN , extremidad superior con los ojos vendados, comparado con el lado no afectado		anestesia	hipoestesia disestesia	normal
Tacto Suave	Brazo, antebrazo, superficie palmar de mano	0	1	2
		0	1	2
		ausencia menos de ¼ correcto	¾ correcto considerable diferencia	correcto 100% poca o no diferencia
Posición Pequeña alteración en la posición	Hombro	0	1	2
	Codo	0	1	2
	Muñeca	0	1	2
	Pulgar (articulación - IF)	0	1	2
Total H. (máx. 12)				

I. MOVIMIENTO ARTICULAR PASIVO , extremidad superior				J. DOLOR ARTICULAR durante movimiento pasivo, extremidad superior		
Posición sedente, compare con lado no afectado	solo pocos grados (menos de 10° en hombro)	disminuido	normal	dolor constante pronunciado durante o al final del movimiento o dolor muy marcado al final del movimiento	algún dolor	no dolor
Hombro						
Flexión (0°-180°)	0	1	2	0	1	2
Abducción (0°-90°)	0	1	2	0	1	2
Rotación externa	0	1	2	0	1	2
Rotación interna	0	1	2	0	1	2
Codo						
Flexión	0	1	2	0	1	2
Extensión	0	1	2	0	1	2
Antebrazo						
Pronación	0	1	2	0	1	2
Supinación	0	1	2	0	1	2
Muñeca						
Flexión	0	1	2	0	1	2
Extensión	0	1	2	0	1	2
Dedos						
Flexión	0	1	2	0	1	2

Extensión	0	1	2	0	1	2
Total I (máx. 24)				Total J(max. 24)		

A. EXTREMIDAD SUPERIOR	/36
B. MUÑECA	/10
C. MANO	/14
D. COORDINACIÓN/VELOCIDAD	/6
TOTAL A - D (función motora)	/66

H. SENSACION	/12
I. MOVIMIENTO ARTICULAR PASIVO	/24
J. DOLOR ARTICULAR	/24

