

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE INTERFAZ
APOYADA POR TECNOLOGIAS DE INFORMACIÓN PARA AYUDAR A
PACIENTES CUADRIPLÉJICOS O CON ALGÚN GRADO DE INVALIDEZ

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado
en Ciencias Médicas para optar al grado y título de Maestría Académica en Ciencias
Neurológicas

VÍCTOR MANUEL MONGE MENA

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2022

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi madre, que ha apoyado mis estudios y los trabajos a lo largo de mi vida, a mi tutor y lectores la Dra. Paola Vega, Dra. Lizbeth Salazar y Dr. Roberto Cortés por su infinita paciencia, colaboración, asistencia y por sus valiosas recomendaciones, aportes y apoyo, así como a profesores, compañeros de la maestría, a la Facultad de Medicina de la Universidad de Costa Rica, pacientes y amigos, por brindarme la oportunidad de mejorar mi calidad como profesional.

También un agradecimiento muy especial a los doctores: Dr. Miguel Esquivel y Dr. José Moncada, por su apoyo incondicional e invaluable ayuda profesional para poder completar este trabajo de tesis.

Por último, quisiera dedicar este trabajo de tesis a mi mejor amigo el Sr. Adam Cavendish, quien me brindó su amistad y apoyo por más de 30 años, lamentablemente murió debido a una enfermedad neurológica incapacitante terriblemente agresiva: Esclerosis Múltiple bulbar superior e inferior, luchó valientemente por varios meses junto al apoyo de su familia y fue una gran inspiración de lucha contra la adversidad.

Que descanses en paz, mi querido amigo.

Esta Tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Médicas de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Ciencias Neurológicas.

Dr. Eduardo Induni López
**Representante de la Decana
Sistema de Estudios de Posgrado**

Ph.D. Paola Vega Castillo
Directora de Tesis

Ph.D. Lizbeth Salazar Sánchez
Asesora

Ph.D. Roberto Cortés Morales
Asesor

Mag. Jessica González Fernández
**Representante de la Directora del
Programa de Posgrado en Ciencias médicas**

Víctor Manuel Monge Mena
Sustentante

Tabla de contenido

Agradecimientos	ii
Hoja de aprobación	iii
Resumen.....	vi
Abstract.....	viii
Lista de tablas	x
Lista de figuras	xi
Lista de gráficos.....	xii
Lista de abreviaturas	xiii
Capítulo I: Marco teórico	1
1. Traumas neuroquirúrgicos	1
1.1. Trauma craneoencefálico.....	1
1.2. Lesión cerebral	2
1.2.1. Tratamiento	4
1.3. Lesión axonal difusa	9
1.4. Hematoma epidural.....	9
1.5. Hematoma subdural.....	10
1.6. Vasculopatía isquémica (apoplejía).....	11
1.7. Aneurisma intracraneal.....	12
1.8. Malformación arteriovenosa	13
1.9. Hemorragia cerebral.....	15
1.10. Síndrome de enclaustramiento (Locked-In Syndrome o LIS)	19
2. Traumas de médula espinal	22
2.1. Traumas de médula espinal.....	22
2.2. Lesión de la médula espinal	23
2.3. Signos y síntomas	25
2.4. Lesión de nervios periféricos.....	28
3. Tecnologías eye-tracking de asistencia para controlar aplicaciones	30
3.1 Interfaz eye-scanner MODELO TOBII 4C.....	30
3.1. Funcionamiento del eye tracker TOBII.....	39
3.2. Tecnología Arduino para el control de electrodomésticos utilizando el eye-tracking desde el computador	41
4. Estudios en pacientes neurológicos, utilizando rastreadores del movimiento ocular.....	42
4.1. Parálisis cerebral y comunicación con el dispositivo eye gaze	42
4.2. Estudio longitudinal sobre el rendimiento de niños con discapacidades físicas severas que utilizan la tecnología asistida basada en su mirada.	43

4.3. Estudio para el Desarrollo tecnológico para el mejoramiento de la comunicación a distancia entre personas con discapacidad.	44
4.4. La apertura de nuevos mundos para pacientes con discapacidad neurológica	46
Capítulo II. Justificación.....	47
Capítulo III. Propósito	50
a. Objetivo General	50
b. Objetivos Específicos	50
c. Hipótesis estadísticas	50
1. Para la variable tiempo para completar la tarea.....	50
2. Para la variable dificultad para completar la tarea	50
3. Para la variable precisión al completar la tarea	51
Capítulo IV. Metodología.....	52
4.1 Diseño.....	52
4.2 Participantes	52
4.3 Procedimientos	53
4.4 Variables dependientes	56
4.5 Análisis Estadístico	57
Capítulo V. Resultados	58
5. Resultados de los estudios.....	58
5.1 Estudio piloto observacional con la colaboración de dos participantes	58
5.2 Estudio cuasi-experimental con 23 participantes.....	65
Capítulo VI. Discusión.....	72
Capítulo VII. Conclusiones, recomendaciones y limitaciones	75
1. Conclusiones.....	75
2. Recomendaciones	76
3. Limitaciones	77
Capítulo VIII. Referencias.....	78

Resumen

Propósito: Implementar una interfaz digital rastreadora del movimiento ocular a bajo costo y conectado a un computador, para posibilitar o facilitar la comunicación de pacientes con cuadriplejias o algún grado de discapacidad, para el manejo de tareas básicas en un computador, control de dispositivos eléctricos e interacción de los pacientes con el mundo exterior.

Metodología: El presente estudio observacional fue realizado con una muestra de 23 participantes con edades entre 18 y 67 años para observar la adaptación y curva de aprendizaje después de tres intentos para utilizar aplicaciones de Windows y también controlar el encendido y apagado de varios electrodomésticos. Para simular la restricción de estos pacientes cuadripléjicos se les colocó un cuello ortopédico rígido tipo Thomas. De esta manera los participantes se mantenían en una posición fija y para poder utilizar el computador, solamente podían hacer uso del movimiento de sus ojos. Al inicio se les calibró el eye-tracker según su fisionomía, se les instruyó sobre lo básico en la utilización de esta aplicación y se les permitió realizar intentos de práctica, seguidamente se registró su experiencia midiendo el tiempo o velocidad, calificando la precisión y dificultad para crear, confeccionar, enviar y recibir un correo electrónico, utilizar el navegador para buscar un tema de interés y leerlo, realizar una llamada telefónica con el sistema Skype para llamadas y finalmente utilizar la interfase Arduino para controlar el encendido y apagado de electrodomésticos de uso cotidiano, para estas pruebas se utilizó una lámpara, un radio y un ventilador. Se utilizaron pruebas de ANOVA factorial de medidas repetidas (4 tareas x 3 intentos) para estudiar las variables de tiempo para completar la tarea, percepción de dificultad y precisión en el cumplimiento de la tarea. Se realizaron pruebas post hoc de Bonferroni cuando la interacción de la ANOVA fue significativa. Se estableció la significancia estadística en $p < 0.05$.

Resultados: Se encontró una interacción significativa entre las tareas y los intentos en los tiempos promedio ($p < 0.001$, $\eta^2 = 20.5$). Dentro de cada tarea, el tiempo para completar la tarea disminuyó significativamente ($p < 0.05$) del primer al segundo intento, y del segundo al tercer intento. También hubo una reducción significativa del tiempo ($p < 0.05$) entre el primer y tercer intento en cada tarea. La tarea más rápida de completar fue el On/Off Lámpara-ventilador-radio, seguida de Skype, Navegador y el

E-mail ($p < 0.05$). Se encontró una interacción significativa entre las tareas y los intentos en la percepción de dificultad promedio ($p < 0.001$, $\eta^2 = 18.1$). Dentro de cada tarea, la dificultad para completar la tarea disminuyó significativamente ($p < 0.05$) del primer al segundo intento, y del segundo al tercer intento. También hubo una reducción significativa de la dificultad ($p < 0.05$) entre el primer y tercer intento en cada tarea. La tarea con menor dificultad fue el On/Off Lámpara-ventilador-radio, seguida de Skype, Navegador y el E-mail. Al comparar las tareas entre sí, hubo diferencias entre E-mail y Skype ($p = 0.006$), y entre E-mail y On/Off Lámpara-ventilador-radio ($p = 0.006$). No se encontró una interacción significativa entre las tareas y los intentos en la precisión promedio ($p = 0.186$, $\eta^2 = 6.3$). Se encontraron efectos principales significativos para la tarea ($p < 0.001$, $\eta^2 = 36.4$) e intentos ($p < 0.001$, $\eta^2 = 76.2$). Al comparar las tareas entre sí, hubo diferencias entre E-mail y Skype ($p < 0.001$) y entre E-mail y On/Off Lámpara-ventilador-radio ($p = 0.006$). La precisión fue mayor en el tercer intento ($M = 4.90 \pm 0.04$ pts.), luego en el segundo ($M = 4.28 \pm 0.09$ pts.), y finalmente en el primero ($M = 3.63 \pm 0.15$ pts.). El análisis post hoc de Bonferroni indicó que las diferencias promedio entre los tres intentos fueron estadísticamente significativas entre sí ($p < 0.001$).

Conclusión: fue posible probar y demostrar la eficiencia y eficacia del dispositivo de asistencia. Además, de su fácil y práctico manejo. Es de un precio muy accesible para el usuario, sobre todo porque el software está incluido en el mismo Windows y no requiere contratar un programador. Por todas estas ventajas, se recomienda su utilización en instituciones públicas y privadas para brindar a los pacientes cuadripléjicos o con algún grado de restricción motora o verbal, una oportunidad para que puedan desarrollar una mayor autonomía de sus cuidadores y, por ende, mejorar su autoestima al realizar sus propias tareas e incorporarse de nuevo a la sociedad como personas activas y productivas.

Palabras claves: Asistencia tecnológica para pacientes cuadripléjicos, Interfase tecnológica Eyepoint, Medicina y Tecnología para asistencia a pacientes, Arduino e interfaces tecnológicas para pacientes, Dispositivos de rastreamiento del movimiento ocular en Windows para interfases tecnológicas para pacientes.

Abstract

Purpose: To implement a low-cost digital eye movement tracker interface connected to a computer, to enable or facilitate the communication of patients with quadriplegia or some degree of disability, for the management of basic tasks on a computer, control of electrical devices, and interaction of patients with the outside world.

Methodology: The present observational study was carried out with a sample of 23 participants aged between 18 and 67 years to observe the adaptation and learning curve after three attempts to use Windows applications and also control the on and off of various household appliances. To simulate the restriction of these quadriplegic patients, a rigid Thomas-type neck brace was placed. In this way, the participants were kept in a fixed position, and in order to use the computer, they could only make use of the movement of their eyes. In the beginning, the eye-tracker was calibrated according to their physiognomy, they were instructed on the basics of using this application and allowed to make practice attempts, then their experience was recorded by measuring time or speed, rating the precision and difficulty of creating, make, send and receive an email, use the browser to search for a topic of interest and read it, make a phone call with the Skype system for calls and finally use the Arduino interface to control the on and off of everyday appliances, a lamp, a radio, and a fan were used for these tests. Repeated measures factorial ANOVA tests (4 tasks x 3 attempts) were used to study the variables of time to complete the task, perception of difficulty, and precision in task completion. Bonferroni post hoc tests were performed when the ANOVA interaction was significant. Statistical significance was established at $p < 0.05$. **Results:** A significant interaction between the tasks and the attempts was found in the average times ($p < 0.001$, $\eta^2 = 20.5$). Within each task, the time to complete the task decreased significantly ($p < 0.05$) from the first to the second attempt, and from the second to the third attempt. There was also a significant reduction in time ($p < 0.05$) between the first and third attempts on each task. The fastest task to complete was the On/Off Lamp-fan-radio, followed by Skype, Browser, and E-mail ($p < 0.05$). A significant interaction between tasks and attempts was found in the perception of average difficulty ($p < 0.001$, $\eta^2 = 18.1$). Within each task, the difficulty in completing the task decreased significantly ($p < 0.05$) from the first to the second attempt, and from the second to the third attempt. There was also a significant reduction in difficulty ($p < 0.05$) between the first and third

attempts at each task. The task with the least difficulty was the On/Off Lamp-fan-radio, followed by Skype, Navigator, and E-mail. When comparing the tasks with each other, there were differences between E-mail and Skype ($p = 0.006$), and between E-mail and On/Off Lamp-fan-radio ($p = 0.006$). No significant interaction between tasks and attempts was found in mean precision ($p = 0.186$, $\eta^2 = 6.3$). Significant main effects were found for task ($p < 0.001$, $\eta^2 = 36.4$) and attempts ($p < 0.001$, $\eta^2 = 76.2$). When comparing the tasks with each other, there were differences between E-mail and Skype ($p < 0.001$) and between E-mail and On/Off Lamp-fan-radio ($p = 0.006$). The precision was higher in the third attempt ($M = 4.90 \pm 0.04$ pts.), Then in the second ($M = 4.28 \pm 0.09$ pts.), and finally in the first ($M = 3.63 \pm 0.15$ pts.). Bonferroni's post hoc analysis indicated that the average differences between the three attempts were statistically significant from each other ($p < 0.001$).

Conclusion: it was possible to test and demonstrate the efficiency and effectiveness of the assistive device. In addition, it is easy and practical handling. It is very affordable for the user, especially since the software is included in Windows itself and does not require hiring a programmer. Due to all these advantages, its use is recommended in public and private institutions to provide quadriplegic patients or patients with some degree of motor or verbal restriction, an opportunity for them to develop greater autonomy from their caregivers and, therefore, improve their self-esteem by performing their own tasks and rejoining society as active and productive people.

Keywords: Technology Assist for Quadriplegic Patients, Eyepoint Technology Interface, Medicine and Technology for Patient Assist, Arduino and Technology Interfaces for Patients, Eye-tracking and Windows Interfaces Technology for Quadriplegic Patients assist.

Lista de tablas

<u>Tabla 1. Curva de aprendizaje, según las tareas ejecutadas y su evaluación mediante puntaje para el participante 1, en su primer intento.....</u>	<u>58</u>
<u>Tabla 2. Curva de aprendizaje, según las tareas ejecutadas y su evaluación mediante puntaje para el participante 1, en su segundo intento.....</u>	<u>60</u>
<u>Tabla 3. Curva de aprendizaje, según las tareas ejecutadas y su evaluación mediante puntaje para el participante 1, en su tercer intento.</u>	<u>60</u>
<u>Tabla 4. Medición para la curva de aprendizaje, según las tareas ejecutadas y su evaluación mediante puntaje para el participante 2.....</u>	<u>63</u>
<u>Tabla 5. Medición para la curva de aprendizaje, según las tareas ejecutadas y su evaluación mediante puntaje para el participante 2.....</u>	<u>63</u>
<u>Tabla 6. Medición para la curva de aprendizaje, según las tareas ejecutadas y su evaluación mediante puntaje para el participante 2.....</u>	<u>63</u>

Lista de figuras

Figura 1. Escala de Glasgow	4
Figura 2. Cantidad de víctimas en accidente de tránsito ocurridas entre el 2013 y el 2017	7
Figura 3. Egresos hospitalarios debidos a traumatismo intracraneal por año según diagnóstico principal	8
Figura 4. Hematoma subdural en TAC del cerebro sin medio de contraste	11
Figura 5. Egresos hospitalarios debidos a enfermedades cerebrovasculares por año según diagnóstico principal. CCSS	18
Figura 6. Tronco cerebral. Vista anatómica	19
Figura 7. Tronco cerebral: vista fisiológica	20
Figura 8. Localización de los territorios inervados desde la médula espinal (dermatomas y nervios motores)	24
Figura 9. Egresos de pacientes con trauma espinal hospitalizados y diagnosticados con cuadriplejía por año	25
Figura 10. RM lateral del raquis cervical. Compresión de ME a nivel C5-C6	27
Figura 11. Eye-tracking realizando el cálculo vectorizado	31
Figura 12. Barrido del movimiento ocular	32
Figura 13. Tarjeta de alfabeto portable AEIOU	32
Figura 14. Eye-tracking de goggles o gafas con sensores y cámara	33
Figura 15. Monitor Fujitsu con escáner incorporado en su base, cámara y LEDS o diodos emisores de luz para fijar referencias en los ojos	33
Figura 16. Eye-tracker para pilotos de avión. Piloto de la fuerza aérea estadounidense, utilizando un dispositivo eye-tracker para control de aplicaciones.	34
Figura 17. Representación de un piloto del futuro gobernando los controles con tecnología eye-tracking	35
Figura 18. Aplicación del movimiento ocular para seleccionar el objetivo para disparar (pointer en forma de burbuja circular en la pantalla)	35
Figura 19. Eye-tracking marca Eye-Tribe o rastreador de movimiento ocular	36
Figura 20. Eye-Tracking Scanner de rastreo ocular Tobii Eye Tracker portátil modelo 4C.	36
Figura 21. Dispositivos para asistencia tecnológica	38
Figura 22. Teclado virtual desarrollado por Microsoft para utilizar con la interfaz Tobii Eye-Tracking.	39
Figura 23. Explicación paso a paso sobre cómo funciona la tecnología del eye-tracking	40
Figura 24. Tarjeta Interface Aduino Modelo UNO utilizada en esta tesis.	41
Figura 25. Prototipo tecnológico para comunicación a distancia	45
Figura 26. Egresos hospitalarios y porcentajes por bienios según diagnóstico de la CCSS desde el año 1982 hasta el año 2017	48
Figura 27. Interfaz Arduino equipada con módulos de potencia (drivers y relays) para controlar los electrodomésticos: lámpara, radio y ventilador	55

Lista de gráficos

Gráfico 1. Tiempo del participante 1 para ejecutar diferentes tareas en Microsoft Windows 10	60
Gráfico 2. Precisión en la ejecución de las tareas en cada intento del participante 1	60
Gráfico 3. Errores cometidos durante la ejecución de tareas en los tres intentos del participante 1 ..	61
Gráfico 4. Nivel de dificultad en los tres intentos del participante 1	61
Gráfico 5. Comparación de los tiempos en minutos necesarios para ejecutar diferentes tareas en ambiente de Microsoft Windows versión 10 del participante 2	63
Gráfico 6. Comparación de la precisión en la ejecución de las tareas en los tres intentos del participante 2	63
Gráfico 7. Comparación de errores cometidos durante la ejecución de tareas de los tres intentos del participante 2	64
Gráfico 8. Comparación de las dificultades en la realización de las tareas en los tres intentos del participante 2	65
Gráfico 9. Tiempo utilizado para completar la tarea en tres intentos (n=23)	68
Gráfico 10. Tiempo promedio utilizado para completar las tareas (n=23)	68
Gráfico 11. Dificultad percibida para completar la tarea en tres intentos (n=23)	69
Gráfico 12. Dificultad promedio para completar las tareas (n = 23)	70
Gráfico 13. Precisión promedio al completar las tareas (n=23)	71

Lista de abreviaturas

CCSS	Caja Costarricense de Seguro Social
MOPT	Ministerio de Obras Públicas y Transportes
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censo
CENARE	Centro Nacional de Rehabilitación
COSEVI	Consejo de Seguridad Vial
CO ₂	Dióxido de carbono
C1,C2,... C7	Cervical 1, Cervical2,... Cervical 7...(7 Vértebras Cervicales)
T1, T2,...T12	Torácica 1, Torácica 2, ...Torácica12 (12 Vértebras Torácicas)
L1, L2,...L4	Lumbar 1, Lumbar 2,... Lumbar 5 (5 Vértebras Lumbares)
S1, S2,...S5	Sacro 1, Sacra 2,... Sacra 5 (5 Vértebras Sacras)
LCD	Liquid Cristal Display (Pantalla de Cristal líquido)
LCR	Líquido Cefalorraquídeo
LED	Diodo emisor de luz (Light emitter diode)
LIS (SE)	Locked In Syndrome (Síndrome de Enclaustramiento)
MAV	Malformación arteriovenosa
O ₂	Oxígeno
PA	Presión Arterial
PCCR	Reflejo pupilar central de la córnea (Pupil Corneal Center Reflex)
PIC	Presión Intracraneal
PL	Punción Lumbar
PRC	Presión de Reperusión Cerebral
RM	Resonancia Magnética
TAC	Tomografía Axial Computarizada
TC	Tomografía Computarizada
TCE	Trauma cráneo encefálico
UCR	Universidad de Costa Rica
FOUR	(Full Outline of UnResponsiveness) Escala complementaria a la escala de Glasgow para pacientes en coma, con puntaje muy bajo o que no responden.



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Victor Manuel Monge Mena, con cédula de identidad 107390146, en mi condición de autor del TFG titulado PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE INTERFAZ APOYADA POR TECNOLOGIAS DE INFORMACIÓN PARA AYUDAR A PACIENTES CUADRIPLÉJICOS O CON ALGÚN GRADO DE INVALIDEZ

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI ☒ NO * ☐

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

Capítulo I: Marco teórico

1. Traumas neuroquirúrgicos

1.1. Trauma craneoencefálico

1.1.1. Fractura de cráneo

Es muy importante poder valorar este tipo de lesiones, porque las secuelas o consecuencias del trauma podrían ser muy significativas en el desenlace del daño neurológico y necesidades del paciente. Existen varios modos de clasificar estas lesiones:

- a. Fractura está intacta (cerrada) o alterada (abierta o compuesta).
- b. Fractura lineal o irradiada desde un punto central (estelar).
- c. Fragmentación del hueso (conminuta).
- d. Fractura deprimida o no deprimida.

Lo importante de reconocer, diagnosticar y tratar estas fracturas simples de cráneo, es que pueden rasgar vasos sanguíneos como la arteria meníngea media y los senos venosos de la duramadre y podrían causar hematomas epidural o subdural, comprimiendo áreas neurológicamente frágiles del cerebro y producir déficit neurológico temporal o permanente.

Las fracturas de cráneo deprimidas, con frecuencia requieren tratamiento quirúrgico. Si no hay signos neurológicos indeseables y la fractura es cerrada y puede repararse de manera electiva. Se debe revisar y reparar la duramadre si fuera necesario. Las fracturas abiertas del cráneo deben ser intervenidas quirúrgicamente. Las no deprimidas, lineales o estelares, se tratan con cierre simple del cuero cabelludo después de un aseo completo. Algunas de estas fracturas abiertas se atienden en el quirófano, donde es posible desbridarlas ampliamente. Debe observarse la duramadre para comprobar que no se ha pasado por alto una laceración.

Los daños producidos en la duramadre se cierran de manera primaria o con un injerto de parche facial para reducir el riesgo de infección y evitar escape de LCR. Las fracturas de cráneo abiertas, deprimidas se desbridan, elevan y cierran. Las fracturas de la base del cráneo. Se observa en casos de lesiones por trauma alrededor del ojo (signo del mapache) o debajo del oído (signo de Battle) lo cual haría sospechar de una fractura en fosas anteriores o medias, respectivamente. Se manifiestan lesiones neurológicas de pares craneales con salidas en forámenes de la base del cráneo.

El nervio facial es frecuentemente afectado por laceración o tumefacción. Lo cual se puede resolver de forma espontánea sin tratamiento específico. Si existe rinorrea u otorrea concurrente de LCR, debe mantenerse al paciente en observación y monitoreado. Casi siempre estas fugas de LCR se detienen después de una semana. Si no es suficiente para detener este derrame, se puede realizar un drenaje lumbar de LCR, exploración quirúrgica o un parche para sellar el escape por disminución del volumen de LCR y PIC.

1.2.Lesión cerebral

Los accidentes de tránsito en los que los pasajeros del auto, debido a una colisión, la fuerza del impacto y su contragolpe producen un efecto de aceleración y desaceleración muy brusca, el cual se conoce como síndrome del latigazo, conlleva lesiones del cerebro debidas a desaceleración, aceleración o rotación rápidas o una combinación de ellas, acompañadas de un golpe contuso en la cabeza contra la tabla del cráneo. “El impacto inicial puede producir alteración neuronal y axonal, que constituye la lesión primaria. Cualquier complicación subsecuente, como hematoma intracraneal, edema cerebral, hipoxia, hipotensión, hidrocefalia o alteración endocrina, constituye una lesión secundaria que complica la agresión inicial”⁴.

Cuando son lesiones leves o superficiales de la cabeza, no suele haber una lesión primaria cerebral importante y el déficit neurológico se limitan a pérdida temporal de la conciencia (concusión), pero si la lesión de la cabeza es de moderada a grave, puede haber un déficit reversible o no y en las más graves, generalmente se producirán lesiones secundarias.

Debido a los adelantos en tecnologías y medicina en el manejo del TCE (Trauma Cráneo-Encefálico) se han salvado muchas víctimas de accidentes, quienes hace dos o tres décadas habrían muerto por las complicaciones metabólicas, hemodinámicas y otros daños secundarios al trauma. En consecuencia, estos sobrevivientes, muchos niños y adultos jóvenes quedan con una variedad de restricciones e invalidez en sus funciones neurocognitivas, deshabilitándolos para realizar tareas sencillas como encender o apagar las luces de sus hogares, encender o apagar un radio, un televisor, un ventilador, por ejemplo y también de locomoción o tareas que requieren acciones motoras de sus extremidades como podría ser el manejo de un computador, si sus secuelas fueran de cuadriplejía, por ejemplo. Estas personas viven una vida muy limitada y dependiente de sus cuidadores.

En cuanto a la fisiopatología sobre lo que sucede en estos traumas craneoencefálicos, se describe a continuación:

Las fuerzas de distorsión que causan una lesión primaria pueden ser lo bastante considerables para desgarrar capilares intraparenquimatosos, venas subdurales superficiales en puente o arterias y venas epidurales y permitir extravasación de sangre y formación de hematoma. En respuesta a la vasodilatación y alteración de la barrera hematoencefálica ocurre edema cerebral. La isquemia por hipotensión o hipoxia puede producir muerte celular y el consiguiente edema citotóxico. Las alteraciones de la absorción de LCR por contaminación del mismo con sangre suelen originar hidrocefalia. La secreción inadecuada de hormona antidiurética o el desarrollo de diabetes insípida pueden agravar el edema cerebral al alterar el equilibrio de líquidos y electrolitos. Estos cambios, aislados o combinados, pueden aumentar la presión intracraneal (PIC) .

La PIC elevada contribuye a una lesión cerebral secundaria al reducir la presión de riego cerebral (PRC) que se define como la diferencia entre la presión arterial media (PAM) y la presión venosa cerebral o PIC. En consecuencia, si la PIC aumenta y la PAM permanece estable, disminuye la PRC. Cuando esta última es menor de 70 mmHg, se compromete el riego cerebral y produce isquemia del cerebro que complica la lesión cerebral primaria por una agresión secundaria⁴. La PIC o hipertensión intracraneana es uno de los factores más importantes que afectan el resultado final en lesiones neurológicas del cerebro.

El tratamiento debe ser muy agresivo para evitar la reducción del flujo sanguíneo cerebral y una lesión secundaria. La reanimación temprana en la escena del accidente, con control de las vías aéreas e hiperventilación. Si no hay hipotensión, la osmotherapia para reducir el volumen cerebral es recomendada, por ejemplo, con la utilización del fármaco Manitol.

Es esencial una valoración rápida. La escala del coma de Glasgow (Figura 1), se utiliza una calificación numérica para valorar la apertura de los ojos y la conducta verbal y motora, tanto espontánea como en respuesta a un estímulo. Esta escala se utiliza para vigilar el estado neurológico del paciente en el momento de la primera observación clínica y proporciona información valiosa sobre el resultado neurocognitivo y secuelas del paciente. Complementaria a la GSC, y cuando el puntaje es demasiado bajo o el paciente no responde, existe la escala de coma FOUR, conocida por sus siglas en inglés para (Full Outline of UnResponsiveness) score. Esta escala evalúa en cuatro

components al paciente sin respuestas (Ojos, Respuesta Motora, Tallo Cerebral y Respiración). Cada uno tiene un valor máximo de 4 y es muy útil para detectar pacientes en coma o con síndrome de enclaustramiento³⁷.

Con base en el examen neurológico inicial, se puede llegar a la conclusión sobre si será necesario realizar más pruebas diagnósticas, como imágenes radiológicas.

Resulta infrecuente que los pacientes sin cefalea, letargo o un déficit neurológico focal sufran alguna complicación secundaria por su lesión. En estos pacientes asintomáticos no están indicados los estudios de imágenes.

Para pacientes sintomáticos con déficit focal o sin él, debe ser enviado un TAC de la cabeza sin medio de contraste, generalmente para detectar la presencia de sangre. Adicionalmente, como estudio complementario puede ser útil la angiografía carotídea, cerebral o ambas, para identificar una anomalía vascular^{4,36,37,38,43}.

Figura 1. Escala de Glasgow

AREA EVALUADA	PUNTAJE
APERTURA OCULAR	
Espontánea	4
Al Estímulo Verbal	3
Al Dolor	2
No Hay Apertura Ocular	1
MEJOR RESPUESTA MOTORA	
Obedece Ordenes	6
Localiza el Dolor	5
Flexión Normal (Retina)	4
Flexión Anormal (Descorticación)	3
Extensión (Descerebración)	2
No hay Respuesta Motora	1
RESPUESTA VERBAL	
Orientada, Conversa	5
Desorientada, Confusa	4
Palabras Inapropiadas	3
Sonidos Incomprensibles	2
No hay Respuesta verbal	1

Fuente: Harrison. Principios de Medicina Interna, 19e, Dennis Kasper, Anthony Fauci, Stephen Hauser, Dan Longo, J. Larry Jameson, Joseph Loscalzo.^{3,4}

1.2.1. Tratamiento

Lo primero es remover cualquier objeto extraño intracraneano producto del traumatismo, después normalizar la PRC (presión de perfusión cerebral) y prevenir una lesión secundaria del cerebro dañado. Se puede monitorear la presión intracraneal, sobre todo en pacientes con depresión o deterioro notable de la función neurológica y en

los pacientes en coma que requieren cirugía urgente (abdominal, torácica, ortopédica, etc.).

La ventriculostomía para medir PIC también permite drenar LCR y puede disminuir la presión de manera importante. Cuando está colapsado el sistema ventricular y no es factible este procedimiento, se establece vigilancia intraparenquimatosa

Elevar la cabeza en posición neutral facilita el drenaje venoso, la sedación reduce la postura y actividad combativas, las cuales elevan la PIC, la hiperventilación que mantiene la Pa CO₂ alrededor de 35 mmHg reduce el volumen sanguíneo cerebral y la PIC.

La profilaxis de anticonvulsivos previene la lesión cerebral por estas crisis, la deshidratación ligera con reposición prudente de sodio y el tratamiento oportuno del síndrome de secreción inadecuada de hormona antidiurética protegen el cerebro de la lesión secundaria a la sobrecarga de líquido, evitar la hipotensión reduce la extensión de la lesión isquémica, en tanto que el tratamiento agresivo de episodios de hipertensión disminuye el volumen sanguíneo cerebral y altera más la barrera hematoencefálica, el tratamiento de la hipertermia evita un incremento de las demandas metabólicas cerebrales. Es posible que se requiera al mismo tiempo, todos los principios terapéuticos anteriores para lograr la homeostasis óptima del cerebro.

Si la PIC permanece elevada a pesar de estas medidas, pueden utilizarse Manitol (0.5 a 1.0 g/kg IV) y Furosemida (1.0 mg/ kg) para reducir el edema cerebral. Quizá sea útil la sedación profunda con narcóticos y el uso de fármacos paralizantes, como pancuronio. El coma por barbituratos, en alguna época popular en aumentos de la PIC, médicamente resistentes por otra parte, no cambia de manera importante el resultado final y, en consecuencia, rara vez se utiliza. Los corticosteroides, si bien se emplean en ocasiones, no tienen un beneficio comprobado en lesiones cerebrales graves ⁴.

El resultado final en una lesión de la cabeza depende de muchos factores, la edad creciente y las enfermedades preexistentes contribuyen a un mal pronóstico. Las lesiones penetrantes, en particular las heridas por arma de fuego se acompañan de un resultado más malo en comparación con los traumatismos contusos. Una hemorragia intracraneal también implica un resultado subóptimo. El hematoma subdural tiene un pronóstico más malo que el epidural. Una hemorragia subdural e intracerebral combinada tiene el peor pronóstico de todos los subtipos graves de lesiones de la cabeza. Otros factores importantes que influyen en el resultado final comprenden retraso en el tratamiento, traumatismo múltiple y agresiones sistémicas, como acidosis,

hipoxia e hipotensión, los índices de mal pronóstico incluyen pruebas de disfunción del tallo encefálico en el examen inicial e hipertensión intracraneal resistente en el transcurso de los primeros días de la lesión.

Costa Rica es un país pequeño con una población vehicular considerable y esto conlleva a que exista una gran incidencia de accidentes de tránsito, ver la Figura 2 con estadísticas del COSEVI sobre accidentes de tránsito en C.R. entre el año 2013 y el año 2017. Lamentablemente el resultado de estos traumas desenlaza con secuelas neurológicas, también en la Figura 2 se puede observar según los datos gentilmente proporcionados por el Departamento de Estadística de la CCSS, diagnósticos de egresos de pacientes hospitalarios desde los años 1997 a 2013, se ven los números de pacientes que han sufrido estas patologías, según las categorías de trauma, entre las más comunes se tienen las concusiones y traumatismos intracraneales, las concusiones son estados temporales de inconciencia que casi nunca terminan con alguna secuela importante; sin embargo, los traumatismos intracraneales corresponden a una historia completamente diferente en cuanto sus secuelas neurológicas, lo mismo que todos aquellos traumas que involucran hemorragias de algún tipo, intra o extracraneales, estas son de especial cuidado porque dependiendo de su localización, así será la región neurológica afectada, por ejemplo, el área de Broca y el área de Wernicke, encargadas del habla o lenguaje expresado y del reconocimiento del lenguaje respectivamente.

Muchos de estos pacientes habrán sufrido traumas craneoencefálicos y/o traumas de médula espinal que desafortunadamente terminarán con algún déficit neurológico tipo cuadriplejia y/o anartria y que ocuparán rehabilitación o métodos de implementación para realizar tareas cotidianas como controlar electrodomésticos ordinarios en su hogar o el manejo de un computador.

Figura 2. Cantidad de víctimas en accidente de tránsito ocurridas entre el 2013 y el 2017



Nota. Se muestran más de 2400 personas heridas gravemente por cada año. Fuente:

<http://datosabiertos.csv.go.cr/datasets/170789/estadistica-general-costa-rica/>.

En la Figura 3 se observan los diagnósticos principales en egresos hospitalarios sobre traumatismos craneales recopilados por la C.C.S.S. en 15 años.

Figura 3. Egresos hospitalarios debidos a traumatismo intracraneal por año según diagnóstico principal

Egresos hospitalarios debidos a Traumatismo Intracraneal por año según diagnóstico principal. C.C.S.S., 1997-2013

Diagnóstico principal	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Total	2.658	2.314	2.343	2.250	2.117	2.386	2.224	2.041	1.802	1.752	1.882	1.773	1.527	1.529	1.276	1.299	1.101
Concusión	1.569	1.244	1.245	1.252	1.068	1.216	1.075	1.134	1.096	1.019	1.055	863	705	724	590	506	411
Edema cerebral traumático	15	15	13	28	29	35	24	17	20	34	37	16	15	16	14	16	18
Traumatismo cerebral difuso	59	75	92	82	71	75	48	50	43	52	61	63	65	62	49	54	33
Traumatismo cerebral focal	39	28	31	36	35	42	34	24	23	21	15	37	29	19	14	23	10
Hemorragia epidural	70	83	62	64	68	70	77	60	68	61	87	89	85	82	75	89	88
Hemorragia subdural traumática	117	148	152	144	128	144	162	134	140	131	160	170	162	223	162	193	190
Hemorragia subaracnoidea traumática	25	42	43	40	44	56	64	64	60	78	43	56	51	43	46	31	28
Traumatismo intracraneal con coma prolongado	4	6	-	1	4	3	-	2	-	6	1	3	2	3	6	2	-
Otros traumatismos intracraneales	21	23	25	20	32	32	26	26	18	30	49	40	31	34	16	23	12
Traumatismo intracraneal, no especificado	739	650	680	583	638	713	714	530	334	320	374	436	382	323	304	362	311

Fuente: Área de Estadísticas en Salud de la CCSS

1.3. Lesión axonal difusa

Una de las lesiones más graves, con mayor cantidad de daño cerebral y secuelas neurológicas y peor pronóstico de evolución, supervivencia y recuperación es quizás, la lesión de daño axonal difuso. Se trata de lesiones difusas de la sustancia blanca que se acompañan de una alteración anatómica de los axones en la totalidad de ambos hemisferios cerebrales.

Esta lesión primaria por deslizamiento se acompaña de mortalidad alta y morbilidad neurológica importante, resulta de fuerzas de rotación perpendiculares al eje de la sustancia blanca que originan transacción axonal. A pesar de una lesión por deslizamiento grave, el cerebro puede parecer normal a simple vista, pero al microscopio se observan múltiples transecciones axonales en la sustancia blanca en el transcurso de dos semanas de la lesión. Clásicamente, en estudios de TC se encuentran hemorragias pequeñas en el cuerpo calloso y los pedúnculos cerebrales. Más adelante se presenta desmielinización de los haces de fibras que se extiende a la totalidad de los hemisferios cerebrales y el tallo encefálico ^{4,6,7,8}.

1.4. Hematoma epidural

La ruptura de la arteria meníngea media o una de sus ramas produce muy frecuentemente una hemorragia entre la tabla interna del cráneo y la duramadre. Despegando la duramadre de la superficie interna del hueso y produciendo un hematoma que puede provocar una masa de tamaño considerable y comprimir las estructuras cerebrales, produciendo síntomas neurológicos, dependiendo del área comprometida.

Un hematoma epidural puede producirse por senos venosos, óseos rotos en el punto de fractura o laceración de los senos venosos mayores de la duramadre. Como la presión venosa es baja, los hematomas epidurales venosos solo suelen formarse cuando una fractura deprimida del cráneo ha despegado la duramadre del hueso y dejado un espacio en el que puede desarrollarse el hematoma.

Clásicamente, el hematoma epidural es consecutivo a un traumatismo contuso de la cabeza que fractura el cráneo y causa una pérdida breve de la conciencia. Después de que el paciente recupera la conciencia, puede haber un "intervalo lúcido" durante el cual los síntomas o signos son mínimos. La compresión hemisférica ocurre cuando el hematoma crece. Con el tiempo, se fuerza la porción interna del lóbulo temporal sobre el borde de la tienda y origina compresión del nervio motor ocular común y dilatación de la pupila lateral; de igual manera, la compresión del pedúnculo cerebral del mismo lado origina hemiparesia contralateral que puede progresar hasta la postura de descerebración. La presencia de coma,

pupilas fijas dilatadas y descerebración son una tríada clásica que indica herniación transtentorial.

Aunque los hematomas epidurales son lesiones que se curan, la mortalidad aún es alta porque con frecuencia no se reconoce temprano su gravedad. Es posible que el paciente se observe durante el "intervalo lúcido", se dé de alta y más adelante pierda el conocimiento por compresión cerebral progresiva por el hematoma en expansión.

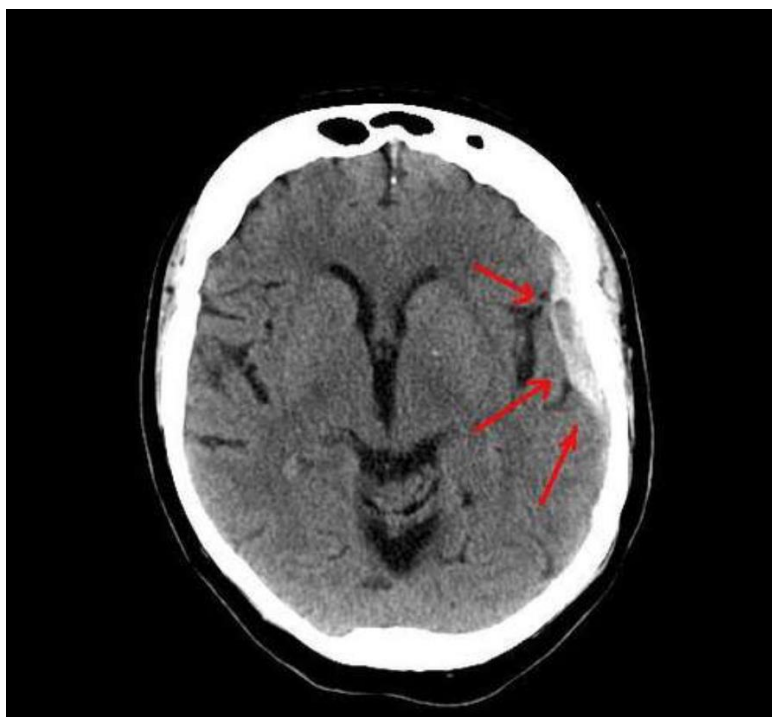
Debido al peligro de un diagnóstico, en toda persona con antecedente de un golpe contuso en la cabeza que origina pérdida temporal del conocimiento debe hacerse un estudio de imágenes como RMN o TAC. Si se encuentra un hematoma epidural, está indicada una craneotomía urgente. Si la TAC es normal y el examen del paciente no muestra algún déficit neurológico puede darse de alta. Es necesario indicar a quien lo acompaña, que lo despierte con frecuencia durante las siguientes 24 h para comprobar que permanece excitable. Cualquier deterioro de la conciencia debe valorarse nuevamente de inmediato ^{4,28}.

1.5. Hematoma subdural

Los hematomas subdurales se desarrollan cuando las venas que conectan la corteza con la duramadre o los senos venosos se desgarran o cuando un hematoma intracerebral se extiende al espacio subdural. Pueden ser grandes, aunque la hemorragia sea de origen venoso (presión baja).

Los hematomas subdurales agudos se relacionan con lesiones graves de la cabeza y se deben a una combinación de desgarro de las venas en puente, alteración de los vasos corticales y laceración de la corteza. El hematoma se observa mejor con un estudio de TC. La evacuación del coágulo puede proporcionar una mejoría importante, pero a menudo permanece un déficit neurológico mayor por la lesión diseminada concurrente del parénquima^{4,29}.

Figura 4. Hematoma subdural en TAC del cerebro sin medio de contraste



Fuente: <https://www.britannica.com/science/subdural-hematoma>

En el TAC del cerebro sin medio de contraste (Figura 4), el hematoma subdural (flechas) ha comprimido el cerebro y desviado la línea media. Los hematomas subdurales subagudos se presentan varios días después de una lesión y se acompañan de letargo, confusión, hemiparesia u otros déficits hemisféricos progresivos. La evacuación del hematoma suele producir una mejoría notable.

Los hematomas subdurales crónicos se deben a desgarros de las venas en puente y con frecuencia después de una lesión menor de la cabeza. Al inicio el hematoma es pequeño, más adelante se encierra en una membrana fibrosa, se licua y a continuación crece de manera gradual. Estas lesiones son más comunes en lactantes y en la edad avanzada. Su presentación típica incluye alteraciones progresivas del estado mental con signos focales o sin ellos (hemiparesia, afasia, etc.). Puede haber papiledema. El diagnóstico se confirma con TC. El tratamiento consiste en drenar el hematoma por trepanación. Quizá se requiera una craneotomía si el líquido se acumula nuevamente^{3,4}.

1.6. Vasculopatía isquémica (apoplejía)

Se puede producir isquemia e infarto subsecuente del cerebro en la distribución de cualquiera de los vasos cerebrales; en consecuencia, puede afectarse cualquier porción de cerebro, tallo cerebral o cerebelo. Como la circulación carotídea proporciona el riesgo mayor

del cerebro, estas afecciones son más comunes en su territorio. La isquemia puede resultar de una disminución del flujo secundaria a estenosis u oclusión de arterias mayores, como por placas ateroscleróticas, por ejemplo, una de las más comunes causas.

Con frecuencia esta enfermedad se desarrolla fuera del cráneo, en el origen de la arteria carótida interna en el cuello, pero puede ocurrir en el sifón carotideo (la porción de este vaso dentro del seno cavernoso), la carótida interna distal o incluso, en la arteria cerebral media proximal.

Los émbolos arteriales suelen originarse en aceleraciones ateroscleróticas en la región de la bifurcación carotidea o quiméricos. Para prevenir la apoplejía se dirigen a eliminar la fuente de émbolos o aumentar el flujo sanguíneo cerebral. Las operaciones para estos trastornos incluyen endarterectomía carotidea y la derivación microvascular. En los posibles candidatos suele hacerse estudios de TC, IRM del cerebro para valorar cualquier grado de infarto cerebral y descartar otros diagnósticos, como tumor, hematoma subdural o hemorragia subaracnoidea. A continuación, se efectúa una angiografía que incluye cayado aórtico, carótida, arterias vertebrales y cerebrales. Los estudios no invasivos de la circulación carotidea son menos precisos, aunque resultan útiles como procedimientos de selección por su riesgo bajo.

La endarterectomía carotidea está indicada cuando existen síntomas laterales de isquemia cerebral o amaurosis fugaz y la angiografía muestra una estenosis importante (por lo general, mayor de 75%) o ulceración en la porción accesible de las arterias carótidas primitiva, interna proximal o ambas. La operación consiste en abrir la porción afectada de la carótida bajo heparinización ístmica y extirpar la placa aterosclerótica. Diversos pacientes presentan isquemia cerebral ipsilateral a una arteria carótida interna ocluida o estenosis de las arterias carótida interna o cerebral media. En estos pacientes con circulación cerebral colateral inadecuada a veces está indicado un procedimiento microvascular de derivación ^{3,44}.

1.7. Aneurisma intracraneal

Los aneurismas intracraneales son dilataciones patológicas de las arterias cerebrales, cuyas paredes consisten en un englobamiento de la capa íntima, la media y la adventicia con un grado variable de trombos intraluminales o murales. Casi todos son de origen congénito y se presentan y desarrollan durante la vida.

Pueden hacerse ateroscleróticos. De manera característica, los aneurismas se encuentran en la bifurcación de vasos mayores del círculo (polígono) de Willis. Hasta en 20% de pacientes con aneurismas son múltiples y en 1% hay una malformación arteriovenosa (MAV)

concurrente. Si los aneurismas se encuentran en una parte más periférica de la vasculatura cerebral, debe considerarse una causa secundaria como traumatismo o infección.

Más de 85% del aneurisma cerebral ocurre en la circulación carotídea o "anterior". Cerca de 30% se origina en la porción intracraneal de la carótida interna, por lo general, en el origen de la arteria comunicante posterior. Otro 30% se presenta en la región de la arteria comunicante anterior. Casi 25% surge en la arteria cerebral media, por lo regular en el sitio de su primera rama mayor, que suele ser una trifurcación.

Los aneurismas de la circulación vertebro basilar o "posterior" son más frecuentes en la punta de la arteria basilar, pero pueden ocurrir en un sitio más proximal a lo largo de su tronco. El siguiente sitio común es el origen de la arteria cerebelosa inferior posterior.

Los pacientes con aneurismas intracraneales suelen presentar signos y síntomas de hemorragia subaracnoidea, 80% de estas últimas no traumáticas se debe a rotura del aneurisma. El paciente nota una cefalea súbita intensa, por lo general, seguida de rigidez del cuello y fotofobia por irritación meníngea originada por la sangre subaracnoidea. Puede haber pérdida temporal de la conciencia. Algunos pacientes tal vez presenten un déficit neurológico focal o coma a causa del aumento agudo de la presión intracraneal. En general, cuanto menor es el grado de la hemorragia subaracnoidea, mejor será el resultado final.

No todos los pacientes con aneurismas presentan síntomas relacionadas con la rotura. Por su efecto de masa, un aneurisma de la arteria carótida interna (ACI) puede comprimir el nervio óptico y causar ceguera monocular o el nervio oculomotor (III) y producir una parálisis que se caracteriza por diplopía, ptosis palpebral y pupilas dilatadas. Es posible que un aneurisma ACI dentro del seno cavernoso comprima el nervio motor ocular extremo (VI) y cause diplopía. Un aneurisma gigante (mayor de 25 mm de diámetro) de la punta basilar puede bloquear el acueducto cerebral y producir hidrocefalia. Rara vez es posible que un aneurisma sea lo bastante grande para confundirse con un tumor.

El diagnóstico de una hemorragia subaracnoidea suele establecerse clínicamente y confirmarse por la presencia de sangre en los espacios subaracnoideos en TC o LCR sanguinolento con xantocromía en una punción lumbar (PL) ^{3,4,44}.

1.8. Malformación arteriovenosa

Las malformaciones arteriovenosas (MAV) se producen en el sistema nervioso central como anómalas congénitas, que permiten que la sangre se desvíe directamente de las arterias a las venas sin pasar por el lecho capilar normal que las conecta.

Estas malformaciones pueden ser muy pequeñas, con el flujo de una sola arteria o abarcar varios lóbulos del cerebro y recibir su aporte arterial de varias fuentes. Se presentan en cualquier parte del cerebro, incluso el cerebelo y tallo encefálico. En el parénquima cerebral donde se localiza la mayoría, la lesión adquiere una forma cónica, con el vértice en la profundidad que a menudo llega hasta el ventrículo lateral. En raras ocasiones, las MAV ocurren en la medula espinal y solo afectan la duramadre, ya sea dentro del cráneo o en el conducto raquídeo.

Los pacientes con MAV tienden a desarrollar síntomas antes de los 30 años de edad. La manifestación inicial más frecuente es la hemorragia (50% de los casos y 10% de todas las hemorragias intracerebrales, solo después de los aneurismas). Por lo general, la hemorragia ocurre dentro del parénquima cerebral, pero puede presentarse dentro del sistema ventricular o en el espacio subaracnoideo. El paciente experimenta cefalea súbita, a menudo con pérdida de la conciencia y deficiencia neurológica. El siguiente síntoma de presentación en orden de frecuencia es una crisis convulsiva. En unos cuantos casos las convulsiones son frecuentes y refractarias al tratamiento médico. Las MAV también pueden presentarse en forma insidiosa, con una deficiencia neurológica focal por el efecto ocupativo, aumento en la presión venosa o fenómeno de secuestro vascular, en ocasiones se descubre que los pacientes jóvenes con cefaleas graves implacables tienen una malformación arteriovenosa.

Desde el momento que se descubre una MAV intacta, el riesgo de hemorragia es cercano a 1% acumulativo por año. Una vez que ocurrió la hemorragia, el riesgo de un episodio recidivante aumenta a 5% por año. Con cada hemorragia, el riesgo de morir se aproxima a 10% y la morbilidad es de 15%, por lo menos. Es más probable que sangren las MAV pequeñas que las grandes. La mayor parte de las MAV conserva un tamaño grande, pero algunas crecen. Hasta 10% tiene un aneurisma vinculado en la arteria de alimentación. En estos casos, la hemorragia casi siempre se debe a la rotura del aneurisma. Es posible identificar una MAV en una TC con medio de contraste como una masa hipertensa, parte de la cual tiene una configuración en serpentina, una presencia de grandes venas de drenaje. Es más fácil delinear su configuración y extensión con la IRM (Imagen de Resonancia Magnética). Después de la hemorragia, una TC sin contraste casi siempre demuestra la presencia de sangre intracerebral o subaracnoidea. Las MAV pueden ser demasiado pequeñas para ser evidentes en la TC, por lo que es necesaria una angiografía cuidadosa para identificar la fuente de la hemorragia. A veces es necesaria la punción lumbar si hay sospecha clínica de hemorragia subaracnoidea, pero no es posible comprobarla en la tomografía computadorizada.

En todos los casos con sospecha o certeza de MAV debe realizarse una angiografía cerebral completa para definir con cuidado la magnitud de la malformación. Es preciso valorar todas las arterias que la alimentan, incluso cualquiera que provenga del sistema de la carótida externa, así como las venas de drenaje. Solo con una angiografía de alta resolución puede tomarse una decisión terapéutica. Si la angiografía no puede delinear la lesión a pesar de la sospecha, la IRM puede identificar la anormalidad oculta para la angiografía.

El tratamiento de estas malformaciones depende del tamaño y localización de la lesión, los síntomas, la edad y condiciones del paciente. Debido al riesgo de nueva hemorragia, una MAV con hemorragia debe extirparse por medios quirúrgicos, si es posible. La decisión terapéutica es más difícil en quienes tienen convulsiones, si el enfermo es joven y la malformación fácilmente accesible, suele recomendarse su resección quirúrgica, en especial cuando las convulsiones son resistentes al tratamiento médico. La operación consiste en disecar y resecar con técnica microquirúrgica la totalidad de la MAV, en lugar de solo ligar las arterias que la alimentan. Los resultados de la cirugía se relacionan con el tamaño y localización de la malformación. En total, la mortalidad quirúrgica es menor de 5% y la morbilidad inferior a 10 %. Los métodos alternativos o adyuvantes de tratamiento incluyen embolización intraarterial y radioterapia ^{3,4,44,45,46}.

1.9. Hemorragia cerebral

Las hemorragias espontáneas generalmente se relacionan con hipertensión sistémica y ocurren en sitios predecibles que incluyen putamen, tálamo, cerebelo y protuberancia. También es posible que ocurran dentro de diversos lóbulos del cerebro. Ya se comentaron las causas no hipertensoras de la hemorragia cerebral, como rotura de una MAV, aneurismas y hemorragia hacia las áreas de isquemia. Otras causas incluyen coágulos inducidas o endógenas, tumores cerebrales primarios o metástasis y trastornos raros como angioplastia amiloidea.

La hipertensión crónica origina lipohialinosis de la pared vascular que establece el medio propicio para oclusión o rotura vascular. La primera causa infarto y la segunda hemorragia intracerebral. Al parecer las más vulnerables son las arterias cortas penetrantes del cerebro. En hemorragias del putamen y el tálamo se afectan los vasos lenticuloestriados y perforantes del tálamo y las ramas basilares afectadas contribuyen a una hemorragia pontina.

Aunque una hemorragia cerebral suele ser devastadora, es posible que se tolere sorprendentemente bien. El hematoma tiende a disecar a lo largo de planos axonales y separar más que destruir estructuras vitales. Si el paciente toleró la masa resultante, la sangre se

reabsorbe con lentitud por macrófagos a lo largo de la periferia y solo deja una hendidura en el cerebro teñida con hemosiderina. Es posible que los enfermos empeoren clínicamente en cualquier momento después de la hemorragia inicial por la formación concurrente de edema.

Las hemorragias en el putamen originan la mayor parte de los hematomas hipertensivos. Su presentación se caracteriza por ausencia de cefalea con desarrollo gradual de hemiparesia que progresa a la hemiplejía. Puede acompañarse de pérdida hemisensorial, afasia, hemianopsia, desviación ipsilateral de los ojos o ambas, según el tamaño del hematoma y la dirección de su disección. Por supuesto, es posible que el enfermo progrese hasta el coma si la lesión es grande. De igual manera, una hemorragia talámica se presenta al inicio con pérdida hemisensorial y hemiparesia. Las características de localización incluyen desviación de los ojos hacia abajo con limitación de la mirada vertical y pupilas pequeñas perezosas por invasión del mesencéfalo cercano. Rara vez hay cefalea.

Las hemorragias cerebelosas se inician de manera súbita y se presentan con cefalea. Las características concurrentes son vómitos, ataxia y mareos. Esta hemorragia es muy peligrosa porque puede causar coma y, por último, la muerte por compresión del tallo encefálico hidrocefalia aguda. La hemorragia del tallo encefálico (por lo general, pontina) es la más devastadora y con frecuencia se presenta con cuadriparesia, postura de descerebración, pupilas puntiformes y coma. La mayoría de los pacientes mueren si el hematoma es mayor de 1 cm y aquellos que sobreviven tienen un grado alto de morbilidad. Es menos probable que una hemorragia lobar se relacione con hipertensión y los pacientes suelen tolerarla mejor. Los síntomas dependen del área cerebral afectada.

El estudio con TC se convirtió en una herramienta invaluable para el diagnóstico y definición de la hemorragia cerebral. La TC no solo delinea la hemorragia, sino que también permite la valoración del tamaño ventricular, la presencia de edema y a menudo la causa de la hemorragia (p. ej., MAV, tumor, aneurisma). Con el tiempo, a medida que la sangre se cataboliza, el coágulo progresa a una lesión hipotensa. Es posible que, en cualquier momento, desde dos a tres semanas, el hematoma muestre un anillo de realce. Si se sospecha una lesión vascular, está indicada una angiografía cuidadosa. En todos los casos deben obtenerse estudios de coagulación apropiados.

El tratamiento de la hemorragia cerebral puede ser médico o quirúrgico, según el tamaño de la lesión, su localización y el estado del paciente. Se recomienda resección quirúrgica si el enfermo se deteriora neurológicamente sin importar el tamaño del hematoma. Es en particular importante eliminar los cerebelosos, ya que, un cambio pequeño en el edema reactivo

circundante puede originar compresión del tallo encefálico que pone en peligro la vida, hidrocefalia o ambos.

Como los hematomas son lesiones en masa, el tratamiento médico se dirige a controlar la presión intracraneal. Si la hemorragia origina pérdida del conocimiento, quizá se requiera hiperventilación y fármacos hiperosmolares para reducir la PIC. La vigilancia de la presión intracraneal puede ser un adyuvante valioso para dirigir el tratamiento y los esteroides para controlar el edema cerebral, si el paciente ha tenido una hemorragia intratumoral y es necesario corregir las coagulopatías. A pesar de la terapéutica médica, quirúrgica o ambas, la mortalidad y morbilidad son raras en todos los tipos de hemorragia cerebral ^{3,44,45}.

En la Figura 5 se observan las estadísticas recopiladas por la CCSS sobre egresos de pacientes relacionados con accidentes vasculares cerebrales, liderando las enfermedades cerebrovasculares de causas hemorrágicas e isquémicas, con un aumento considerable hasta de cinco veces en los 15 años, de esta recopilación de datos.

Figura 5. Ingresos hospitalarios debidos a enfermedades cerebrovasculares por año según diagnóstico principal. CCSS

Diagnóstico principal	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Total	2.018	1.864	1.921	2.042	2.050	2.026	2.154	2.321	2.174	2.172	2.192	2.378	2.501	2.565	2.847	2.920	2.981
Hemorragia Subaracnoidea	100	93	111	112	117	132	129	146	109	119	113	98	124	82	125	127	148
Hemorragia Intraencefalica	245	270	344	354	300	297	351	348	314	333	290	306	321	287	338	319	314
Otra Hemorragia Intracraneal No Traumatismo	127	138	133	157	162	167	155	159	201	184	171	219	232	240	226	222	299
Infarto Cerebral	256	255	287	299	315	298	306	356	329	320	288	371	330	325	323	273	304
Accid. Vascular Encefalico Agudo No Especif. C/Hemorragico/Isquemic	606	493	439	453	500	415	479	440	437	423	378	402	388	332	381	358	273
Oclusion Estenosis Arteria Precerebral S/Infarto Cerebral	22	45	31	21	48	44	29	45	41	66	86	73	56	64	60	74	56
Oclusion Estenosis Arteria Cerebral S/Infarto Cerebral	225	255	215	179	169	144	98	104	101	81	73	59	60	49	54	35	26
Otra Enfermedad Cerebrovascular	356	271	343	436	410	488	560	660	642	646	793	850	990	1.186	1.340	1.512	1.561
Secuela Enfermedad Cerebrovascular	81	44	18	31	29	41	47	63	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Área de Estadísticas en Salud de la CCSS

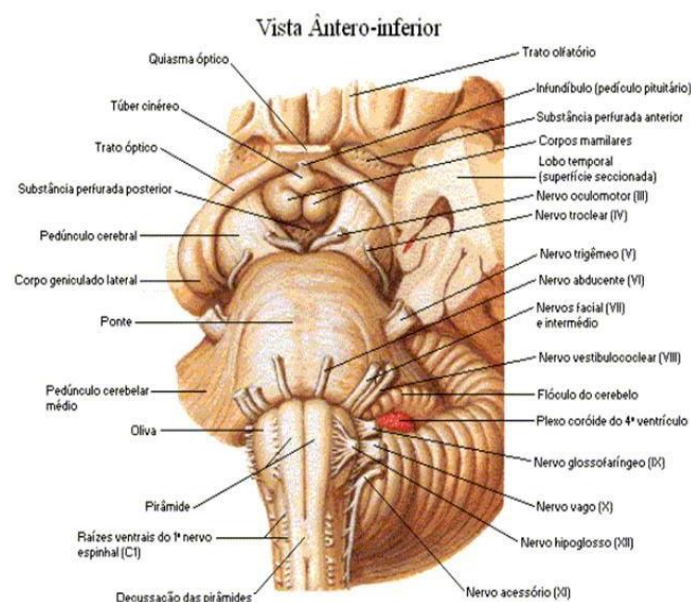
1.10. Síndrome de enclaustramiento (*Locked-In Syndrome o LIS*)

1.10.1. Neuroanatomía

El puente cerebral, protuberancia cerebral o puente de Varolio, mostrado en las imágenes 2 y 3, se encuentra localizado en parte rostral del cerebro posterior con límites bien definidos sobre la cara anterior del tronco encefálico. Presenta bandas anchas de fibras transversales y está separado del mesencéfalo por el surco protuberancial superior y del bulbo por el surco protuberancial inferior. Lateralmente, las fibras transversales forman el pedúnculo cerebeloso medio. La depresión media anterior señala el surco basilar, donde se ubica la arteria basilar. Contiene fascículos descendentes de fibras longitudinales, núcleos protuberanciales. Una porción dorsal más pequeña, denominada calota protuberancial (*tegmentum*) que contiene agrupaciones de células y fibras que forman una parte central denominada formación reticular, tiene continuidad con la formación reticular del mesencéfalo y el bulbo. En esa región se localizan los núcleos de los nervios V (trigémino), VI (abducens), VII (facial) y VIII (vestibulococlear) ¹.

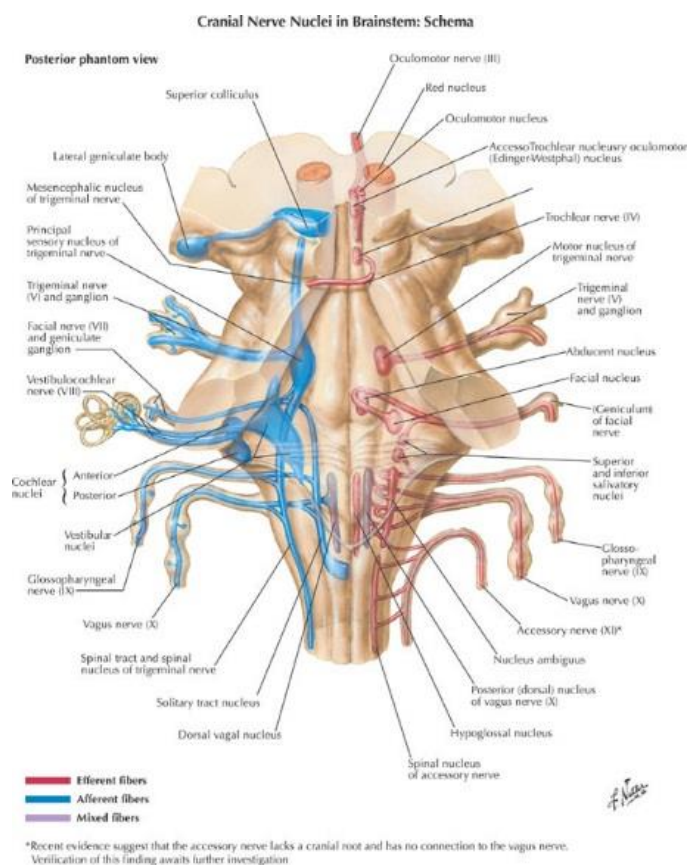
Además, ahí mismo también se encuentran sistemas sensoriales ascendentes y vías motoras que surgen de los núcleos del tronco del encéfalo, según se muestra en las Figuras 6 y 7.

Figura 6. Tronco cerebral. Vista anatómica



Fuente: Frank H. Netter, M.D. Götzens G. Víctor, Atlas de Anatomía Humana, Segunda Edición, Versión española, Masson, S.A. año 2000.

Figura 7. Tronco cerebral: vista fisiológica



Fuente: Frank H. Netter, M.D. Götzens G. Víctor, Atlas de Anatomía Humana, Segunda Edición, Versión española, Masson, S.A. año 2000.

1.10.2 Epidemiología

Se cree que comprende al menos del 1% de todos los accidentes vasculares cerebrales (AVC). Muchos de estos pacientes mueren durante la fase aguda antes de ser diagnosticados. La muerte en la fase aguda incluye, como causas más comunes: las infecciones, neumonía con alrededor de 40% de los casos. El AVC inicial es la primera causa de muerte con 25% . Más de 85% de estos pacientes sobrevive hasta diez años. Su promedio de edad oscila en el rango de 17 a 52 años. Cuanto más joven sea el paciente, tanto mejor será su pronóstico de sobrevivencia ^{5,10,11,12}.

Si el paciente no muere a causa del AVC y sus efectos secundarios, en 1 % de estos casos, tiene la probabilidad de sufrir del síndrome de enclaustramiento. Se piensa al principio que estas personas están en un estado de coma, pero en realidad están conscientes todo el tiempo. El diagnóstico puede ser tardío hasta que alguien reconoce que el paciente está consciente⁷. La mayoría de las veces este descubrimiento es realizado por los allegados o familiares del paciente,

puesto que lo conocen mejor que sus médicos tratantes. Se realiza entonces un EEG (Electroencefalograma), el cual revela que existe actividad cerebral y una serie de pruebas demuestran que el paciente efectivamente se encuentra consciente^{14,15,18}.

Estos pacientes se comunican con el mundo exterior gracias a los músculos extraoculares, utilizándolos para realizar movimientos del párpado y del ojo; sin embargo, no todos estos funcionan correctamente.

En la literatura también se reporta que estos pacientes tienden a sufrir depresión, lo cual no resulta sorprendente debido a su condición incapacitante y dependiente. Incluso llegan aún más allá, pensando en la autoeliminación o eutanasia.

El LIS, llama la atención por tratarse de una patología que además, de su característica cuadriplejía, agrega una incapacidad de mover los músculos de la cabeza, cara y boca. De esta manera, el paciente es incapaz de hablar, comer o expresar con gestos de la cara, sentimientos o deseos. Si fuera posible imaginárselo sería como estar viviendo en una prisión propia, ya que, la conciencia y capacidad cognitiva se encuentran intactas.

El síndrome de enclaustramiento presenta una lesión en la región ventral del puente cerebral causada por una hemorragia frecuentemente después de un accidente vascular cerebral (AVC) o un trauma. Entre sus características clínicas se menciona la parálisis de los nervios craneales bajos, mutismo con conservación de la conciencia, movimiento ocular vertical y del párpado superior conservado.

En 1986 fue redefinido como cuadriplejía y anartria con conservación del estado de la conciencia. Se aclaró que el mutismo era involuntario. Los pacientes estaban conscientes, atentos, con funciones de ejecución, habilidad intelectual, percepción y visión, aunque la memoria verbal puede verse afectada.

“El síndrome de enclaustramiento (Locked-In Syndrome) o (LIS) se describe en la literatura como pacientes con un estado de alerta y conciencia intactos, pero incapaces de verbalizar o realizar movimientos faciales o de sus extremidades. Son lesiones agudas en la región ventral del puente cerebral, es su causa más común. Los pacientes con tales lesiones del tallo cerebral, a menudo permanecen en estado comatoso por días o semanas, siendo necesario soporte respiratorio artificial y gradualmente despiertan del coma, pero continúan paralizados y sin voz. Superficialmente se asemejan a pacientes en estado vegetativo o mutismo aquinético”^{5,6,13}.

“Al encontrarse las fibras supranucleares del III nervio craneal, en la región dorsal, el movimiento ocular vertical frecuentemente se conserva y así el paciente utiliza esta única forma de oculomovimiento para la comunicación con el mundo exterior” ²⁴.

El diagnóstico es comúnmente realizado por un familiar o cuidador en más de 50% de las veces y el promedio de diagnóstico es de 78.8 días¹¹. El síndrome de *locked-in* debe sospecharse en pacientes con alteraciones de conciencia agudas en contexto de lesión de mesencéfalo o diencefalo. El diagnóstico diferencial se realiza en los siguientes casos: estado de coma, mutismo aquinético, estado vegetativo y estado de conciencia mínima. Puede realizarse con apoyo de electroencefalograma (EEG) y de neuroimágenes funcionales como la tomografía de emisión de positrones (PET). Las manifestaciones de cada una de estas patologías se resumen a continuación:

- a. En el síndrome de enclaustramiento el metabolismo cerebral detectado por PET es normal o levemente disminuido. El EEG posee un ritmo alfa posterior reactivo .
- b. Los pacientes pediátricos suelen tener mejor pronóstico. Hasta 35% de ellos logra alguna mejoría en su función motora, 26% tiene una mejoría considerable, 23% muere y 16% permanece cuadripléjico y anártrico⁵.

Los pacientes inicialmente se cansan rápido al utilizar el movimiento vertical de los ojos para comunicarse. Ellos deben utilizar un sistema para su interpretación, por ejemplo, un movimiento del ojo hacia arriba significa ‘SÍ’ y dos movimientos rápidos del ojo hacia abajo significa ‘NO’. Se debe procurar realizar preguntas concisas, efectivas y evitar preguntas abiertas.

También es necesario tratar infecciones, dificultades respiratorias, dolor y abrasiones corneales. Estos pacientes no son capaces de llamar la atención o iniciar conversaciones, se debe entonces frecuentemente darles la oportunidad de comunicarse y finalizar los diálogos^{11,15,69}.

2. Traumas de médula espinal

2.1. Traumas de médula espinal

La columna vertebral se constituye por 33 vértebras, formando las divisiones cervicales (7), torácica (12), lumbar (5), sacra (5) fusionadas y (4) coccígeas fusionadas. La médula espinal se extiende desde la unión cervicobulbar en la base del cráneo hasta el cono medular a nivel de L1-L2.

En la clínica se toman tres tractos de fibras de importancia que viajan desde y hacia médula espinal y cerebro:

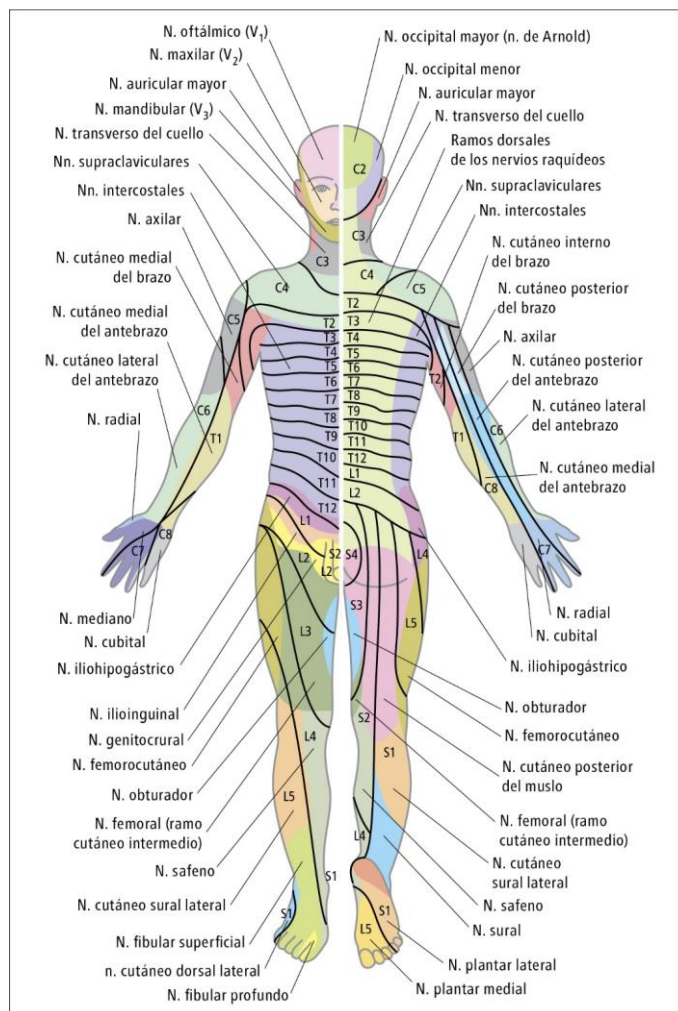
- Los tractos corticoespinales, localizados lateralmente y que llevan fibras motoras de las neuronas motoras superiores corticales a las neuronas motoras medulares bajas situadas en las astas anteriores de la médula espinal. Estos haces cruzan la línea media en la decusación de las pirámides en la parte inferior del bulbo medular.
- El haz espinotalámico también se encuentra lateral, es sensitivo y transmite sensaciones de dolor y temperatura del lado contralateral del cuerpo. Sus axones cruzan en la comisura anterior de la ME a dos o tres segmentos de la zona de entrada de la raíz dorsal y ascienden al tálamo ipsilateral.
- Las columnas dorsales llevan fibras sensoriales propioceptivas que transmiten posición, posición y tacto ligero desde las raíces dorsales rostralmente ipsilateralmente para subir y decusar en el tallo cerebral y llegar a la corteza cerebral opuesta.^{1,3,4}

2.2. Lesión de la médula espinal

Unas de las lesiones traumáticas más frecuentes producidas en los accidentes de tránsito son las injurias de la médula espinal y pueden llegar a ser tan fuertes como para producir fracturas vertebrales, subluxación, hiperextensión del raquis cervical con un conducto raquídeo estrecho, herniación del material de un disco intervertebral al conducto y lesiones penetrantes, como proyectiles de armas de fuego u objetos punzocortantes o contusos y por plastamiento. Los daños neurológicos varían de leve a grave y con secuelas neurológicas permanentes. Debe sospecharse fractura raquídea y lesión medular en pacientes con lesiones de la cabeza en coma o sin él y en pacientes politraumatizados. Por esta razón es mejor inmovilizar al paciente en una tabla con un collar cervical duro hasta que se realicen exámenes radiológicos como placas de rayos X en columna, Tac o resonancia magnética y estudios diagnósticos con un especialista en trauma, neurólogo o neurocirujano.

Entre los hallazgos de los datos clínicos de la médula espinal pueden estar presentes: hipersensibilidad del raquis, debilidad de las extremidades, entumecimiento o parestesia, compromiso respiratorio e hipotensión. La afección de una raíz raquídea explica la radiculopatía, que se caracteriza por deterioro motor y sensorial en el miotoma y dermatomas correspondientes, como se observa en la Figura 8. La lesión de la médula espinal produce radiculopatía con manifestaciones variables.

Figura 8. Localización de los territorios inervados desde la médula espinal (dermatomas y nervios motores)



Nota. Visualización de las posibles zonas de afectación en el caso de lesiones en los diferentes niveles vertebrales. Fuente: Manual MIBE, <https://empendium.com/manualmibe/chapter/B34.I.1.9>.

Entre las lesiones más incapacitantes está la lesión completa, clínicamente presenta la pérdida total de la función motora y sensorial abajo del nivel vertebral de la misma, se relaciona con una transacción anatómica o fisiológica de la médula. Existirá hipotensión arterial cuando la lesión está por arriba del nivel de T5, debido a la pérdida del tono vascular controlado por el sistema nervioso simpático.

Las lesiones incompletas de la médula: el síndrome de Brown-Séquard o hemisección de la médula espinal, se caracteriza por pérdida ipsilateral de la función motora y de la sensación de

posición y vibración y contralateral de la sensación de dolor y temperatura por debajo del nivel de la lesión.

El síndrome de médula central se manifiesta por pérdida bilateral de la función motora y las sensaciones de dolor y temperatura en las extremidades superiores con relativa conservación de las mismas en las inferiores. De manera característica, se afectan más gravemente las extremidades superiores distales porque estas áreas están inervadas por las porciones más mediales de las vías corticoespinal y espinotalámica. El síndrome de médula central se observa con frecuencia después de una lesión por hiperextensión del raquis cervical, con fractura o sin ella.

El síndrome de la arteria espinal anterior se presenta como pérdida bilateral de la función motora y las sensaciones de dolor y temperatura abajo del nivel de la lesión sin alterar las de posición, la vibración y el tacto ligero. Esta lesión incompleta se presenta cuando se afecta la arteria espinal anterior y causa isquemia medular en su distribución que afecta las columnas anterior y lateral en ambos lados. Una causa común del síndrome de arteria espinal anterior es la rotura aguda de un disco cervical.

En la Figura 9 se observa un incremento importante a través de los años de traumas espinales, sobre todo en cuadriplejías del tipo flácida, la cual tiene que ver con sección de los nervios espinales a nivel cervical. Uno de los tipos de trauma espinal más incapacitante y que presenta más dificultad para la recuperación del paciente y reincorporación a sus actividades normales.

Figura 9. Egresos de pacientes con trauma espinal hospitalizados y diagnosticados con cuadriplejía por año

Diagnóstico principal	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Total	131	139	138	109	116	90	133	123	163	178	313	243	322	227	238	269	225
Cuadriplejía flácida	3	19	1	-	1	1	17	44	31	37	111	96	84	77	52	87	79
Cuadriplejía, no especificada	128	120	137	109	115	89	116	79	132	141	202	147	238	150	186	182	146

Fuente: Información del Área de Estadísticas en Salud de la CCSS

2.3. Signos y síntomas

Los traumatismos del raquis lumbar pueden producir signos y síntomas de compresión de la cola de caballo, que consisten en múltiples radiculopatías lumbosacras de gravedad variable. Pueden afectarse las funciones motoras, sensorial y refleja de las extremidades inferiores y producir grados variables de debilidad, pérdida sensorial (todas las modalidades en la distribución específica de las raíces afectadas) y disminución o ausencia de reflejos. En lesiones graves son

comunes distensión vesical por parálisis del músculo extrusor, flacidez del esfínter anal y pérdida de la sensación perineal.

Además, del déficit neurológico, la lesión aguda de la médula espinal se acompaña de varias respuestas sistémicas. Si se daña arriba de C3, cesan los esfuerzos respiratorios, lo que explica la mortalidad alta por estas lesiones en la escena del accidente. Aunque es posible iniciar esfuerzos ventilatorios espontáneos en las que afectan C4-C6, los volúmenes corrientes no suelen ser suficientes y explican la hipoxia y retención de dióxido de carbono progresivo. Es común que se presenten las complicaciones de obstrucción de vías respiratorias, atelectasia y neumonía. Con frecuencia se requiere ventilación con ayuda, poco después de la lesión.

Si la lesión medular es arriba de T5 suele haber hipotensión arterial, ya que, se pierde la innervación simpática y ello origina un aumento de la capacitancia venosa y disminución del retorno venoso. La hipotensión resultante se controla con líquidos por vía intravenosa. Son preferibles los coloides para reducir el peligro de sobrecarga vascular y edema pulmonar yatrogénico. También deben evitarse los cambios de postura que reducirán de manera precipitada la presión arterial, como la elevación de la parte superior del cuerpo.

Una respuesta compensadora común a la hipotensión es taquicardia, pero la regla es que haya bradicardia cuando se daña la médula cervical y se pierden los impulsos simpáticos al corazón. Este tipo de bradicardia no requiere tratamiento a menos que el paciente tenga síntomas o peligro de infarto del miocardio o apoplejía por la edad u otra enfermedad debilitante. Si fuera necesario, la terapia por utilizar, sería con atropina y líquidos³.

Una vez que el paciente se estabiliza hemodinámicamente, son esenciales radiografías del raquis, pero solo en tanto permanece inmóvil en una tabla con un collar cervical duro. Se obtienen las imágenes estándares, asegurando la observación adecuada de la unión cervicotorácica. En pacientes en coma, con lesión grave o ambos y múltiples traumatismos deben tomarse buenas radiografías simples de la totalidad del raquis. Las áreas de fracturas se estudian adicionalmente con TC, mediante imágenes axiales y sagitales. Si no se encuentra alguna anomalía en radiografías simples o por TC y existe un déficit neurológico que indica un nivel de la médula espinal, se hacen estudios de IRM o una seguida de TC para identificar otras causas de compromiso medular, como rotura traumática de un disco intervertebral o hematoma epidural raquídeo (Figura 10).

Figura 10. RM lateral del raquis cervical. Compresión de ME a nivel C5-C6



Fuente: <https://jmedicalcasereports.biomedcentral.com/articles/10.1186/1752-1947-6-166>

2.3.1. Tratamiento

Los objetivos de la terapéutica son corregir la alineación del raquis, proteger el tejido neural indemne, restablecer la función del tejido nervioso con daño reversible y lograr una estabilidad raquídea permanente. A fin de satisfacer estos objetivos, las prioridades máximas son reducir e inmovilizar cualquier fractura o luxación.

El alineamiento defectuoso del raquis cervical casi siempre se reduce mediante tracción esquelética en posición neutral que puede aplicarse con tenazas para cráneo o un aparato de corona o halo. Ambos se fijan percutáneamente a través de la tabla externa del cráneo, en tanto se conserva al paciente supino e inmóvil. A continuación, se traslada a una cama especial y se inicia la tracción. Se toman radiografías laterales frecuentes para comprobar que se ha reducido y evitar distensión excesiva que puede lesionar más la médula espinal. Una vez que se reduce la lesión del raquis, se conserva la tracción. En seguida se obtienen placas de vigilancia para confirmar que la alineación es correcta.

En ocasiones no es posible reducir una fractura cervical con tracción sola sin poner en peligro la función de la médula espinal. En estos casos quizá se requiera reducción abierta, por lo general, a través de una vía posterior, combinada con un procedimiento de fusión. Debe hacerse en especial en facetas trabadas en uno o ambos lados.

Los pacientes con fracturas del raquis torácico y lumbar también se tratan al inicio con inmovilización, que es menos rígida comparada con las cervicales, pero los principios son los mismos. Se conservan estirados en la cama sin tracción y se evitan movimientos de flexión, extensión, inclinación lateral y rotación. Suelen tener menos complicaciones generales relacionadas con su lesión neurológica, pero deben vigilarse para evitar algún deterioro del sistema nervioso y proporcionar la mejor posibilidad de recuperación del mismo.

Las indicaciones para una operación temprana en pacientes con lesión de la médula espinal incluyen imposibilidad para reducir de manera satisfactoria la fractura o luxación por métodos cerrados, deterioro neurológico en quienes tienen una lesión medular incompleta al inicio, compresión grave de la médula espinal por una masa intrarraquídea en la mielografía o IRM y lesión penetrante con escape del LCR o sin él. Las heridas abiertas, como las punzocortantes o por arma de fuego, se desbridan y cierran sin importar si la lesión medular es completa o incompleta. Se justifica una operación temprana para estabilizar el raquis, porque ello permite una movilidad y rehabilitación más tempranas. Puede utilizarse la vía anterior o posterior, según la naturaleza de la lesión raquídea y el grado de inestabilidad.

Si tiene éxito la reducción cerrada y la fractura es estable, se requiere inmovilización externa por un mínimo de tres meses para asegurar que cicatrice de manera adecuada. Si se requieren reducción, fijación, ambas o quirúrgica, también está indicada la inmovilización externa. En el raquis cervical, comprende vestimenta con corona o halo, ciertas excepciones incluyen los procedimientos de placas metálicas anterior y posterior en los que puede bastar un collar cervical duro. En el raquis torácico o lumbar suele requerirse un chaleco de plástico o enyesado por un mínimo, una vez más, de tres meses. Se utilizan radiografías simples para vigilar la alineación raquídea y el grado de fusión durante el periodo de recuperación.

2.4. Lesión de nervios periféricos

Las lesiones de nervios periféricos pueden clasificarse desde el punto de vista funcional. Neuropraxia es una pérdida temporal de la función sin lesión axonal. No hay daño estructural. El pie que "se duerme" después de cruzar las piernas es un ejemplo de pérdida funcional sin alteraciones patológicas. Axonotmesis (*tmesis* del griego cortar) es una alteración del axón donde su mielina está dañada, pero en la que se conserva su vaina con el endoneuro, perineuro y epineuro. Ocurre degeneración *walleriana* del fragmento de axón distal. El estiramiento o la

compresión prolongada originan esta pérdida funcional y estructural. El axón proximal se regenera, pero la recuperación funcional depende de las lesiones concurrentes, de la cantidad de axones proximales sanos que quedan después de una lesión y de la edad del paciente. Neurotmesis es la alteración del axón y su vaina nerviosa con la pérdida funcional correspondiente. La transección de un nervio origina este fenómeno. Ocurre regeneración, pero rara vez se normaliza la función.

Desde el punto de vista clínico las alteraciones sensoriales y motoras corresponden al nervio periférico afectado. Un interrogatorio detallado y un examen neurológico preciso permiten localizar el sitio de lesión con gran precisión. Los hallazgos sensoriales suelen ser aparentes al inicio y permanecen así hasta que la regeneración es casi completa. La función motora compensadora, que con frecuencia se observa en la mano meses después de una lesión, rara vez se ve en la fase aguda. Un signo poco preciso, pero clínicamente útil de regeneración sensorial es el signo de Tinel. La percusión de la piel sobre el trayecto del nervio lesionado despierta parestesias en el sitio en que la regeneración está ocurriendo.

Son útiles las radiografías del sitio de lesión para buscar fractura o cuerpo extraño. La electromiografía (EMG) no es útil en el transcurso de las tres primeras semanas de una lesión, pero este auxiliar diagnóstico es muy eficaz para vigilar el estado del proceso de degeneración o regeneración que ocurre más tarde. Con frecuencia las decisiones terapéuticas dependen de los datos de EMG semanas a meses después.^{1,3,4}

2.4.1. Tratamiento

La terapéutica de un nervio lacerado consiste en una reparación primaria cuando la herida es limpia y no complicada, como las punzocortantes, laceraciones por vidrio e incisiones quirúrgicas. La reparación secundaria o tardía está indicada cuando la herida está sucia o complicada, como en heridas por proyectil de arma de fuego o arrancamientos, lo cual ocasiona lesiones tisulares graves que determinan que la reparación primaria tenga menos éxito. Es mejor realizar la reparación secundaria unas cuantas semanas después de la lesión, cuando sea evidente la viabilidad del tejido, cuando se reduzca la probabilidad de infección y cuando se distingan los planos de disección. Si es imposible la anastomosis término-terminal de los nervios por la pérdida de tejido, debe hacerse un injerto nervioso con nervio sural autólogo. Los factores

intraoperatorios, como orientación axil de los fascículos, coaptación adecuada, material de sutura, hemostasia y tensión de la línea de sutura, determinan el resultado final.

Con frecuencia se exploran lesiones nerviosas en continuidad (es decir, las que resultan de contusión o compresión o laceración) cuando no mejoran en el transcurso de seis semanas de la lesión sin importar que la pérdida funcional sea completa o parcial. El tejido cicatrizal intraneural y extraneural en el sitio lesionado puede evitar el nuevo crecimiento axonal por su efecto constrictor. La neurosis libera las fibras nerviosas en regeneración de la cicatriz con que chocan y puede mejorar la recuperación funcional.

También está indicado instituir con rapidez fisioterapia para mejorar la función muscular y conservar el movimiento articular. Es el mejor medio para reducir al mínimo las complicaciones de la denervación. La porción desnervada del miembro está sujeta a atrofia y fibrosis muscular, rigidez articular, atrofia de la placa terminal motora y alteraciones tróficas de la piel. Cuanto más tiempo persiste la denervación, menos probable es que resulte una buena función.

La regeneración de un nervio periférico ocurre a un ritmo de 1 mm/día (más o menos 2.5 cm en un mes), de forma que quizá no haya mejoría obvia durante muchos meses. Los factores que afectan de manera adversa la recuperación de la función incluyen edad avanzada, lesión neural proximal, pérdida extensa de tejido nervioso, lesión concurrente de tejidos blandos y presencia de deficiencias mixtas de la función sensorial y motora. Desafortunadamente, la regla suele ser una recuperación neurológica incompleta. Debe pensarse en transferencias tendinosas para mejorar el resultado funcional, si la función neurológica es inadecuada cuando termina la recuperación.³

3. Tecnologías eye-tracking de asistencia para controlar aplicaciones

3.1 Interfaz eye-scanner MODELO TOBII 4C

3.1.1. Software eyetracker/interfaz Arduino modelo Uno

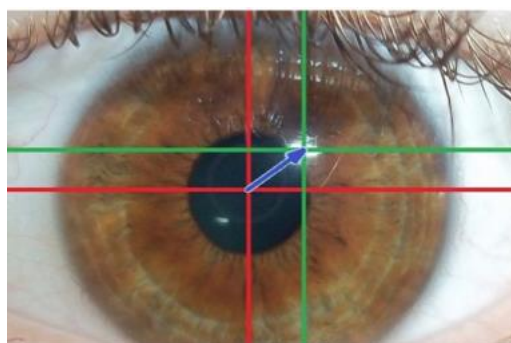
3.1.1.1. Desarrollos de dispositivos rastreadores del movimiento ocular (eye-tracking)

La tecnología de los eye-tracking scanners (barredores del trazo o movimiento ocular) consiste en dispositivos electrónicos capaces de rastrear por medio de una cámara captadora de imágenes de medidas y diodos emisores de luz (LEDs), encargados de apuntar de manera precisa puntos de referencia en la pupila y córnea del ojo, para captar de manera electrónica, el movimiento de los ojos. Son colocados de una manera estratégica cerca de los ojos o con estos como objetivo y el rastreo del movimiento ocular, se logra a través de una relación geométrica y

vectorizada de la distancia comprendida entre la pupila y algún punto de referencia corneal, este dato es procesado y calculado por un software en un computador, dando como resultado el registro de cualquier variación vectorizada entre estas distancias (Imágenes 6 y 7) y una vez analizada la información, se transduce con la ayuda del software (aplicación o programa de la interface) para ejecutar los movimientos de un cursor o *pointer* desplegado en el área de la pantalla de un monitor^{52,76}.

En la Figura 11, se muestra cómo el eye-tracking realiza el cálculo vectorizado (vector flecha azul) entre la distancia del centro de la pupila (intersección de líneas en rojo) y el ángulo corneal (intersección de líneas en verde), información que será procesada por un software instalado en un computador. Dependiendo de la dirección en que la persona mire, la relación posicional entre la pupila y el cambio del reflejo corneal permite calcular la dirección de la mirada y de esta manera, poder rastrear el movimiento ocular.

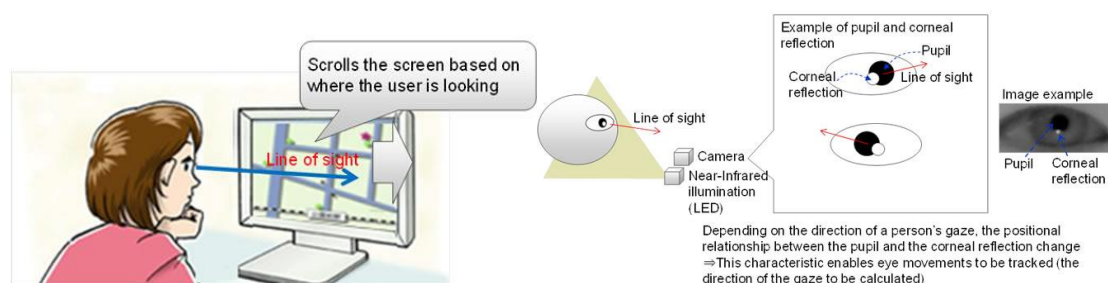
Figura 11. Eye-tracking realizando el cálculo vectorizado



Fuente: <https://assistivetechnologyblog.com/2016/08/eye-tracking-101-how-does-it-work.html>

En la Figura 12 se explica cómo se realiza el barrido del movimiento ocular, dependiendo de la dirección en que la persona observe, la relación entre la pupila y la reflexión corneal cambia, esta característica habilita el seguimiento de los movimientos oculares sean calculados por el software del escáner^{53,54,60}.

Figura 12. Barrido del movimiento ocular



Fuente: <https://phys.org/news/2012-10-fujitsu-eye-tracking-technology.html>

En un principio, la tarjeta de alfabeto portable AEIOU era la única herramienta disponible y utilizada por los cuidadores, fisioterapeutas y médicos para lograr comunicarse con un paciente cuadripléjico y/o anártrico. Consistía de un cartel o tabla llamada AEIOU, mostrado en la Figura 13. El procedimiento era señalar cada letra para que el paciente, mediante un gesto eligiera cada letra y así poder formar la palabra deseada para comunicarse. Por supuesto, este método era arcaico, arduo, lento, cansado, costoso y muy difícil de utilizar para estos pacientes.

Figura 13. Tarjeta de alfabeto portable AEIOU

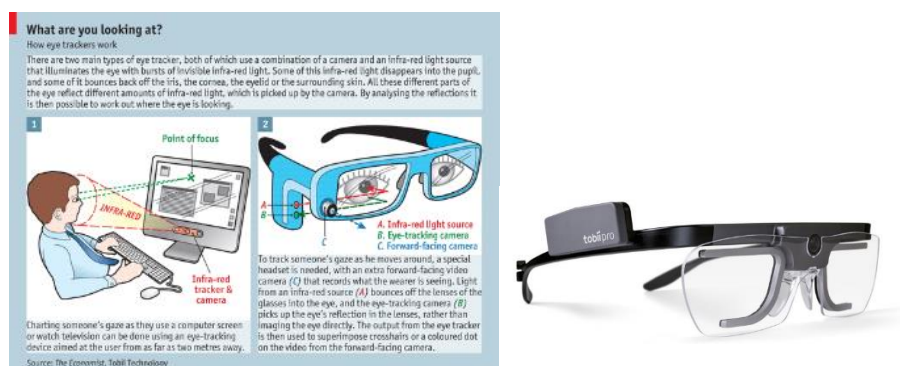
A	B	C	D	End of word	
E	F	G	H	End of sentence	
I	J	K	L	M	N
O	P	Q	R	S	T
U	V	W	X	Y	Z

Fuente: https://www.researchgate.net/figure/AEIOU-alphabet-board-The-assistant-calls-out-the-colors-and-the-patient-signals-the_fig1_241125316

La tarjeta de alfabeto portable AEIOU corresponde a los primeros intentos para comunicarse con el paciente por medio de señalamiento en la tabla por parte de un intérprete y la selección del paciente con gestos o parpadeos en casos extremos como el caso de los pacientes afásicos y síndrome de *locked-in*^{67,77}

Existen varios tipos de *eye-scanners*: incorporados en monitores, portátiles posicionales con trípode o adaptables a monitores y los *goggles* o gafas (Figura 14) con sensores y cámaras diminutas instaladas.

Figura 14. Eye-tracking de goggles o gafas con sensores y cámara

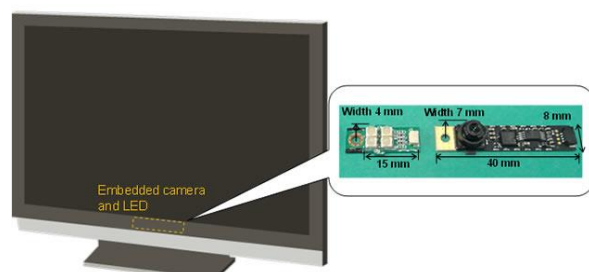


Fuente: <https://www.tomshardware.com/news/tobii-pro-glasses-2-eye-tracking,33575.html>

Se muestra en la Figura 14, un sistema eye-tracking de *goggles* o gafas con sensores y cámara, ofrece una gran ventaja en cuanto la portabilidad y precisión al mantenerse todos estos componentes en tan corta distancia del área del movimiento ocular; sin embargo, no son tan cómodos de portar por mucho tiempo y su alto costo por la miniaturización deja de ser atractivo para este proyecto. A la derecha se puede observar unas gafas de última generación del fabricante Tobii modelo Pro 2, este modelo inicia a un precio de \$10 000.

Uno de los primeros modelos, fue el monitor de Fujitsu con eye-tracking *scanner* incorporado en la base de un monitor, fabricado en el año 2012 (Figura 15), este ofrecía una cámara de muy buena definición para la detección de la pupila, imágenes menos borrosas y mantenía el diseño del computador intacto; sin embargo, uno de los inconvenientes era su alto costo, aproximadamente todo el sistema, incluyendo el computador, monitor con el eye-tracking y software podía llegar a los \$11 000, debido a que era necesario comprar todo el sistema y el equipo de hardware. Otra desventaja era por tratarse de una tecnología cerrada, al no permitir el uso del eye-tracking en otros computadores, además, de la limitación de las posiciones y distancia del escáner con respecto a las diferentes fisionomías de los usuarios.

Figura 15. Monitor Fujitsu con escáner incorporado en su base, cámara y LEDS o diodos emisores de luz para fijar referencias en los ojos



Fuente: <http://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/pressreleases/2012/1002>

Según la corporación japonesa Fujitsu, este modelo ofrecía una buena precisión, pero se observa un diseño rígido, tecnología cerrada y difícil de ajustar para el paciente y alto costo económico. Con los avances tecnológicos actuales es posible encontrar en el mercado varios tipos de equipos capaces de asistir a personas con algún tipo de incapacidad. Algunas de estas tecnologías no estaban al alcance de la mayoría de las personas debido a su alto costo y destinadas para otro fin. Un caso particular era para que un piloto de avión de combate tuviera una mejor precisión para el control de sus armas, apuntando y disparando misiles a un objetivo móvil o estático, utilizando únicamente su movimiento ocular y así, poder mantener sus manos libres sin distracciones para manejar el avión y otras funciones (Figura 16 y Figura 17).

Figura 16. Eye-tracker para pilotos de avión. Piloto de la fuerza aérea estadounidense, utilizando un dispositivo eye-tracker para control de aplicaciones.



Fuente. <https://www.baesystems.com/en/article/bae-systems-eyes-novel-way-of-flying>

Figura 17. Representación de un piloto del futuro gobernando los controles con tecnología eye-tracking



Fuente. <https://www.baesystems.com/en/article/bae-systems-eyes-novel-way-of-flying>

Otra aplicación de la tecnología de Eye-tracker es el entretenimiento, como se muestra en la Figura 18. En el campo del entretenimiento y realidad virtual, esta tecnología ha sido utilizada con gran éxito. En este caso se utiliza para controlar los mandos de algún video juego y/o *software* de realidad virtual (e.g., diseños arquitectónicos)⁸¹.

Figura 18. Aplicación del movimiento ocular para seleccionar el objetivo para disparar (pointer en forma de burbuja circular en la pantalla)



Fuente: <https://gaming.tobii.com/product/tobii-eye-tracker-4c/>

El otro tipo es el móvil, adaptable con o sin trípode, muy popular en su tipo por ser muy versátil y de bajo costo económico, aproximadamente de \$199 en adelante. Entre estos se encuentran el TheEyeTribe Tracking Scanner, fabricado por una empresa danesa en 2014 y ambos pueden ser ajustados en el área de captación del movimiento ocular. En la Figura 19, se muestra el TheEyeTribe y en la Figura 20 el Tobii Eye Tracking scanner.

Figura 19. Eye-tracking marca Eye-Tribe o rastreador de movimiento ocular



Nota. Entre sus ventajas se encontraban que era portátil y se podía colocar en cualquier parte del rango del usuario, a bajo costo. Fuente. <https://techcrunch.com/2014/01/08/the-eye-tribe/>

Este eye-tracking tenía un costo de \$99 y lo producía una empresa danesa y fue la primera opción analizada; sin embargo, la empresa cerró poco tiempo después y también tenía la dificultad de tener un software para desarrollo únicamente (Software Development Kit). Por estas dos razones anteriores, se consideró muy desventajoso en cuanto a efectividad y eficacia para el proyecto y fue descartado⁸².

El segundo dispositivo es el utilizado en este proyecto de tesis y se trata del escáner de rastreo ocular modelo Tobii 4C, desarrollado por la compañía Tobii en alianza con Microsoft para implementar el software de manejo. Es muy parecido al anterior en cuanto a las características técnicas, pero con la gran ventaja de ser compatible y preconfigurado con el sistema operativo Windows versión 10 de Microsoft (Figura 20).

Figura 20. Eye-Tracking Scanner de rastreo ocular Tobii Eye Tracker portátil modelo 4C.



Fuente: <https://www.microsoft.com/en-us/garage/wall-of-fame/eye-control-windows-10/>

Entre sus principales ventajas está que su aplicación o software de manejo ya está incluida en el sistema operativo Microsoft Windows V10. Su tamaño pequeño y forma delgada lo hace más sencillo de transportar y adaptar a cualquier superficie, es bastante sensitivo y preciso, con un

rango de acción de 50 a 95cm. Se conecta por un puerto USB 2.0 estándar y es compatible con sistemas operativos Windows V7, V8.1 y V10 (64 bits, esto significa una velocidad de procesamiento mucho más rápida). Ambos poseen un software de desarrollo libre, esto quiere decir que el usuario puede por sí mismo o por medio de un profesional en informática, desarrollar un software, programa o aplicación personalizado para cada individuo o necesidad, lo cual es muy ventajoso por ser un sistema abierto y de bajo costo⁷⁰.

En el caso de este proyecto, después de haber investigado en Internet los diferentes sitios especializados en este tipo de tecnología, se eligió el modelo Tobii Eye Tracking 4C, con un costo de \$149, elaborado hace dos años por la corporación sueca Tobii AB y fue debido a que ya poseía una interfaz de software y hardware, lista y desarrollada para la aplicación de control sobre la plataforma del sistema operativo Microsoft Windows versión 10. Esto ofrece como ventajas un muy bajo costo en la aplicación de control, ya que, al ser un sistema operativo de uso generalizado, universal y de utilización en la gran mayoría de computadores actuales, el costo por licencia de Microsoft Windows Professional Versión 10 es de alrededor de \$195.00. También se ahorra el costo de desarrollo y el tiempo que hubiera empleado en terminarlo. Por último, al haber sido probado en los laboratorios de Microsoft garantiza un control de calidad y un soporte extenso en sus actualizaciones para modificaciones en el futuro.

La tecnología de los rastreadores eye-tracking y las computadoras han tenido un efecto liberador en las vidas de estos pacientes, habilitándolos para interactuar con el mundo real a través de un mundo cibernético. Dialogar, preguntar, enviar y recibir mensajes por Internet son algunas de estas tareas facilitadas por esta tecnología. A continuación, se muestran algunos estudios y proyectos relacionados con estas interfaces de comunicación.

En un artículo publicado por Brunno et al. del 2009⁹, se menciona cinco casos de niños con el síndrome de enclaustramiento con 35% de alguna recuperación motora. Por esta razón se exploran nuevas formas de ayudar y dar soporte a estos pacientes, utilizando para ello, varios dispositivos electrónicos y aunque tienen varias limitaciones para su uso, también tenían gran potencial para el futuro (Figura 21).

Figura 21. Dispositivos para asistencia tecnológica



Nota. (A) Artilugio que habilita al paciente para controlar su silla de ruedas y otro soporte en su cabeza le ayuda a utilizar un computador. (B) Un controlador de dedo para hablar con sintetizador desde un texto escrito. (C) Dispositivo de rastreo ocular incorporado en lentes para poder digitar en un teclado virtual en la pantalla de un computador^{50,61,63,64}.

Para junio de 2017, Microsoft ofreció una versión Beta o en vías de prueba de una utilidad incorporada en su actualización número 16257, a su Windows Professional versión 10, con la cual se podía utilizar una interfaz rastreadora ocular o eye-tracking fabricada por la empresa Tobii Eye Tracking Technology. Esta fusión le permitía al usuario una interacción con las aplicaciones en el computador, utilizando únicamente el movimiento de sus ojos, según se muestra en la Figura 22.

Figura 22. Teclado virtual desarrollado por Microsoft para utilizar con la interfaz Tobii Eye-Tracking.

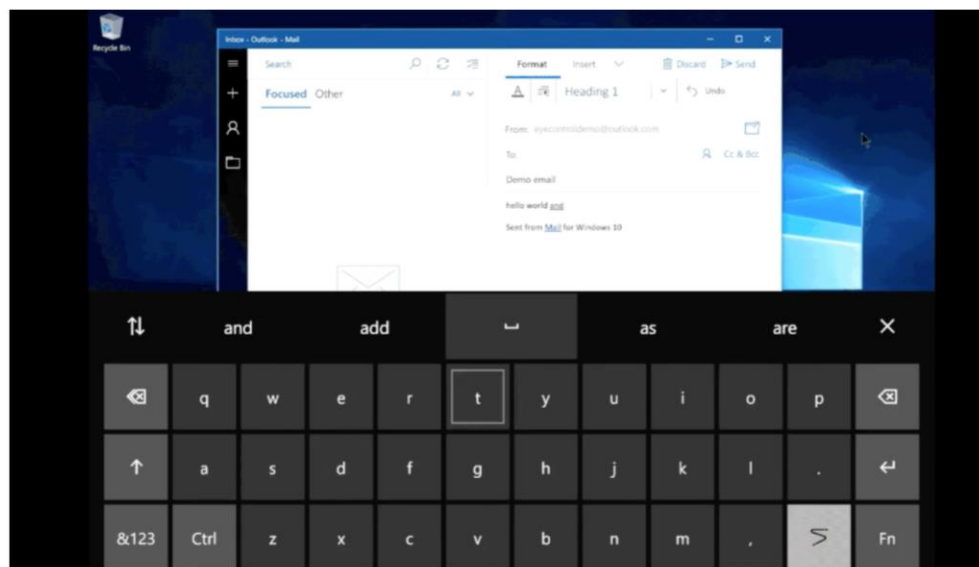


Photo: Microsoft

Nota. El usuario sería capaz de digitar las teclas virtuales por medio de la selección visual y un retardo de segundos en cada letra Versión Beta para el año 2017. Fuente:

<https://www.microsoft.com/en-us/garage/wall-of-fame/eye-control-windows-10/>

Esto es muy importante, ya que se está universalizando este tipo de interfaces y además, se cuenta con el respaldo de investigación de una empresa tecnológica consolidada. Para fines prácticos, significa que estará a disposición un software económicamente accesible para las familias o para el Estado, que facilitará poder brindárselo a los pacientes que así lo requieran.

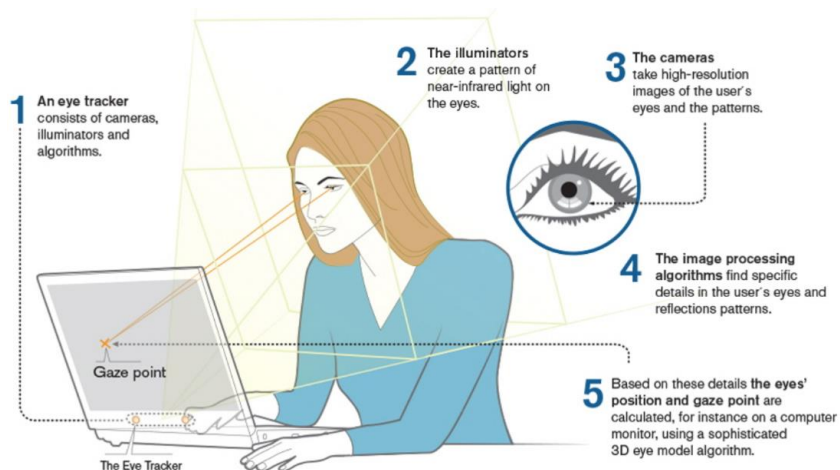
3.1. Funcionamiento del eye tracker TOBII

Los eye trackers han sido utilizados como un método para estudiar la atención visual de los individuos. Existen muchas técnicas para detectar y rastrear los movimientos de los ojos; sin embargo, cuando se trata de uno remoto, no invasivo, eye-tracking, la técnica más comúnmente utilizada es la del reflejo corneal del centro de la pupila (PCCR). El concepto básico es utilizar una fuente de luz para iluminar al ojo, causando reflejos visibles, donde una cámara captura una imagen del ojo mostrándolos. La imagen capturada por una cámara es para identificar el reflejo de la fuente de luz en la córnea (*glint*) y en la pupila. Así es posible calcular un vector formado por el reflejo angular entre la córnea y la pupila. La dirección de este vector combinada con otras

características geométricas de los reflejos, es entonces utilizada para calcular la dirección de la mirada.

El Tobii eye-tracking es una versión mejorada del tradicional PCCR tecnología remota de eye tracking (Patente norteamericana EEUU: US7,572,008). Iluminación cercana a la infrarroja es utilizada para crear patrones reflectores en la córnea y la pupila del ojo de los sensores de imagen, los cuales capturan imágenes de los ojos y los patrones de reflejo. Los algoritmos avanzados para el proceso de imágenes y un modelo 3D del ojo son así utilizados para estimar la posición del ojo en el espacio y el punto de mirada con una alta precisión^{78,81}.

Figura 23. Explicación paso a paso sobre cómo funciona la tecnología del eye-tracking



Fuente: <https://www.haptic.ro/alienware-creates-worlds-first-intelligent-notebook-tobii-eye-tracking/>

En resumen, los aspectos más relevantes del funcionamiento de este dispositivo son los siguientes:

1. El eye-tracker consiste básicamente de tres componentes importantes: cámara, iluminadores infrarrojos y software interpretador de algoritmos.
2. Los iluminadores crean un patrón de luz cercana a la infrarroja entre la periferia de la córnea y la pupila de los ojos.
3. Las cámaras captan los vectores de estas mediciones con imágenes y patrones en alta resolución.
4. Los algoritmos procesados de las imágenes hallan detalles específicos en los ojos del usuario y los patrones de reflexión.

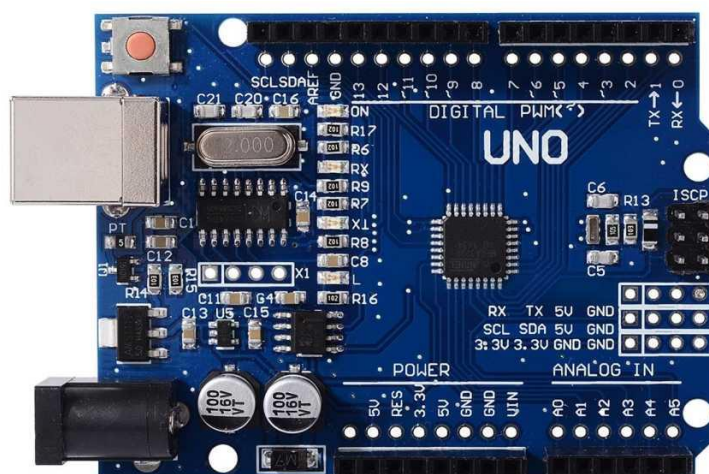
5. Con base en estos vectores, se calcula la posición de los ojos y el punto de la mirada, por ejemplo, en un monitor de computadora, utilizando un sofisticado modelo algorítmico tridimensional del ojo.
6. Los resultados se transducen al movimiento del cursor en la pantalla del ambiente Windows.

3.2. Tecnología Arduino para el control de electrodomésticos utilizando el eye-tracking desde el computador

Arduino es una plataforma electrónica de hardware y software abierto que le permite al usuario diseñar y programar proyectos según su necesidad. Las interfaces Arduino cuentan con diferentes opciones de componentes electrónicos, desde un microcontrolador capaz de recibir instrucciones programadas para realizar determinadas tareas o rutinas y también tarjetas con sensores, motores y diferentes periféricos para realizar funciones muy específicas, como instrumentos de medición y otros⁷⁰.

Para esta tesis se utilizó Arduino modelo UNO (Figura 24), por ser una interfaz práctica, sencilla, económica y muy compatible con el hardware de cómputo y el Windows 10 que maneja la aplicación del eye-tracker. La idea es que el paciente pueda controlar desde el computador dispositivos de uso cotidiano como luces, radio, televisor, ventiladores por medio del Arduino y una tarjeta con *relays* para manejar los periféricos mencionados.

Figura 24. Tarjeta Interface Aduino Modelo UNO utilizada en esta tesis.



Fuente: <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoUno>

Entre sus ventajas se tiene: es muy compacta, un costo de \$15, puertos de entrada y salida digitales y analógicos, puede ser alimentada con 5V del mismo puerto USB o con adaptador de corriente. Cuenta con un software de desarrollo libre con aplicación gratuita Arduino para programación.

4. Estudios en pacientes neurológicos, utilizando rastreadores del movimiento ocular

4.1. Parálisis cerebral y comunicación con el dispositivo eye gaze

La parálisis cerebral (PC) es una condición caracterizada por alteraciones de la coordinación muscular (parálisis espástica) y / u otras discapacidades que afectan a la comunicación, por lo general, causada por daños en el cerebro antes o durante el parto. Las secuelas neuromusculares pueden ir desde leves a severas, dependiendo del área cerebral afectada. Caminar, hablar o sostener cosas con las manos pueden ser tareas casi imposibles.

La tecnología de eye-tracking es una manera de ayudar a estos pacientes que padecen de parálisis cerebral para realizar con sus ojos, una comunicación con un dispositivo conectado a un computador, el cual le permita hablar, leer, escribir e interactuar con el mundo. Con la tecnología del eye-gaze, los usuarios operan una computadora, dirigiendo el cursor con sus ojos.

Los candidatos para utilizar y trabajar con esta tecnología eye-gaze son seleccionados por un grupo interdisciplinario que incluye: familia, ingenieros de rehabilitación, doctores, fisioterapeutas, terapeutas ocupacionales y trabajadores sociales. Este grupo evalúa características esenciales como:

- a. La habilidad de enfocar firmemente un punto
- b. Agudeza visual suficiente para ver claramente la pantalla del computador
- c. La habilidad para mantener la posición en frente del dispositivo
- d. La habilidad para rastrear hacia delante y hacia atrás

El funcionamiento de este dispositivo se basa en un LED infrarrojo (diodo emisor de luz infrarroja) que dirige un rayo de luz invisible hacia los ojos del usuario. Algunos rayos rebotan en la superficie del ojo, mientras que otros lo hacen en la retina, en el fondo del ojo. Una cámara situada en el rastreador del ojo, toma fotos de los ojos del usuario y los reflejos. Con esta información el sistema registra y transduce el movimiento del ojo a un punto específico en la pantalla del computador.

Los dispositivos Tobii Dynavox son eye-trackers, especialmente diseñados para individuos con parálisis cerebral, ya que, estos pueden ser rastreados, aunque los individuos realicen grandes arcos de movimiento con su cabeza.

Las personas con parálisis cerebral tienen más éxito cuando se lo coloca apoyado con el hardware de la silla de ruedas adecuado. Teniendo en cuenta el movimiento del cuerpo del individuo, la Eyegaze Edge vuelve a captar su ojo en 1/30vo de segundo si se mueven fuera del campo de visión y regresan al punto de enfoque de la cámara. Esta readquisición del ojo es tan rápida que el individuo no la percibe. El Eyegaze Edge también es capaz de predecir con exactitud su punto de vista en ángulo indirecto a su cara, lo que significa que pueden funcionar incluso si se inclinan hacia un lado sin cambiar el ángulo de la pantalla. Para muchas personas con parálisis cerebral, esta característica es extremadamente valiosa, a menudo eliminando la necesidad de volver a colocar constantemente la pantalla o recalibrar el sistema Eyegaze.

Una variedad de problemas de movimiento de los ojos también a menudo se asocia con la parálisis cerebral, más estrabismo comúnmente alterna. Puede ser necesario cubrir parcialmente un ojo para el uso exacto. Para aquellos que tienen movimientos incontrolables de la cabeza más allá de los soportes de sillas de ruedas disponibles, pueden no encontrar la operación del Eyegaze sea aceptable siempre ^{65,66}.

4.2. Estudio longitudinal sobre el rendimiento de niños con discapacidades físicas severas que utilizan la tecnología asistida basada en su mirada.

Este es un estudio sueco del año 2015, realizado por investigadores del departamento de estudios para el bienestar social de la Universidad de Linköping, se demuestra como la tecnología asistida basada en la captura del movimiento ocular tiene el potencial de proporcionar a los niños con parálisis cerebral infantil (PCI), afectados por discapacidades físicas severas, incluyendo anartria dándoles oportunidades de comunicación y actividades. Tuvo como objetivo examinar los cambios en el rendimiento a través del tiempo de estos pacientes eye-trackers como tecnología asistida, que en este caso fueron utilizados para realizar tareas y medir su precisión. Fue un estudio longitudinal con un diseño antes y después que se llevó a cabo en diez niños con edades de 1 a 15 años en un período desde los 0, 5 y 15 a 20 meses.

Los resultados mostraron una mejoría desde los cinco meses, en lograr las tareas definidas en el tiempo cada vez más rápido y mucha más precisión seleccionando los objetivos; sin embargo,

también se notó que los niños necesitaban tiempo para adquirir las destrezas necesarias para desarrollar velocidad, precisión en el rendimiento de la captura de la mirada.

Los investigadores se dieron cuenta que esta tecnología de captura del movimiento ocular (*eye gaze*) no es muy utilizada, aunque esté disponible en Suecia y en otros países, pocos niños con impedimentos neurológicos severos tienen acceso. Ellos creen que se puede deber a que los cuidadores consideran esta tecnología muy costosa o por la duda sobre si estos niños anártricos y con problemas neurológicos y cognitivos severos, no puedan manejar un computador con sus ojos. Aunque sea natural para el ser humano conscientemente controlar objetos en un computador con sus ojos.

Los resultados reportados por estos investigadores concluyeron que esta tecnología asistida de eye-tracker puede ser utilizada con pacientes con impedimentos neurológicos muy severos. Durante el tiempo que duró el estudio fue posible valorar el mejoramiento del rendimiento de estos pacientes en cuanto a precisión y velocidad de ejecución. También determinaron que es necesario realizar prácticas diarias para mantener y mejorar las destrezas utilizando el dispositivo.

4.3. Estudio para el Desarrollo tecnológico para el mejoramiento de la comunicación a distancia entre personas con discapacidad.

Este proyecto de estudio experimental abrió una gran cantidad de posibilidades para personas con discapacidades y la implementación de asistencia tecnológica. Con el pronunciamiento de que la comunicación es un derecho fundamental de todos los seres humanos, es que se realizó este estudio colombiano sobre el desarrollo de una tecnología para el mejoramiento de la comunicación entre personas con limitaciones o discapacidad física.

Para ello hacen utilización de un sistema inteligente con un dispositivo de comunicación conectado entre la línea telefónica y el teléfono corriente. Le ofrece la posibilidad de sostener una conversación con otra persona estando presente o no.

Mediante procesos inteligentes como adecuaciones de los equipos ya existentes (mensajes de texto, amplificadores de sonido, sistemas de lectura-escritura) así como en la creación de sistemas de codificación y decodificación de la voz, traductores de lenguaje e intérpretes virtuales (Figura 25). Este estudio diseñó un prototipo tecnológico para la comunicación a distancia de personas en situación de discapacidad entre sí, con varias discapacidades como: discapacidad

motora, ciego, sordo postlingual bilingüe y sordociego postlingual, o con personas sin discapacidad^{51,54}.

Figura 25. Prototipo tecnológico para comunicación a distancia



Fuente: <https://www.scielo.org/article/rsap/2009.v11n5/828-835/>

Este dispositivo permite a la persona con déficit visual escuchar los mensajes del interlocutor, escribir en braille y retroalimentación por sonido para verificar lo que escribe a su contraparte. En el caso de las personas sordomudas, pueden escribir y ver el mensaje mediante las pantallas de cristal líquido (LCD).

En este estudio su dispositivo de comunicación tecnológico diseñado y desarrollado logró integrar diferentes alternativas de comunicación a distancia entre personas con discapacidades heterogéneas o con ausencia de ellas, unificando estas características en lugar de emplear diferentes aparatos para cada función, o requerir diferentes componentes adquiridos por separado. Dicho dispositivo permite al usuario un mayor desarrollo de competencias comunicativas en las personas con discapacidad al ser empleado como interfaz comunicativa. Este es otro ejemplo de cómo la tecnología asistida puede ser utilizada para ayudar a aquellos pacientes que tengan algún déficit neurológico que les impide hacer uso de los dispositivos electrónicos para comunicarse con el mundo exterior.⁵⁶

4.4. La apertura de nuevos mundos para pacientes con discapacidad neurológica

La tecnología del eye-tracker puede abrir nuevos mundos y diferentes oportunidades para las personas con algún grado de cuadriplejía y/o anartria; puede permitir a los usuarios comunicarse con personas que les rodean o bien con un interlocutor lejano mediante el control de software de generación de voz por medio del software speech o Google Translator y a través de Skype en una videoconferencia.

Al hacer que los ordenadores sean accesibles, la tecnología facilita la comunicación y conexión con las personas o interactuando con dispositivos inteligentes para el hogar, permite un grado de independencia que anteriormente habría sido inimaginable. Puede ayudar a los usuarios para avanzar en su educación y desarrollo personal y profesional. Se puede dejar que ellos se diviertan con los juegos de ordenador y expresar su creatividad con los programas de arte y música.

La tecnología eye-tracker puede ayudar a liberar todo el potencial de las personas que padecen de algún impedimento neurológico y devolverlos a un estado previo a su trauma en donde se sientan de utilidad para la sociedad y con esto levantar su estado de ánimo y evitar la depresión^{59,68}.

Capítulo II. Justificación

Basándonos en las estadísticas de causísticas y accidentes suministradas por el MOPT y la CCSS que consideran a Costa Rica como uno de los países de más alto índice de accidentes automovilísticos y que resultan en politraumatismos craneoencefálicos y medulares, enfermedades neurológicas, lesiones de varios orígenes que deshabilitan a los pacientes de la utilización de sus miembros y/o tan graves, que incluyan la inexpresividad con palabras, facciones o señas de cualquier tipo. Los estudios realizados y revisados sobre esta interfaz podría ofrecerles un medio útil y paliativo, cómodo, fácil de operar y viable económicamente para ser utilizado por pacientes con secuelas neurológicas incapacitantes.

Como se puede observar en la Figura 26, en la línea resaltada en gris, sobre la estadística de egresos de pacientes diagnosticados con algún tipo de enfermedad del sistema nervioso central de la CCSS, el porcentaje solamente para el año 2017 asciende a 1.45% de 713,660 pacientes, lo que es equivalente a 10,348 pacientes con alguna enfermedad neurológica.

Costa Rica es un país muy pequeño, pero en contraste, tiene un alto índice de accidentes de tránsito (politraumatismos craneoencefálicos y lesiones medulares, además, de accidentes vasculares cerebrales, tumores y en general, accidentes incapacitantes para los individuos). Entre los más deshabilitantes se encuentran aquellos con secuelas neurológicas, en los que el paciente es incapaz de valerse por sí mismo. De éstas, las cuadriplejías son quizás algunas de las más difíciles de tratar y de reincorporar a estos pacientes a su vida normal.

Figura 26. Egresos hospitalarios y porcentajes por bienios según diagnóstico de la CCSS desde el año 1982 hasta el año 2017.

Diagnósticos CIE-X	Bienio																	
	82 - 83	84 - 85	86 - 87	88 - 89	90 - 91	92 - 93	94 - 95	96 - 97	98 - 99	00-01	02-03	04-05	06-07	08-09	10-11	12-13	14-15	16-17
Total	516,423	579,984	600,862	604,471	580,622	596,104	600,852	624,315	650,668	661,216	671,880	675,758	656,122	664,326	660,056	684,101	688,895	713,660
Porcentaje	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Infeciosas. Y Parasit.	4.29	4.54	5.10	3.89	3.86	3.12	3.43	3.10	2.99	2.96	3.30	3.42	3.19	1.98	2.47	2.80	1.53	1.32
Tumores	3.57	3.50	3.74	4.23	4.25	4.58	4.76	4.96	4.90	4.87	5.20	5.21	5.15	5.25	5.55	6.01	6.34	6.54
Sangre y Hematopoy.	0.71	0.64	0.64	0.64	0.61	0.64	0.63	0.59	0.49	0.47	0.44	0.42	0.48	0.45	0.48	0.50	0.53	0.49
Endocrinas Y Metab.	2.43	2.21	2.21	2.28	2.23	2.16	2.19	2.19	1.91	1.84	1.95	1.82	1.71	1.69	1.69	1.58	1.65	1.68
Trast. Mentales	3.06	3.05	2.74	2.84	2.44	2.17	1.97	2.00	1.99	1.99	2.14	2.13	1.90	1.75	1.82	1.81	1.63	1.79
Sistema Nervioso	2.92	3.00	3.20	3.08	3.15	3.56	3.43	2.40	1.49	1.55	1.61	1.54	1.57	1.56	1.48	1.46	1.44	1.45
Enf. Ojo y Anexos ¹	-	-	-	-	-	-	-	1.05	2.53	2.75	2.88	3.96	4.29	4.82	4.73	5.10	5.76	6.43
E. Oído y Mastoides ¹	-	-	-	-	-	-	-	0.29	0.54	0.48	0.49	0.41	0.38	0.36	0.32	0.28	0.26	0.25
Sist. Circulatorio	5.57	5.29	5.10	5.04	4.96	4.93	4.91	5.28	5.27	5.52	5.58	5.78	5.57	6.01	6.06	6.16	6.67	6.43
Sist. Respiratorio	7.46	7.88	7.26	6.50	6.27	6.38	6.67	7.01	6.91	7.32	7.04	6.53	6.47	6.21	6.20	6.25	5.83	6.67
Sist. Digestivo	6.82	6.75	6.99	7.47	7.80	8.40	8.67	8.87	9.40	9.75	10.37	10.41	10.38	10.31	10.34	10.73	10.98	11.16
Piel y Subcutáneo	1.81	1.72	1.83	1.62	1.49	1.51	1.46	1.36	1.38	1.43	1.49	1.60	1.66	1.61	1.61	1.58	1.46	1.34
Sist. Osteomuscular	2.76	2.72	2.73	2.85	2.72	2.82	2.69	2.82	2.95	2.92	3.10	3.18	3.21	3.25	2.99	2.90	3.09	3.32
Sist. Genitourinario	7.31	7.00	6.94	7.11	6.86	6.93	6.70	6.78	7.02	6.90	7.09	7.11	7.00	6.83	7.23	7.13	6.94	7.20
Embarazo, Parto y P.	33.06	34.40	33.97	35.08	35.56	34.46	34.36	33.21	31.87	30.81	28.15	27.91	28.71	29.10	28.22	26.67	26.00	24.10
Afecc. Perinatales	3.69	3.13	3.01	3.39	3.59	3.75	3.65	3.65	3.65	3.54	3.58	3.44	3.40	3.58	3.54	3.57	3.92	3.63
Malform. Congenitas	1.56	1.58	1.55	1.62	1.60	1.78	1.76	1.88	1.90	1.66	1.63	1.48	1.49	1.56	1.47	1.46	1.58	1.64
Signos y Síntomas	0.99	1.20	1.22	1.22	1.22	1.16	1.09	1.21	1.35	1.30	1.43	1.30	1.32	1.24	1.21	1.18	1.16	1.21
Causas Externas	8.54	7.94	7.70	7.34	7.15	7.13	7.23	6.87	6.63	6.54	6.86	6.76	6.81	7.06	6.92	6.76	7.19	7.12
Controles de Salud	3.44	3.43	4.08	3.80	4.22	4.51	4.40	4.48	4.83	5.37	5.68	5.57	5.33	5.35	5.62	6.07	6.04	6.23
Códigos para propósitos especiales	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.04	0.03	0.01	0.00	0.01

Fuente: Información del Área de Estadísticas en Salud de la CCSS.

La idea de esta propuesta nace aproximadamente hace unos cinco años, después de haber visto la película francesa-norteamericana *La mariposa y la escafandra* (Le Scaphandre et le Papillon), basada en una historia real descrita en el libro autobiográfico del mismo nombre del editor francés Jean Dominique Bauby. En ella, se relata su propia situación tras sufrir un accidente vascular cerebral en el año de 1995.

Al salir del coma tres semanas más tarde, el accidente vascular cerebral deja como secuela al Sr. Bauby una cuadriplejía, restándole solo el movimiento en su ojo izquierdo, pero conservando su función cognitiva. Para lograr comunicarlo con el mundo exterior, se recurre a un sistema de alfabeto básico "aeiou" mediante un intérprete. Así, el Sr. Bauby fue capaz de escribir un libro y contar su experiencia al mundo. De aquí se inicia con la idea de proponer un diseño de un prototipo, utilizando un ordenador y un escáner para rastrear los movimientos del ojo y de esta manera, lograr una comunicación del paciente hacia sus semejantes a través de una interfaz digital y un computador.

Esta propuesta no solo abarca a los pacientes de síndrome de enclaustramiento, sino que también se extiende a todos aquellos pacientes con algún grado de cuadriplejía, inhabilidad para utilizar sus manos o expresar oralmente sus deseos.

Capítulo III. Propósito

a. Objetivo General

Proponer la utilización de una interfaz digital rastreadora del movimiento ocular de bajo costo conectado a un computador, para posibilitar o facilitar la comunicación de pacientes con cuadriplejias, algún grado de discapacidad motora, o anartria, para el manejo de tareas básicas en un computador, control de dispositivos eléctricos e interacción de los pacientes con el mundo exterior.

b. Objetivos Específicos

1. Identificar en el mercado tecnológico un rastreador de movimiento ocular eficaz y económico
2. Establecer mediante pruebas en un computador el grado de facilidad de utilizar el rastreador por personas voluntarias inmovilizadas con un cuello ortopédico para simular una cuadruplejia o restricción física para utilizar sus miembros superiores en tareas de comunicación e interacción con artefactos del hogar.
3. Proponer el modelo tecnológico basado en las pruebas realizadas para apoyar tareas de comunicación e interacción para personas con limitaciones de movilidad del tipo definido.
4. Demostrar que cualquier persona con un grado básico en el uso de un computador con ambiente Windows, puede utilizar el rastreador de movimiento ocular.

c. Hipótesis estadísticas

1. Para la variable tiempo para completar la tarea

H_0 : No existirán interacciones significativas entre las tareas y los intentos en el tiempo para completar cuatro tareas utilizando la interfaz digital rastreadora del movimiento ocular.

H_i : Existirán interacciones significativas entre las tareas y los intentos en el tiempo para completar cuatro tareas utilizando la interfaz digital rastreadora del movimiento ocular.

2. Para la variable dificultad para completar la tarea

H_0 : No existirán interacciones significativas entre las tareas y los intentos en la dificultad para completar cuatro tareas utilizando la interfaz digital rastreadora del movimiento ocular.

H_i : Existirán interacciones significativas entre las tareas y los intentos en la dificultad para completar cuatro tareas utilizando la interfaz digital rastreadora del movimiento ocular.

3. *Para la variable precisión al completar la tarea*

H_0 : No existirán interacciones significativas entre las tareas y los intentos en la precisión al completar cuatro tareas utilizando la interfaz digital rastreadora del movimiento ocular.

H_i : Existirán interacciones significativas entre las tareas y los intentos en la precisión al completar cuatro tareas utilizando la interfaz digital rastreadora del movimiento ocular.

Capítulo IV. Metodología

4.1 Diseño

El presente estudio fue aprobado por el comité de bioética de la Universidad de Costa Rica el martes 5 de diciembre del 2017. El formulario del consentimiento informado utilizado en el estudio se detalla en el anexo 1 Este trabajo de tesis se realizó con base en dos fases: un estudio piloto y un estudio cuasi-experimental.

Primero se utilizó un enfoque investigativo para la recopilación de información estadística de la CCSS, el CONAVI, literatura médica en el área neurológica y visitas al CENARE para consulta de los profesionales y poder determinar que existe una población de pacientes con restricciones físicas importantes que les incapacitan para realizar funciones ordinarias como el manejo de un computador o utilizar electrodomésticos de uso rutinario en nuestras casas y de esta manera proponer un dispositivo que pueda ser implementado para atender de forma viable, eficaz y eficiente las necesidades de estos pacientes en la comodidad de su hogar. Se obtuvieron conceptos claves que se presentan en un glosario en el anexo 2.

Luego, se profundizó sobre la tecnología de eye-trackers, e interfases Arduino, desarrolladas para conectarse a un computador y que ofrecieran opciones de compatibilidad y software amigable con el usuario, fue así que se adquirieron dos dispositivos eye-tracker y dos interfases Arduinos, que por su precio y características eran adecuadas para realizar nuestro estudio. También se revisaron estudios realizados con interfases eye-tracking y de asistencias tecnológicas implementadas en pacientes con algún grado de discapacidad neurológica.

Posteriormente, se realizó un estudio piloto con dos participantes, para finalmente utilizarlo en una fase cuasi-experimental con 23 voluntarios cuyas características de selección se describen más adelante y se guiaron e instruyeron en el uso del prototipo de eye-tracking e interfases Arduino para el control de electrodomésticos, utilizados en este estudio, con sus aportaciones fue posible diseñar una tabla para el ingreso y la anotación de las variables de tiempo, precisión y dificultad con el fin de su análisis posterior de resultados en la fase cuantitativa.

4.2 Participantes

Se reclutaron personas aparentemente sanas, que cumplieron con los siguientes criterios de inclusión: a) Individuo sano, b) Género: masculino o femenino, c) Mayor de 18 años, d) profesionales, ama de casa, estudiantes, e) Conocimientos básicos para la utilización de un

computador con ambiente Microsoft Windows, y f) Voluntario mediante un consentimiento informado previo para probar este prototipo de interfaz.

4.3 Procedimientos

1. Equipo

En este estudio se utilizó un programa en el lenguaje Arduino para controlar los dispositivos utilizados en este estudio: una lámpara, un radio y un ventilador. Se hace necesario para poder utilizar el hardware de la interface Arduino, su programación en el lenguaje Arduino específicamente desarrollado con una serie de instrucciones para programar al microcontrolador, para que este a su vez pueda emitir las señales digitales o análogas en sus puertos de salida y por medio de la interfase de potencia Arduino, con la utilización de relays de 250V y corriente necesaria para controlar los electrodomésticos utilizados en este estudio.

Para aprender la programación se recurrió a tutoriales provistos en YouTube y ejemplos de programas disponibles para el uso de descarga libre en Internet. Este lenguaje es de aprendizaje sencillo y práctico y permitió ahorrar recursos en la contratación de un programador profesional, lo cual hubiera aumentado el costo del proyecto.

A continuación, se presentan las secuencias de los programas para controlar los estados de los pines de salida del Arduino UNO, (low=apagado) y (high=encendido), para el encendido o apagado de los electrodomésticos utilizados en este proyecto. El usuario va a tener tres opciones en tres diferentes programas, tipo aplicación, en el escritorio de Windows, seleccionando estos programas, podrá ser capaz de controlar apagando o encendiendo a través de las tarjetas de interface Arduino conectadas por el USB al computador y este a su vez, a otra interfaz Arduino, pero de controladores para manipular:

Una lámpara (Programa 1), un radio (Programa 2) y un ventilador (Programa 3). Estos, por supuesto, son solamente unos ejemplos de electrodomésticos que se pueden conectar a este dispositivo y controlar para encender o apagar. La tarea consiste en que la persona pueda controlar con el movimiento de sus ojos, seleccionando los programas que están relacionados con el apagado o encendido del electrodoméstico que se elija y de esta manera, lograr una mayor autosuficiencia de sus cuidadores.

Programa 1. Código en lenguaje Arduino para el Control On/Off de Lámpara.

```
void setup () {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode (3, OUTPUT);
  digitalWrite (3, HIGH);
  delay (200);
  digitalWrite (3, LOW);
}
```

Programa 2. Código en lenguaje Arduino para el Control On/Off de Radio.

```

void setup () {
// put your setup code here, to run once:
pinMode (7, OUTPUT);
digital Write (7, HIGH);
delay (200);
digitalWrite (7, LOW);
}

```

Programa 3. Código en lenguaje Arduino para el Control On/Off de Ventilador.

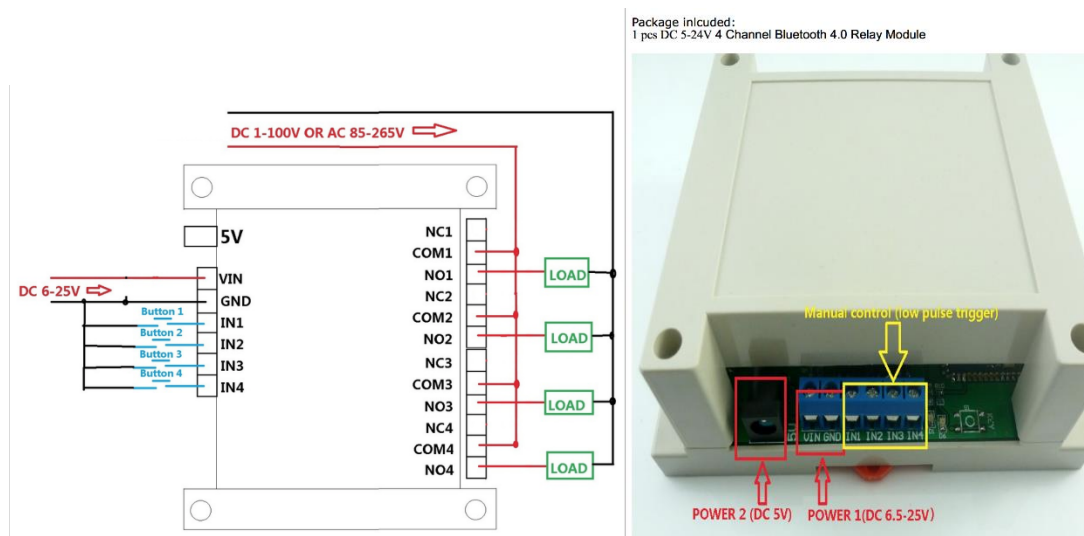
```

void setup () {
// put your setup code here, to run once:
pinMode (11, OUTPUT);
digital Write (11, HIGH);
delay (200);
digital rite (11, LOW);
}

```

La tarjeta de Interfaz Arduino para la etapa de potencia está equipada con controladores opto eléctricos (switches ópticos) y relays (interruptores controlados por bobinas electromagnéticas), como se muestra en la Figura 27. Estos se conectan a los puertos de salida del Arduino UNO etapa de control de baja potencia conectada al puerto USB del computador, que por medio de los programas Arduino instalados en el escritorio de Windows 10 administrara el encendido o apagado de estos dispositivos. El funcionamiento es el siguiente: dependiendo cuál puerto de salida es activado o desactivado en la etapa de baja potencia por los programas de activación o desactivación de los tres electrodomésticos, los drivers, controladores opto eléctricos y relays instalados en la etapa de potencia conmutarán el suministro eléctrico de 110v de corriente alterna en estado ON (encendido con electricidad) u OFF(apagado sin electricidad) de esta manera cada uno de los electrodomésticos: lámpara, radio y ventilador ,el usuario podrá activar o desactivar a voluntad desde el escritorio del Windows de su computador completamente independiente de sus cuidadores.

Figura 27. Interfaz Arduino equipada con módulos de potencia (drivers y relays) para controlar los electrodomésticos: lámpara, radio y ventilador.



Fuente: <https://www.aliexpress.com/item/32548138767.html>

Los pasos para utilizarlo son los siguientes:

- Paso 1. Se sienta al individuo cómodamente frente al computador a una altura apropiada y ergonómica, en un ambiente tranquilo con luz adecuada.
- Paso 2. Al participante se le coloca un cuello ortopédico fijo tipo Thomas, para simular las restricciones que tendría un paciente cuadripléjico y mantenerse sentado lo más quieto posible.
- Paso 3. Se le solicita mantenerse callado y concentrado con su vista enfocada en la pantalla del computador.
- Paso 4. Se calibra la interfaz Tobii 4C a la distancia, altura y área visual del participante.
- Paso 5. Se le explica el manejo básico de la aplicación para que él mismo sea capaz de utilizarla independientemente.
- Paso 6. Se le permite practicar con un utilitario incluido en el software.
- Paso 7. Se le toma el tiempo con un cronómetro para medir cuánto dura en llevar a cabo cada una de las tareas para cargar y ejecutar las aplicaciones de Windows detalladas más abajo en las tablas de registro.
- Paso 8. Se realizan pruebas con la interfaz Arduino para controlar dispositivos eléctricos con el movimiento ocular y se toma el tiempo.
- Paso 9. Al mismo tiempo se observa y registra según la escala de criterios definidos para las variables de dificultad y precisión al realizar cada una de las tareas asignadas y se anota en las tablas de registro.

- j. Paso 10. Se registran los datos en una tabla para cada uno de los tres intentos realizados.

4.4 Variables dependientes

- a. Criterios para la medición del tiempo de ejecución (velocidad):
 - i. Se realizarán tres pruebas sin límite de tiempo en cada tarea, para evaluar y registrar tiempo de ejecución, para cargar y utilizar un correo electrónico, navegar y leer un artículo en Internet, ejecutar una llamada por Skype, escribir y grabar una línea en Ms Word y digitar una oración para ser reproducida en el sintetizador de voz. Además, deberán encender y apagar tres electrodomésticos: una lámpara, un radio y un ventilador, utilizando los programas y la interfaz Arduino, conectadas al puerto USB del computador.
 - ii. Los resultados obtenidos fueron registrados en tres tablas para tiempo de ejecución.
- b. Criterios para la medición de la dificultad en la ejecución de tareas
 - i. 5: Valor máximo de dificultad. El participante falla 5 veces o más para enfocar firmemente un punto, rastrear el cursor y mantener la posición en frente del dispositivo
 - ii. 4: El participante falla 4 veces para enfocar firmemente un punto, rastrear el cursor y mantener la posición en frente del dispositivo
 - iii. 3: El participante falla 3 veces para enfocar firmemente un punto, rastrear el cursor y mantener la posición en frente del dispositivo
 - iv. 2: El participante falla 2 veces para enfocar firmemente un punto, rastrear el cursor y mantener la posición en frente del dispositivo
 - v. 1: Valor mínimo de dificultad. El participante falla 1 vez para enfocar firmemente un punto, rastrear el cursor y mantener la posición en frente del dispositivo.
- c. Criterios para la medición de la precisión en la ejecución de tareas
 - i. Puntaje del 1 al 5 en precisión por la tarea y puntaje del 1 al 5 para dificultad al realizar la tarea asignada.
 - ii. Criterios para asignar los puntajes de precisión:
 - a. 1: Valor mínimo. El participante falla 5 veces para dar el clic con el puntero al ícono de la aplicación.

- b. 2: El participante falla 4 intentos para dar el clic con el puntero al ícono de la aplicación.
 - c. 3: El participante falla 3 intentos para dar el clic con el puntero al ícono de la aplicación.
 - d. 4: El participante falla 1 o 2 intentos para dar el clic con el puntero al ícono de la aplicación.
 - e. 5: Valor máximo. El participante no falla para dar el clic con el puntero al ícono de la aplicación.
- iii. Se registraron los resultados de las pruebas en una tabla y se tabularon estos valores, para después analizarlos estadísticamente.

4.5 Análisis Estadístico

Se utilizó el IBM SPSS Statistics, versión 21 (IBM Corp., Armonk, NY) para realizar los análisis estadísticos. Los valores se presentan como la media (M) y la desviación estándar (DE). Se utilizaron pruebas inferenciales de ANOVA de dos vías (4 tareas x 3 intentos) de medidas repetidas. En caso de encontrarse interacciones significativas se procedió a realizar en análisis de efectos simples, post hoc de Bonferroni y se obtuvo el porcentaje de varianza explicada parcial por medio de η^2 . Se consideró a priori, una significancia estadística de $p < 0.05$.

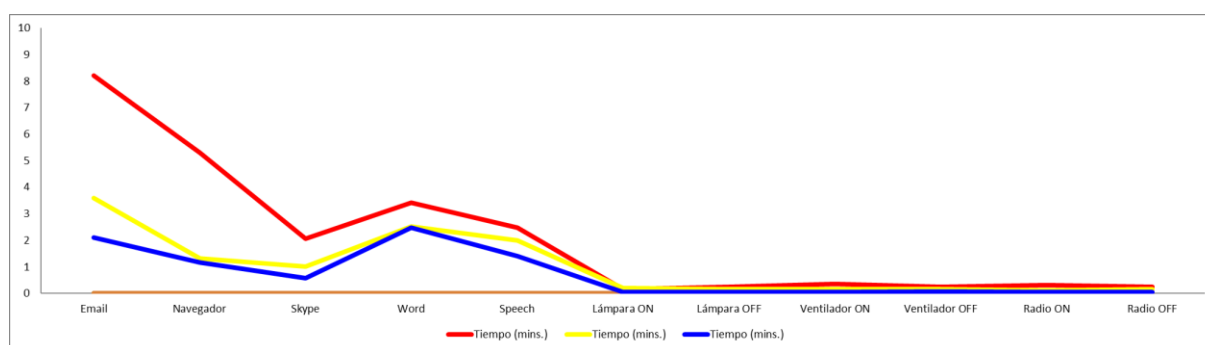
Tabla 2. Curva de aprendizaje, según las tareas ejecutadas y su evaluación mediante puntaje para el participante 1, en su segundo intento.

	Email	Navegador	Skype	Word	Speech	Lámpara ON	Lámpara OFF	Ventilador ON	Ventilador OFF	Radio ON	Radio OFF
Tiempo (mins.)	3,59	1,32	1,00	2,52	2,00	0,20	0,15	0,15	0,15	0,10	0,15
Precisión	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Errores	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0
Dificultad	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 3. Curva de aprendizaje, según las tareas ejecutadas y su evaluación mediante puntaje para el participante 1, en su tercer intento.

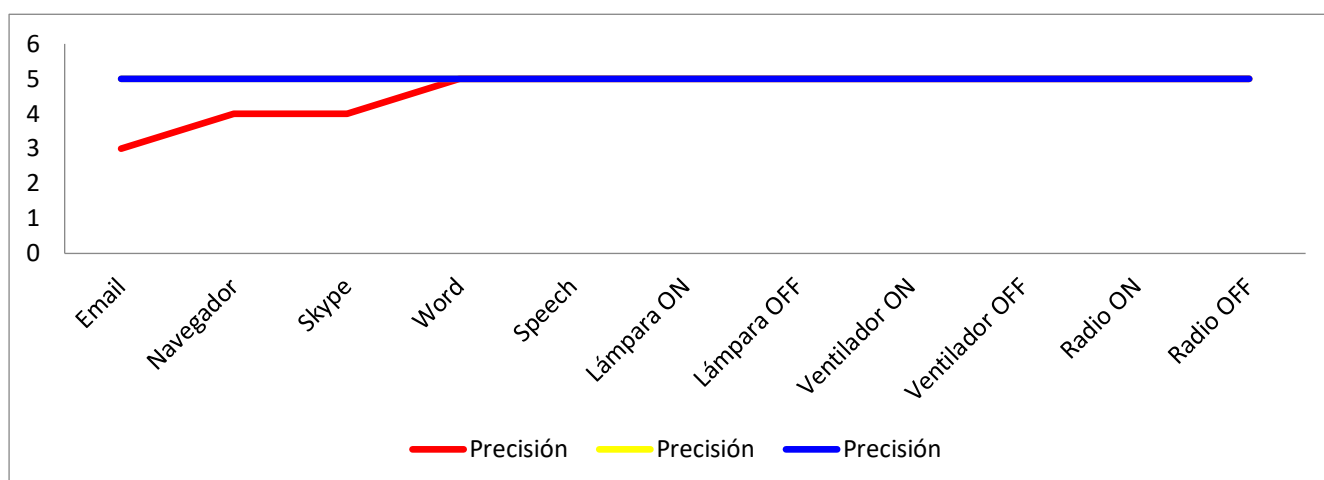
	Email	Navegador	Skype	Word	Speech	Lámpara ON	Lámpara OFF	Ventilador ON	Ventilador OFF	Radio ON	Radio OFF
Tiempo (mins.)	2,11	1,17	0,58	2,47	1,40	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,04
Precisión	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Errores	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
Dificultad	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Datos recolectados de los tres intentos registrados en las tablas: primer intento (Tabla 1 en color rojo), segundo intento (Tabla 2 en color amarillo) y tercer intento (Tabla 3 en color azul). En el eje Y tiempo en minutos y en el eje X las tareas y aplicaciones ejecutadas y completadas según los parámetros indicados anteriormente. En el Gráfico 1, se observa como el participante número 1 tuvo problemas en su primer intento, línea en rojo, para completar las tareas en un tiempo razonable. Por ejemplo, puede verse su tiempo de más de ocho minutos para cargar la aplicación de E-mail, revisar un correo, crear uno nuevo y enviarlo. También se demoró más de cinco minutos en abrir el navegador para realizar una búsqueda de un sitio predefinido, mismos casos en las aplicaciones de Skype, Ms Word y Speech; sin embargo, en su segundo intento en la línea de color verde, se puede observar una franca mejoría al bajar sus tiempos a menos de 50% para ejecutar estas aplicaciones. En su último intento, en la línea de color azul, logró su mejor tiempo para completar estas tareas.

Gráfico 1. Tiempo del participante 1 para ejecutar diferentes tareas en Microsoft Windows 10

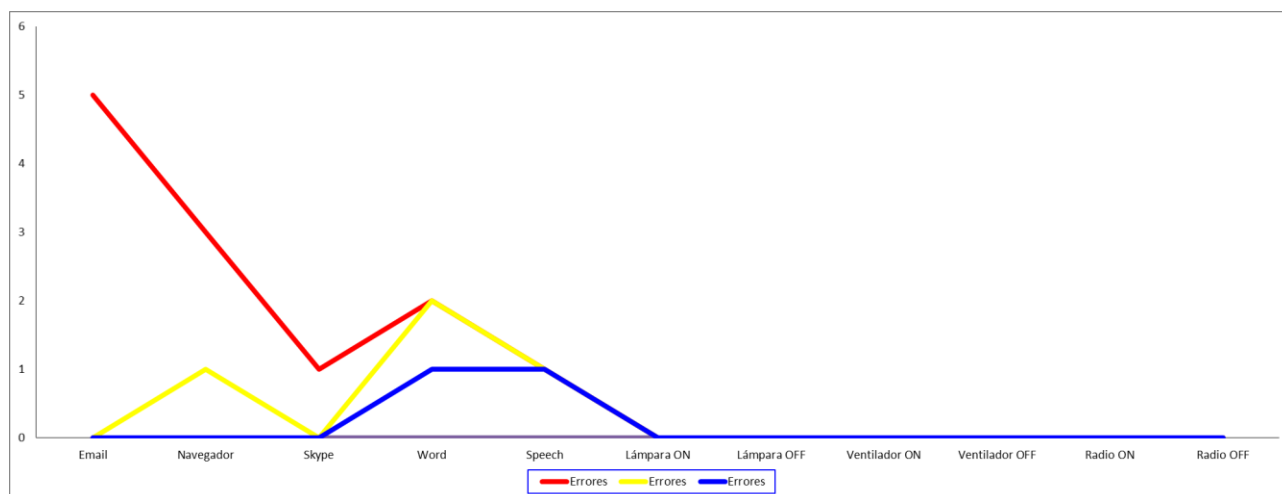
En cuanto a las tareas de encender o apagar los dispositivos electrónicos controlados desde el escritorio de Windows a través de las interfaces de Arduino también hubo una mejoría de más de 50% del tiempo en cada intento.

En el Gráfico 2 se observa en la línea en rojo, como el participante 1 tuvo muy pocos problemas de precisión en su primer intento al ejecutar el *E-mail*, navegador, Skype y Word. Llevó el puntaje de la precisión al máximo en el segundo intento, esta línea es amarilla, pero está superpuesta por la azul al obtener el mismo puntaje en su segunda y tercera prueba, manteniendo así su máxima precisión de cinco puntos.

Gráfico 2. Precisión en la ejecución de las tareas en cada intento del participante 1

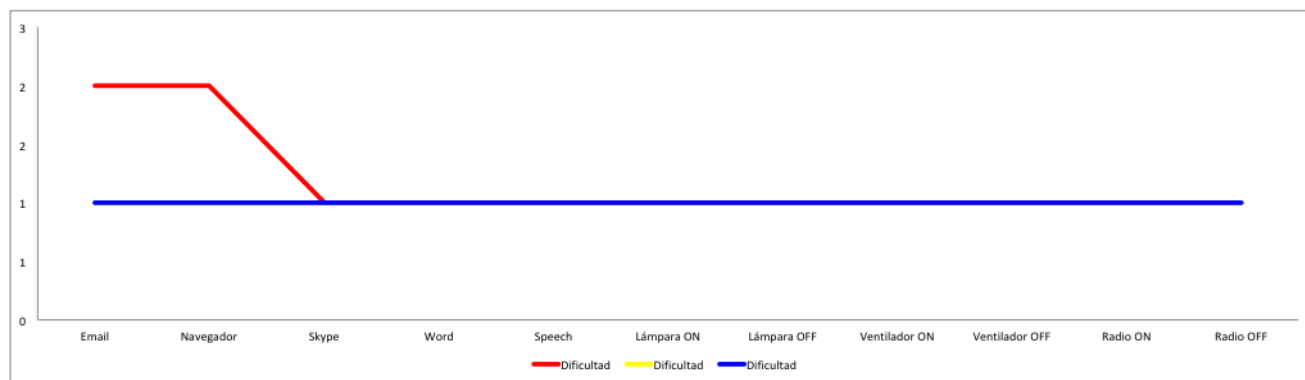
En el Gráfico 3 se observa una disminución marcada desde de los errores cometidos en el primer intento en la línea roja hasta el segundo en amarillo y tercero en azul, especialmente en el momento de seleccionar la activación y desactivación de los electrodomésticos.

Gráfico 3. Errores cometidos durante la ejecución de tareas en los tres intentos del participante 1



En el Gráfico 4, se puede observar que el nivel de dificultad fue el mínimo obtenido desde el primer intento, mostrado por la línea roja el puntaje de 2, el menor puntaje obtenido en el primer intento hasta el segundo y tercer intento en donde los puntajes llegaron a 1 los menores valores de dificultad obtenidos, la línea amarilla del segundo intento está superpuesta por la línea azul del tercer intento al obtener los mínimos valores iguales a 1 en dificultad de ejecución.

Gráfico 4. Nivel de dificultad en los tres intentos del participante 1



A continuación, se presentan las tablas y gráficos del participante 2, durante sus tres pruebas para la ejecución de aplicaciones y tareas desde el ambiente MS Windows 10 (Tabla 4, 5 y 6).

Tabla 4. Medición para la curva de aprendizaje, según las tareas ejecutadas y su evaluación mediante puntaje para el participante 2

	Email	Navegador	Skype	Word	Speech	Lámpara ON	Lámpara OFF	Ventilador ON	Ventilador OFF	Radio ON	Radio OFF
Tiempo (mins.)	4,05	1,23	1,41	7,11	3,29	0,12	0,12	0,12	0,27	0,25	0,04
Precisión	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Errores	1	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0
Dificultad	8	8	8	8	8	5	5	5	5	5	5

Tabla 5. Medición para la curva de aprendizaje, según las tareas ejecutadas y su evaluación mediante puntaje para el participante 2

	Email	Navegador	Skype	Word	Speech	Lámpara ON	Lámpara OFF	Ventilador ON	Ventilador OFF	Radio ON	Radio OFF
Tiempo (mins.)	3,52	1,57	1,08	3,04	2,44	0,20	0,24	0,25	0,47	0,26	0,10
Precisión	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Errores	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dificultad	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4

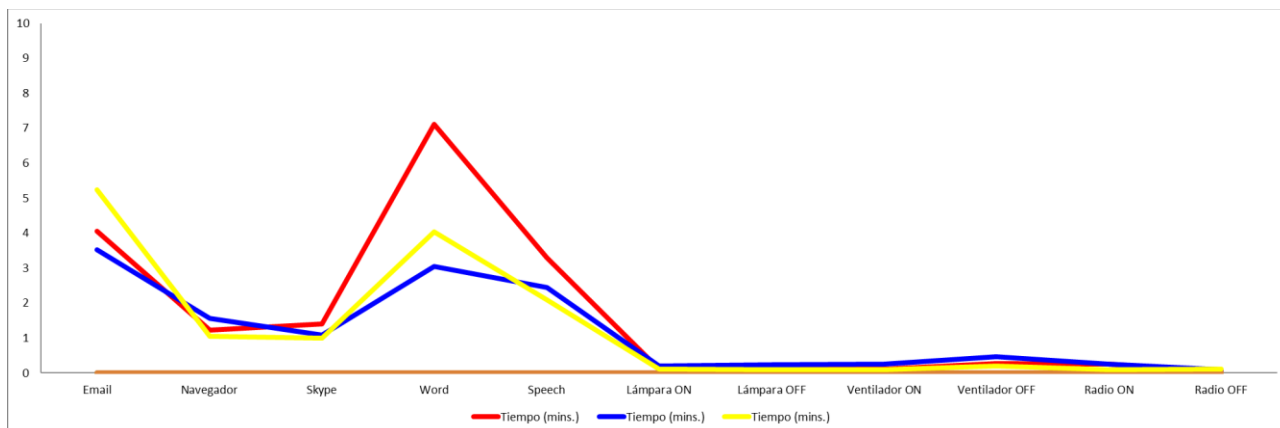
Tabla 6. Medición para la curva de aprendizaje, según las tareas ejecutadas y su evaluación mediante puntaje para el participante 2.

	Email	Navegador	Skype	Word	Speech	Lámpara ON	Lámpara OFF	Ventilador ON	Ventilador OFF	Radio ON	Radio OFF
Tiempo (mins.)	5,24	1,05	1,00	4,04	2,10	0,11	0,10	0,10	0,20	0,10	0,11
Precisión	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Errores	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dificultad	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2

En el Gráfico 5 (relativo al participante 2), se puede observar una mejoría notable desde su primer intento, línea en rojo, pasando por su segundo intento línea en amarillo, sus tiempos más lentos en su primer intento se ven en la ejecución de las aplicaciones Word y Speech y finalmente, en la línea azul, sus mejores tiempos de ejecución de las aplicaciones y tiempos

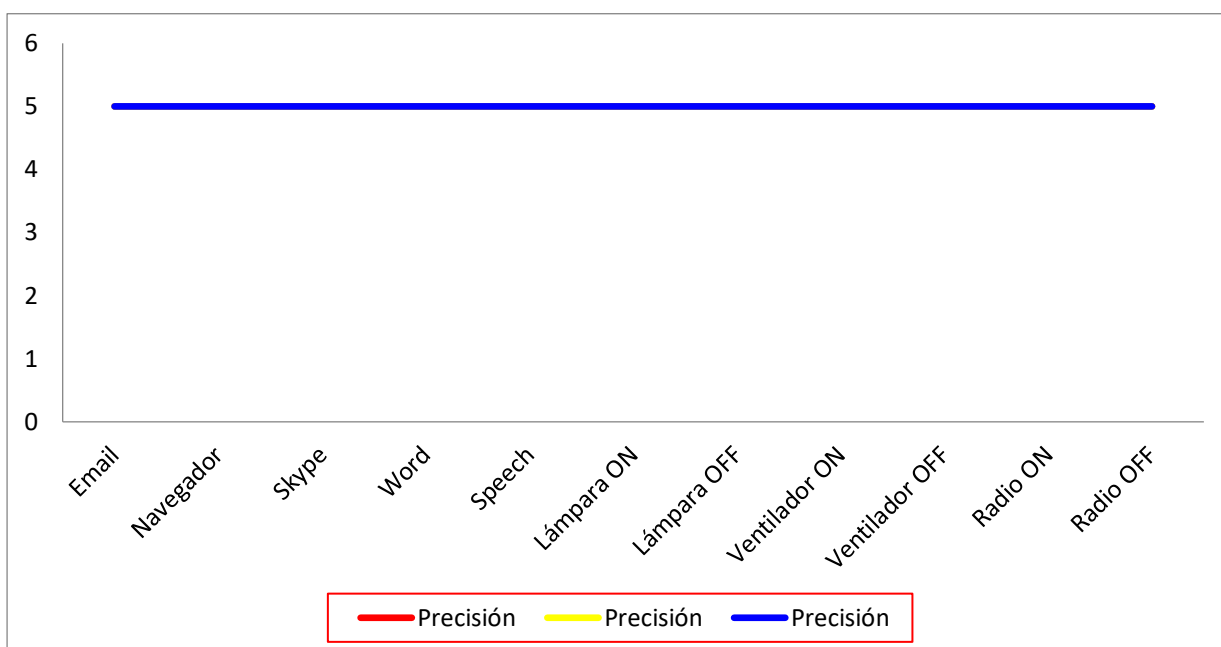
muy reducidos en las tareas de activación y desactivación de los electrodomésticos desde el escritorio del Windows 10.

Gráfico 5. Comparación de los tiempos en minutos necesarios para ejecutar diferentes tareas en ambiente de Microsoft Windows versión 10 del participante 2



En el Gráfico 6, el *flat line* en azul indica que el participante 2 tuvo una excelente precisión desde su primer intento hasta el final. Las líneas rojas del primer intento y la amarilla del segundo están superpuestas por la línea azul del tercer intento, al tener el mismo puntaje máximo de precisión cinco puntos en los tres intentos.

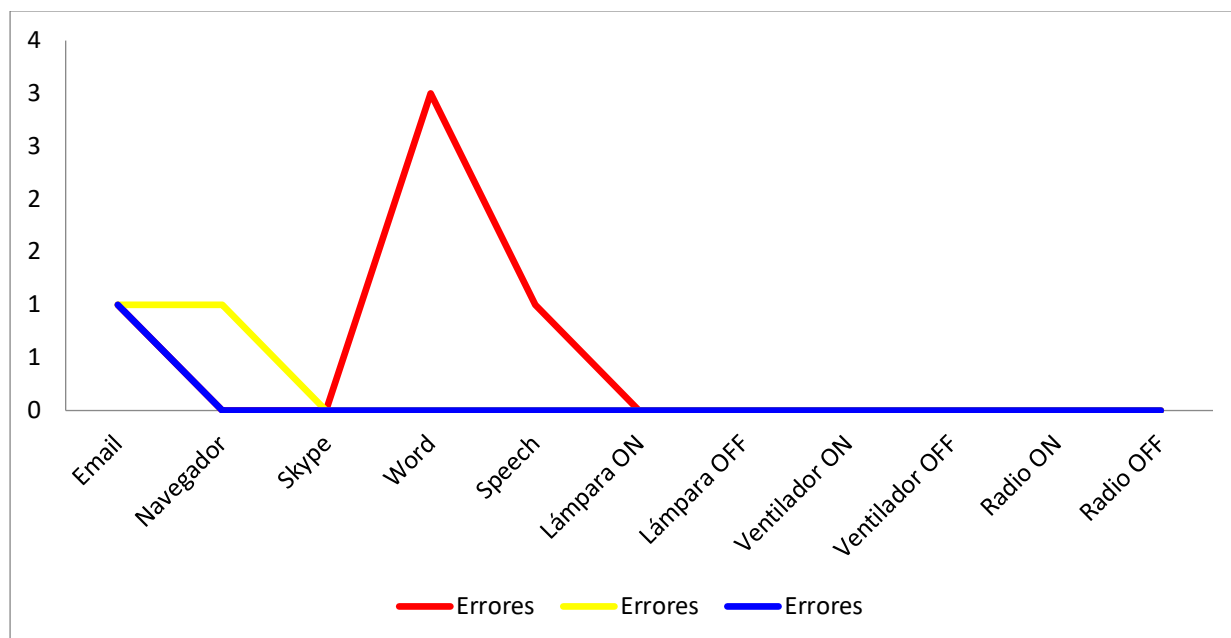
Gráfico 6. Comparación de la precisión en la ejecución de las tareas en los tres intentos del participante 2



En el Gráfico 7, el participante 2 tuvo varios errores en su primer intento (línea roja), principalmente en las aplicaciones de Skype, Word y Speech. En su segundo intento tuvo errores marcados en el navegador y en su tercer intento, su error fue a la hora de ejecutar el

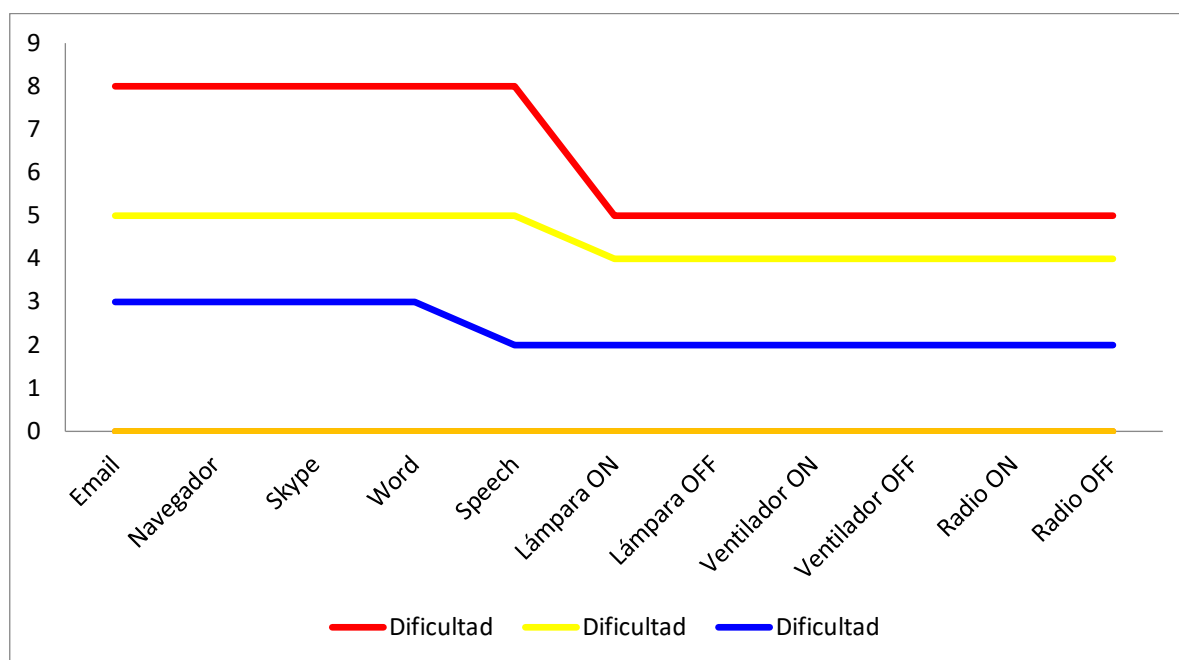
correo. Todas las demás aplicaciones y tareas las realizó prácticamente sin errores en su tercer intento.

Gráfico 7. Comparación de errores cometidos durante la ejecución de tareas de los tres intentos del participante 2



En el Gráfico 7, el participante 2 presentó muchas dificultades en su primer intento (línea roja) para ejecutar las aplicaciones y tareas; sin embargo, logró mejorar bastante en su segundo intento en amarillo y su mejor intento, línea azul, obtuvo una gran mejoría en comparación con el primero.

Gráfico 8. Comparación de las dificultades en la realización de las tareas en los tres intentos del participante 2



5.2 Estudio cuasi-experimental con 23 participantes.

Se realizó este segundo estudio controlado con una población de 23 participantes, para verificar los hallazgos del estudio piloto y obtener la confiabilidad a las pruebas. Se mantuvo el mismo criterio de selección anterior y se modificaron las tareas a realizar, según se detalla seguidamente. Esta vez se utilizaron las aplicaciones para Windows de email, el navegador Internet Explorer y la aplicación para comunicación a distancia por llamada telefónica a través de Internet Skype.

En cuanto a los programas de la interfaz Arduino para controlar el encendido y apagado de la lámpara, el ventilador y el radio, se realizó la secuencia de encendido y apagado como una sola tarea completa y se tomó el tiempo para realizarla, así como la precisión y la dificultad total de la asignación, utilizando los criterios mencionados en el procedimiento anterior.

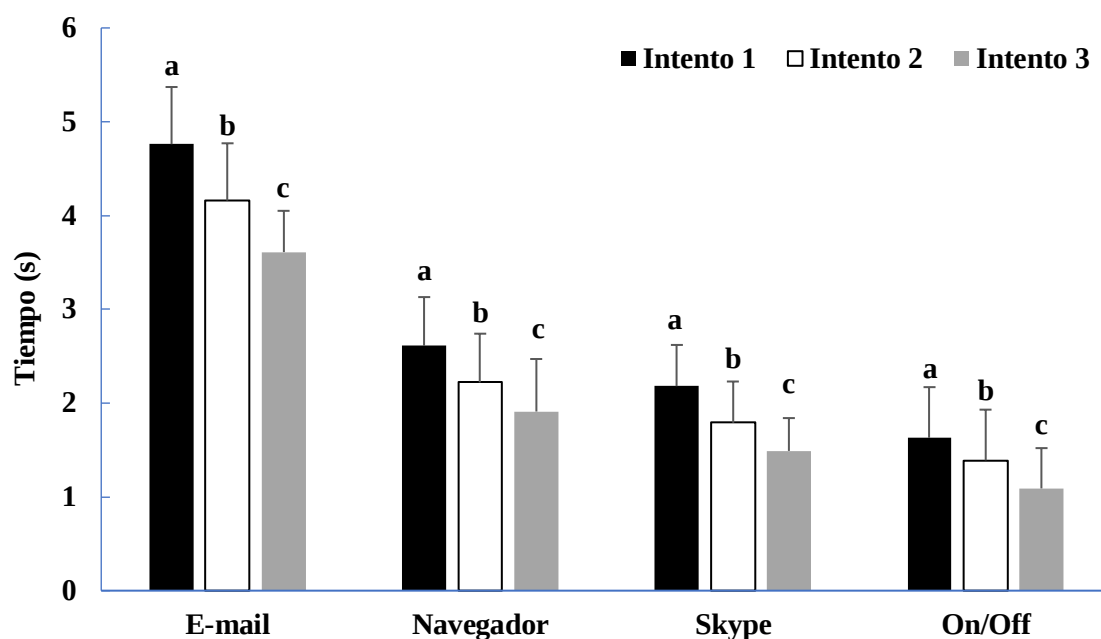
En la Tabla 11 se presenta la estadística descriptiva de las variables medidas en los tres intentos y las cuatro tareas. Los valores representan la $M \pm DE$. La prueba de ANOVA encontró una interacción significativa entre las tareas y los intentos en los tiempos promedio ($p < 0.001$, $\eta^2 = 20.5$), así como efectos principales significativos para la tarea ($p < 0.001$, $\eta^2 = 92.8$) e intentos ($p < 0.001$, $\eta^2 = 81.8$). El análisis de la interacción indicó que, dentro de cada tarea, el tiempo para completar la tarea disminuyó significativamente ($p < 0.05$) del primer al segundo intento, y del segundo al tercer intento. También, hubo una reducción significativa

del tiempo ($p < 0.05$) entre el primer y tercer intento en cada tarea (Gráfico 8). Esto demuestra que, en cada tarea, hubo un efecto de aprendizaje significativo, y que la tarea más rápida de completar fue el On/Off Lámpara-ventilador-radio, seguida de Skype, Navegador y el E-mail, pues entre todas estas tareas hubo diferencias significativas ($p < 0.05$, Gráfico 9).

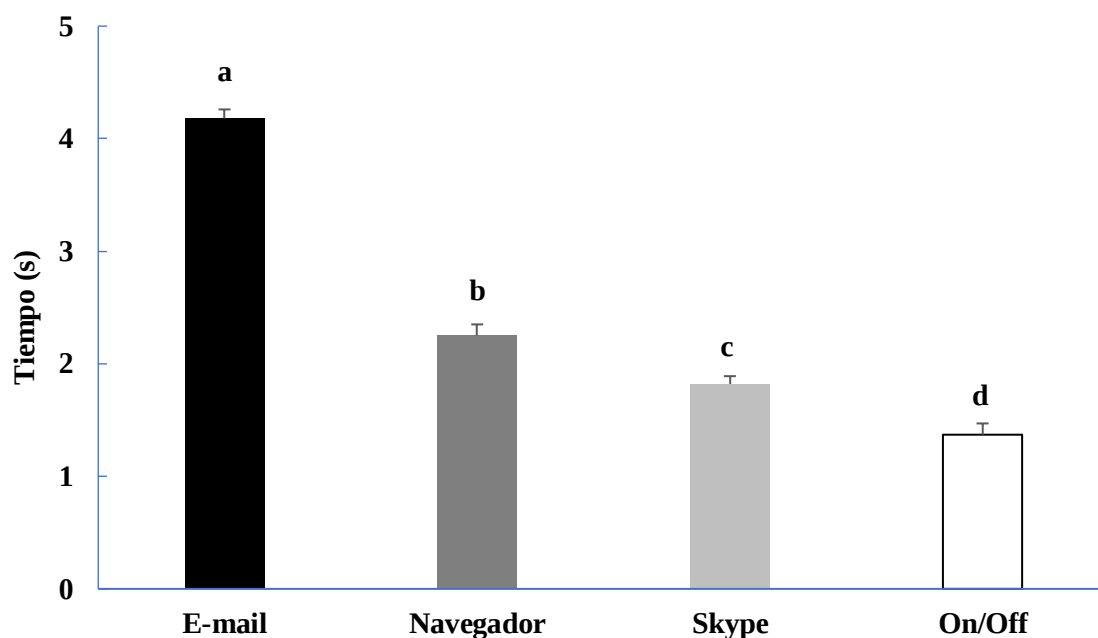
Tabla 11. Estadísticas descriptivas de las pruebas realizadas a los participantes (n=23).

Intentos	E-mail			Navegador			Skype			On/Off Lámpara-ventilador-radio		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Tiempo	4.76 ± 0.61	4.16 ± 0.56	3.61 ± 0.44	2.61 ± 0.52	2.22 ± 0.52	1.91 ± 0.56	2.18 ± 0.44	1.79 ± 0.37	1.49 ± 0.35	1.63 ± 0.54	1.39 ± 0.59	1.09 ± 0.43
Dificultad	2.74 ± 0.96	1.83 ± 0.72	1.13 ± 0.46	2.61 ± 0.94	1.65 ± 0.83	1.17 ± 0.49	2.13 ± 0.87	1.61 ± 0.66	1.04 ± 0.21	2.04 ± 0.88	1.43 ± 0.59	1.00 ± 0.00
Precisión	3.39 ± 0.78	4.04 ± 0.56	4.83 ± 0.39	3.52 ± 0.73	4.17 ± 0.58	4.87 ± 0.46	3.87 ± 0.69	4.48 ± 0.51	4.96 ± 0.21	3.74 ± 0.86	4.43 ± 0.51	4.96 ± 0.21

Nota. Los valores son M ± DE.

Gráfico 9. Tiempo utilizado para completar la tarea en tres intentos (n=23)

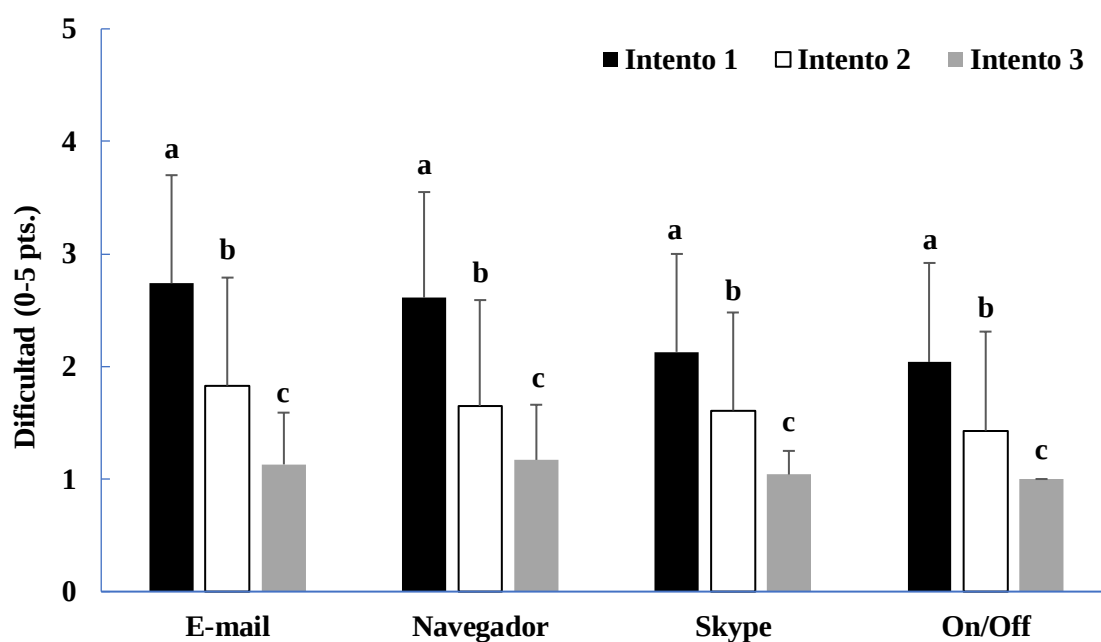
Nota. Los valores son $M \pm DE$. Las letras diferentes en cada tarea denotan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre los intentos.

Gráfico 10. Tiempo promedio utilizado para completar las tareas (n=23)

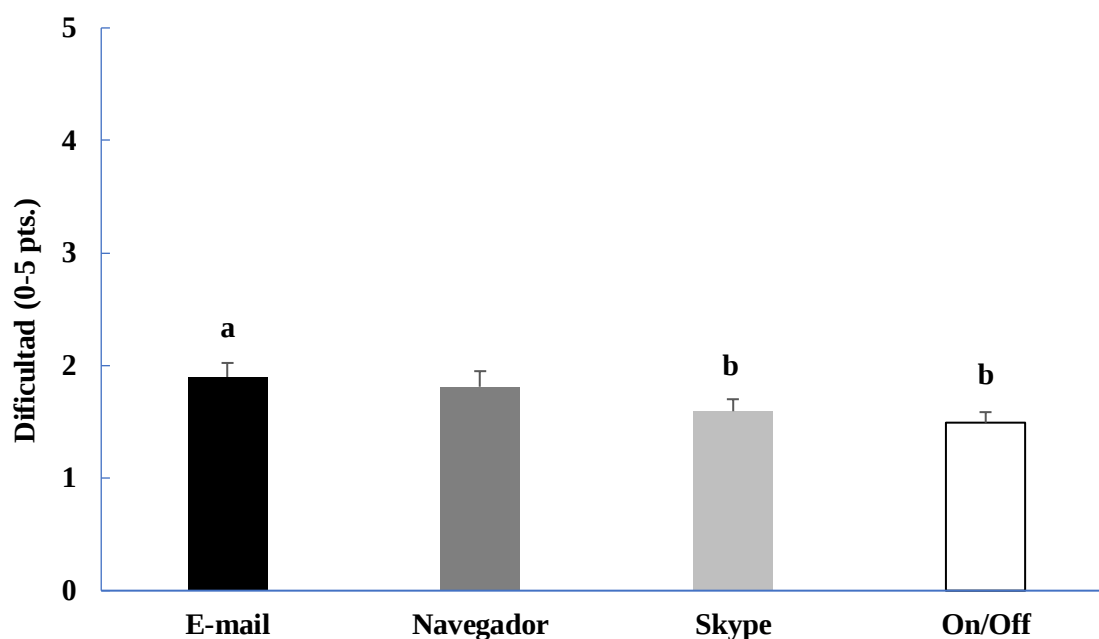
Nota. Los valores son $M \pm DE$. Las letras diferentes en cada tarea denotan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

La prueba de ANOVA encontró una interacción significativa entre las tareas y los intentos en la percepción de dificultad promedio ($p < 0.001$, $\eta^2 = 18.1$), así como efectos principales significativos para la tarea ($p < 0.001$, $\eta^2 = 26.0$) e intentos ($p < 0.001$, $\eta^2 = 71.8$). El análisis de la interacción indicó que dentro de cada tarea, la dificultad para completar la tarea disminuyó significativamente ($p < 0.05$) del primer al segundo intento, y del segundo al tercer intento. También hubo una reducción significativa de la dificultad ($p < 0.05$) entre el primer y tercer intento en cada tarea (Gráfico 11). Esto demuestra que en cada tarea, hubo un efecto de aprendizaje significativo, y que la tarea con menor dificultad fue el On/Off Lámpara-ventilador-radio, seguida de Skype, Navegador y el E-mail. Al comparar las tareas entre sí, no hubo diferencias en el promedio de dificultad entre E-mail y Navegador ($p = 1.00$), entre Navegador y Skype ($p = 0.290$), entre Navegador y On/Off Lámpara-ventilador-radio ($p = 0.145$), entre Skype y On/Off Lámpara-ventilador-radio ($p = 0.658$). Si hubo diferencias entre E-mail y Skype ($p = 0.006$), y entre E-mail y On/Off Lámpara-ventilador-radio ($p = 0.006$, Gráfico 12).

Gráfico 11. Dificultad percibida para completar la tarea en tres intentos (n=23)



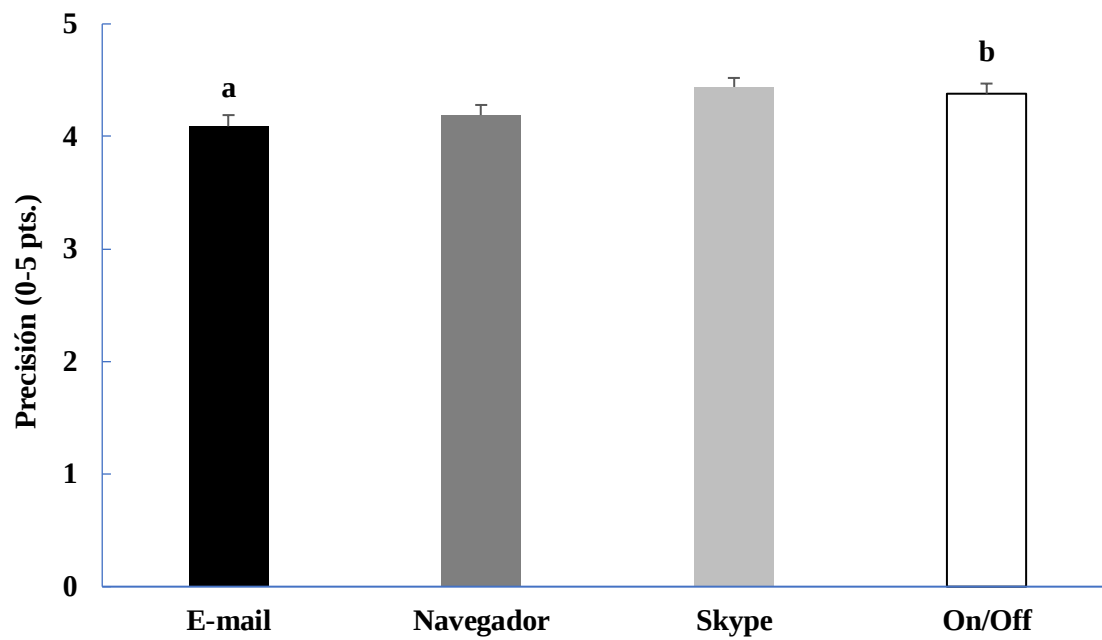
Nota. Los valores son $M \pm DE$. Las letras diferentes en cada tarea denotan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre los intentos.

Gráfico 12. Dificultad promedio para completar las tareas (n = 23)

Nota. Los valores son $M \pm DE$. Las letras diferentes en cada tarea denotan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

La prueba de ANOVA no encontró una interacción significativa entre las tareas y los intentos en la precisión promedio ($p = 0.186$, $\eta^2 = 6.3$). Se encontraron efectos principales significativos para la tarea ($p < 0.001$, $\eta^2 = 36.4$) e intentos ($p < 0.001$, $\eta^2 = 76.2$). Al comparar las tareas entre sí, independientemente de los intentos, no hubo diferencias en el promedio de precisión entre E-mail y Navegador ($p = 0.538$), entre Skype y On/Off Lámpara-ventilador-radio ($p = 1.00$), y entre Navegador y On/Off Lámpara-ventilador-radio ($p = 0.095$). Si hubo diferencias entre e-mail y Skype ($p < 0.001$) y entre E-mail y On/Off Lámpara-ventilador-radio ($p = 0.006$, Gráfico 13). La precisión aumentó en cada intento, independientemente de las tareas. La precisión fue mayor en el tercer intento ($M = 4.90 \pm 0.04$ pts.), luego en el segundo ($M = 4.28 \pm 0.09$ pts.), y finalmente en el primero ($M = 3.63 \pm 0.15$ pts.). El análisis post hoc de Bonferroni indicó que las diferencias promedio entre los tres intentos fueron estadísticamente significativas entre sí ($p < 0.001$).

Gráfico 13. Precisión promedio al completar las tareas (n=23)



Nota. Los valores son $M \pm DE$. Las letras diferentes en cada tarea denotan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

Capítulo VI. Discusión

Se realizaron en este estudio pruebas para dos grupos de participantes. El primer grupo constaba de dos personas que eran ingenieros expertos en sistemas de computación, a ellos se les asignó el primer set de pruebas que consistían en cargar las aplicaciones comunes para los usuarios de Ms Windows, tales como correo electrónico Ms email, procesador de palabras Ms Word, llamadas con Skype, herramienta utilitaria para convertir texto en voz Speech y finalmente encender y apagar tres electrodomésticos: una lámpara de escritorio, un ventilador y un radio.

Sus primeros intentos mostraron cierta dificultad y cometieron varios errores en cuanto a la precisión de selección y tiempos en realizar la tarea asignada, aunque ningún error grave que no les permitiera terminar la prueba. En sus segundo y tercer intentos se observó un incremento considerable de precisión, baja dificultad y casi ningún error al ejecutar las tareas.

Fue importante observar el manejo de esta tecnología asistida por un par de profesionales en el campo de la computación y electrónica para obtener su perspectiva profesional y valorar su rendimiento, ya que, se esperaba que la adaptación a este tipo de tecnología sería naturalmente adquirida; sin embargo, el resultado fue muy similar al de los 23 participantes de la segunda etapa, lo cual permite analizar que para el empleo de esta tecnología de eye-tracking no es relevante un *background* o bases expertas en el campo de la computación permitiendo de esta manera el acceso a un usuario común y ordinario de programas de cómputo como el Ms Windows.

Las tareas para los participantes fueron las mismas ejecuciones, ordinarias y comunes que cualquier usuario podría realizar utilizando sus extremidades superiores en un computador en el ambiente Windows al cargar los programas, aplicaciones o tareas, con la salvedad por supuesto, de que los participantes solo podían utilizar el movimiento de sus ojos para que el eye-tracking transdujera esto en movimientos del cursor del mouse para utilizar los diferentes programas en el ambiente Windows y por medio de las interfaces Arduino, poder controlar la activación o desactivación de los electrodomésticos, en este caso, encender o apagar un radio, un ventilador y una lámpara.

En comparación con varios estudios en el campo de la tecnología asistida realizados en diferentes partes del mundo, tales como el estudio de la universidad Linköping en suecia del año 2015 con jóvenes adolescentes y niños con PCI⁵⁰ y el estudio colombiano del prototipo para personas con diferentes discapacidades neurológicas, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas⁵¹, y otros, concluyeron con resultados muy similares a nuestro

estudio, en cuánto a una curva de aprendizaje aumentada al realizar las tareas asignadas a los participantes; con un avance progresivo en las categorías de tiempo, precisión, dificultad y una mayor familiaridad del participante con el dispositivo de asistencia tecnológica entre los tiempos de utilización del mismo. Esto quedó demostrado al ejecutar las pruebas de todos los 23 participantes y analizados y probados estadísticamente con la prueba de ANOVA.

Las pruebas realizadas a los participantes demostraron una amplia mejoría muy importante en sus destrezas en cada intento realizado. El manejo del cursor del mouse era cada vez más preciso, sin errores, menos dificultad y en menos tiempo para ejecutar las tareas en el ambiente Windows asignadas en cada prueba.

Se notó un mejor desempeño cuanto más joven era el participante, aunque los participantes de mayor edad superaron sus propios resultados en cada intento, demostrando que el aprendizaje se da entre más práctica se realice con el dispositivo sin importar su edad. En cuanto a la calibración del eye-tracker entre era más cuidadosamente preparada mejor eran los tiempos y resultados en cada prueba, por lo que esta parte de la preparación de las pruebas es vital en los resultados.

Es muy importante señalar que ninguno de los participantes habían utilizado anteriormente un eye-tracker para controlar aplicaciones y tareas en el ambiente Windows, aunque sí sabían utilizar y manejar un computador con ambiente Windows con un mouse y teclado normal, las diferentes aplicaciones.

En las dos pruebas realizadas, tanto para los 2 como para los 23 participantes se observa que en sus primeros intentos fueron difíciles en cuanto a la precisión y un grado alto de dificultad a la hora de mover el cursor y elegir el ícono apropiado para cada función o aplicación, por esto se deduce que existe un periodo de ajuste y aprendizaje para poder utilizar el eye-tracker cómodamente y eficientemente.

Por ejemplo, en el tiempo utilizado para mover el mouse, elegir los íconos con precisión y con pocos errores de ejecución y menos dificultad en cada intento fue mejorando a partir del segundo intento y mucho mejor en el tercero.

Este resultado era esperado, ya que, los movimientos oculares son controlados por estructuras neurológicas que se programan para ejecutar estos movimientos como es el sistema piramidal, incluyendo la corteza prefrontal y frontal, células de Betz, núcleos basales, núcleos craneales encargadas de llevar el impulso nervioso voluntario a los músculos extraoculares y regulando en cada intento con motora fina se encuentra el sistema extrapiramidal constituido principalmente por el cerebelo, este último con las millones de neuronas en su neocorteza regula y hace que el movimiento sea cada vez más preciso que el

anterior. Este aprendizaje establece más conexiones y hace que la ejecución de las tareas sea más sencillas cuanto más tiempo es utilizado esta ruta de impulsos nerviosos, haciendo las sinapsis entre estas neuronas sólidas y listas para la próxima vez que se realicen los movimientos extraoculares. Esto hace que la tecnología empleada en el presente estudio sea eficaz y eficiente para implementarla en personas que tienen limitaciones o restricciones de movimiento del cuello para abajo, pero que conservan intacto su sistema neurológico superior y estado de conciencia en condiciones normales para razonar y aspiraciones por superación y con la ayuda de esta tecnología seguir siendo útiles para ellos mismos y la sociedad que les rodea.

Con el afán de obtener resultados en una muestra más significativa, en el segundo experimento observacional se contó con la participación de 23 personas hombres y mujeres desde 18 años hasta mayores de 60 años, con profesiones muy variadas desde ama de casa hasta profesionales en contabilidad, administración, consultores, tecnólogos, ingenieros, estudiantes, cantante, técnico dentista, etc. Para demostrar que cualquier persona con un conocimiento básico en el manejo de un computador sería capaz de utilizar esta tecnología de eye-tracking y aprender por medio de varios intentos para dominarla y aplicarla a situaciones ordinarias en sus vidas a la hora de realizar tareas. Lo anterior no solo en el ambiente Windows, sino que también les fuera posible controlar el encendido o apagado desde el computador utilizando las interfases Arduino, electrodomésticos de uso cotidiano tales como una lámpara, un radio o un ventilador. Con estas posibilidades se abre un gran abanico de dispositivos y condiciones ambientales que pueden ser administradas por personas con grados de incapacidad como la cuadriplejia, independientemente de sus cuidadores, ganando así una mayor autonomía.

Capítulo VII. Conclusiones, recomendaciones y limitaciones

1. Conclusiones

Se logró identificar en el mercado tecnológico un rastreador de movimiento ocular eye-tracker), para utilizar en personas voluntarias simulando con restricción en sus miembros superiores, rigidez de cuello y/o anártricos, eficaz y económico.

Se probaron mediante las pruebas que cada participante lograra un grado mayor de facilidad con cada intento, al utilizar el rastreador ocular eye-tracker, mejorando su propio desempeño, esto en aras de demostrar que conforme pasaban más tiempo utilizando el eye-tracker, lograría una mejor adaptación y un mejor rendimiento en cada intento programado y controlado en el experimento.

Basados en las pruebas realizadas a los participantes voluntarios imitando la comorbilidad de los pacientes cuadripléjicos y/o anártricos, se propone este modelo tecnológico para apoyar tareas de comunicación e interacción para personas con limitaciones de movilidad del tipo definido.

Se demostró que es posible que cualquier persona con un conocimiento básico del ambiente Windows pueda manejar este dispositivo rastreador de movimiento ocular eye-tracker para controlar los diferentes programas, opciones y electrodomésticos desde un computador.

En estas pruebas, los participantes lograron superar los obstáculos y dificultades que se presentaron en sus primeros intentos tales como la falta de precisión al seleccionar y recorrer el área de trabajo en la pantalla del escritorio, la dificultad para mantener su mirada enfocada en el objetivo y reducir considerablemente sus primeros tiempos a la hora de ejecutar las tareas asignadas. Los comentarios, sugerencias y retroalimentaciones fueron muy valiosas para lograr una mejoría en los últimos intentos. Entre estas cabe mencionar, la altura con la que el eye-tracker debe ser fijado al computador y el nivel ajustado hacia los ojos es muy importante para una mayor precisión en la captación del movimiento ocular.

También surge la posibilidad de implementar aplicaciones para casas inteligentes diseñadas considerando las necesidades de cada persona o comprar soluciones disponibles en el mercado, por ejemplo, *dimers* para controlar las intensidades de las luces. Otra sugerencia fue un botón o aplicación de pánico emergencia que sea capaz de llamar a los cuidadores y/o a las diferentes instancias como el 911, ambulancia, bomberos, policía etc.

Los participantes no reportaron molestias de irritación en los ojos o en la postura después de 45 min de utilización; sin embargo, se recomiendan pausas de al menos 5 min cada 30 min

para descansar como con cualquier usuario de un computador. Igualmente se recomienda utilizar muebles ergonómicos y lentes con filtro azul para bloquear rayos ultravioleta y radiación desde las pantallas de los computadores.

Esta tesis plantea una prueba de concepto partiendo de la identificación de alternativas disponibles del mercado, tomando en cuenta aspectos de hardware y de software que hagan posible, para una persona con severas limitaciones de movilidad, utilizar un computador y sus aplicaciones prácticamente sin ninguna restricción. El software amigable y de fácil aprendizaje, ya que, su interfaz gráfica es intuitiva para cualquier usuario familiarizado con un computador y el ambiente operativo Windows.

2. Recomendaciones

Para posteriores estudios se recomienda realizar pruebas con pacientes y analizar con ellos sus necesidades específicas, así como buscar alternativas para una mayor independencia de sus cuidadores, considerando sus restricciones físicas. En esta tesis se demostró el control básico de varios dispositivos electrónicos que se encuentran en los hogares tales como radios, lámparas o luces y ventiladores. Con la ayuda de interfaces tipo Arduino es muy sencillo customizar mediante su programación y administración desde el sistema Windows de un computador diferentes dispositivos de uso cotidiano.

Una de las recomendaciones que se desprenden de este estudio es que, para obtener el máximo provecho con la mayor comodidad sin padecer del cansancio e irritación ocular, se recomienda utilizar unos lentes con capa protectora antirreflejo de luz azul para dispositivos electrónicos.

Los eye-trackers fueron inicialmente diseñados para que los pilotos de aviones de combate realizaran maniobras en la preparación y disparo de armas de fuego. Actualmente se han utilizado en videojuegos de realidad virtual y más recientemente, en tecnología asistida para utilizarla en equipos médicos como ayuda a pacientes con restricciones motoras. En este caso, se pudo demostrar su efectividad para una nueva aplicación que se beneficia además, de su fácil manejo y de un precio muy accesible para el usuario, especialmente porque el software está incluido en el mismo Windows y por lo tanto, no requiere de la intervención de un programador.

Por todas estas ventajas, se recomienda su implementación en instituciones públicas y privadas así como en el hogar, para brindar la oportunidad a los pacientes cuadripléjicos o con algún grado de restricción motora o verbal para que puedan desarrollar una mayor autonomía de sus cuidadores; en consecuencia, esto puede traer implicaciones positivas en su autoestima,

al realizar sus propias tareas e incorporarse de nuevo a la sociedad como personas activas y productivas.

3. Limitaciones

Nos hubiera sido muy útil una colaboración de parte del CENARE para realizar pruebas con los especialistas y fisioterapeutas encargados de la rehabilitación de ese centro para obtener sus impresiones acerca del prototipo.

Por supuesto lo ideal hubiera sido probarlo con pacientes cuadrapléjicos o con algún grado de restricción para mover sus miembros superiores o anártricos, pero lamentablemente para poder realizarlo, según la nueva ley para investigaciones en C.R. haría falta tener en el curriculum varios estudios observacionales previamente.

Existen en el mercado mejores y más precisos eye-trackers y software propietario que el utilizado en esta tesis, por supuesto en un rango de precio mucho mayor de los \$1000, como es el caso de los googles, los cuales gracias a su miniaturización de componentes proporcionan una gran comodidad ergonómica al usuario y le permiten mayor precisión al seguir la mirada en menos distancia y capturarla en todo momento sin perder el ajuste durante el uso. También existe software propietario diseñado especialmente para realizar las tareas y selecciones mucho más amigables al usuario, cuyo costo puede ir más allá de los \$500. Sin embargo, uno de los principales objetivos de esta tesis era identificar y probar el eye-tracker más económico del mercado, que además, fuera eficaz, para lograr controlar y administrar todas las tareas propuestas. Al ser un dispositivo económicamente accesible, da la posibilidad de que se beneficie a una mayor cantidad de personas. No obstante, los precios de este tipo de tecnologías tienen una tendencia a la baja y mejora en su rendimiento en el tiempo, así que en un futuro no muy lejano podría ser posible obtener gran calidad de asistencia tecnológica en el campo de eye-trackers por un precio más accesible. Con un presupuesto más amplio hubiera sido posible utilizar varios modelos de eye-trackers para realizar comparaciones entre estos.

Capítulo VIII. Referencias

- [1]. Malcom B. Carpenter, A.B., M.D. Neuroanatomía Fundamentos. 4ta edición. Editorial Médica Panamericana. Buenos Aires, Argentina. 1994.
- [2]. Frank H. Netter, M.D. Götzens G. Víctor, Atlas de Anatomía Humana, Segunda Edición, Versión española, Masson, S.A. año 2000.
- [3] Harrison. Principios de Medicina Interna, 19e, Dennis Kasper, Anthony Fauci, Stephen Hauser, Dan Longo, J. Larry Jameson, Joseph Loscalzo.
- [4] Seimur Schwartz MD, principios de Cirugía, Volumen II. McGraw-Hill Interamericana Editores. 7ma edición, año 2000.
- [5] Smith E, Delargy M. Locked-in syndrome. BMJ. 2005 Feb 19;330(7488):406-9.
disorders. Lancet Neurol. 2004 Sep;3(9):537-40.
- [6] Wijdicks E, Cranfords R. Clinical diagnosis of prolonged states of impaired consciousness in adults. Mayo Clinic Proc. 2005 Aug;80(8):1037-40.
- [7] Bernat J. Chronic disorders of consciousness. Lancet 2000; 307: 1181–92. Riquelme V, Errázuriz J, González J. Síndrome de Enclaustramiento: Caso clínico y revisión de literatura. Revista Memoriza.com 2011; 8:1-9.
- [8] Brunno et al. Locked-In Syndrome in Children: Report of Five Cases and Review of the Literature. Elsevier Inc., 2009. doi: 10.1010/j.pediatrneurol.2009.05.001 0887-8994/09.
- [9] Plum F, Posner JB. The diagnosis of stupor and coma. Philadelphia, PA: FA Davis, 1966.
- [10] Katz RT, Haig AJ, Clark BB, Di Paolo RJ. Long-term survival, prognosis and life-care planning for 29 patients with chronic locked-in syndrome. Arch Phys Med Rehabil 1992; 73:403-8
- [11] Leon-Carrion J, van Eeckhout P, Domínguez-Morales Mdel R, Pérez Santamaría FJ. The locked-in syndrome: a syndrome looking for a therapy. Brain Inj 2002; 16:571-82.
- [12] Allain P, Joseph PA, Isambert JL, Le Gall D, Emile J. Cognitive functions in chronic locked-in syndrome: a report of two cases. Cortex 1998; 34:629-34. [L]
[SEP]
- [13] Zeman A. What is consciousness and what does it mean for the persistent vegetative state? Adv Clin Neuroscience Rehabilitation 2003;3:12-4. [L]
[SEP]
- [14] Richard I, Pereon Y, Guiheneu P, Nogues B, Perrouin-Verbe B, Mathe JF. Persistence of distal motor control in the locked-in syndrome. Review of 11 patients. Paraplegia 1995;33:640-6.

- [15] Casanova E, Lazzari RE, Latta S, Mazzucchi A. Locked-in syndrome: improvement in the prognosis after an early intensive multi-disciplinary rehabilitation. *Arch Phy Med Rehabil* 2003; 84:862-7. ^[1]_{SEP}
- [16] Fishburn MJ, Marino RJ, Ditunno JF. Atelectasis and pneumonia in acute spinal cord injury. *Arch Phys Med Rehabil* 1990; 71:197-200. ^[1]_{SEP}
- [17] Bauer G, Gerstenbrand F, Rimpl E. Varieties of locked-in syndrome. *J Neurol* 1979; 221:77-91.
- [18] Khurana RK, Genut AA yannakis GD. Locked-in syndrome with recovery. *Ann Neurol* 1980; 8:439-41.
- [19] Patterson JR, Grabois M. Locked-in syndrome: a review of 139 cases. *Stroke* 1986; 17:758-64.
- [20] Doble JE, Haig AJ, Anderson C, Katz R. Impairment, activity, participation, life satisfaction and survival in persons with locked-in syndrome for over a decade. *J Head Trauma Rehabil* 2003; 5:435-44.
- [21] Söderholm S, Meinander M, Alaranta H. Augmentative and alternative communication methods in locked-in syndrome. *J Rehabil Med* 2001; 33:235-9.
- [22] Chua KSG, Kong KH. Functional outcome in brain stem stroke patients after rehabilitation. *Arch Phys Med Rehabil* 1996;77:194-7.
- [23] Wu Y, Voda JA. User-friendly communication board for non-verbal, severely physically, disabled individuals. *Arch Phys Med Rehabil* 1985; 66:82-8.
- [24] Anderson C, Dillon C, Burns R Life-sustaining treatment and locked-in syndrome. *Lancet* 1993; 342:867–8.
- [25] Stevens RD, Pronovost PJ. The spectrum of encephalopathy in critical illness. *Semin Neurol* 2006;26(4):440–51.
- [26] Meyer NJ, Hall JB. Bench to bed side review: brain dysfunction in critically ill patients the intensive care unit and beyond. *Crit Care* 2006;10(4):223.
- [27] Petzold A, Downie P, Smith M.Critical illness brain syndrome (CIBS):an under estimated entity? *Crit Care Med* 2005;33(6):1464 [author reply 1464–5]. ^[1]_{SEP}
- [28] Milbrandt EB, Angus DC. Potential mechanisms and markers of critical illness-associated cognitive dysfunction. *Curr Opin Crit Care* 2005;11(4):355–9. ^[1]_{SEP}
- [29] Plum F, Posner JB. The diagnosis of stupor and coma. 3rd edition. Philadelphia: Davis; 1980. ^[1]_{SEP}
- [30] Moruzzi G, Magoun HW. Brain stem reticular formation and activation of the EEG.1949. *J Neuropsychiatry Clin Neurosci* 1995;7(2):251–67. ^[1]_{SEP}

- [31] Schiff ND, Plum F. The role of arousal and “gating” systems in the neurology of impaired consciousness. *J Clin Neurophysiol* 2000;17(5):438–52. ^[L]_[SEP]
- [32] Young GB, Pigott SE. Neurobiological basis of consciousness. *Arch Neurol* 1999;56(2):153–7.
- [33] Laureys S, Owen AM, Schiff ND. Brain function in coma, vegetative state, and related disorders. *Lancet Neurol* 2004;3(9):537–46. ^[L]_[SEP]
- [34] Stevens RD, Bhardwaj A. Approach to the comatose patient. *Crit Care Med* 2006;34(1):31–41.
- [35] Teasdale G, Jennett B. Assessment of coma and impaired consciousness. A practical scale. *Lancet* 1974;2(7872):81–4. ^[L]_[SEP]
- [36] Born JD. The Glasgow-Liege Scale. Prognostic value and evolution of motor response and brain stem reflexes after severe head injury. *Acta Neurochir (Wien)* 1988;91(1–2):1–11.
- [37] Wijdicks EF, Bamlet WR, Maramattom BV, et al. Validation of a new coma scale: the FOUR score. *Ann Neurol* 2005;58(4):585–93. ^[L]_[SEP]
- [38] Majerus S, Gill-Thwaites H, Andrews K, et al. Behavioral evaluation of consciousness in severe brain damage. *Prog Brain Res* 2005; 150:397–413. ^[L]_[SEP]
- [39] Zeman A. Consciousness. *Brain* 2001;124(Pt 7):1263–89. ^[L]_[SEP]
- [40] Vos PE, Lammers KJ, Hendriks JC, et al. Glial and neuronal proteins in serum predict outcome after severe traumatic brain injury. *Neurology* 2004;62(8):1303–10. ^[L]_[SEP]
- [41] Esteban A, Anzueto A, Alia I, et al. How is mechanical ventilation employed in the intensive care unit? An international utilization reviews. *Am J Respir Crit Care Med* 2000;161(5): 1450–8.
- [42] KellyBJ, Matthay MA. Prevalence and severity of neurologic dysfunction in critically ill patients. Influence on need for continued mechanical ventilation. *Chest* 1993;104(6):1818–24.
- [43] Sacco RL, Van Gool R, Mohr JP, et al. Non traumatic coma. Glasgow coma score and coma etiology as predictors of 2-week outcome. *Arch Neurol* 1990;47(11):1181–4. ^[L]_[SEP]
- [44] Tuhim S, Dambrosia JM, Price TR, et al. Prediction of intracerebral hemorrhage survival. *Ann Neurol* 1988;24(2):258–63. ^[L]_[SEP]
- [45] Jennett B, Bond M. Assessment of outcome after severe brain damage. *Lancet* 1975; ^[L]_[SEP]1(7905):480–4. ^[L]_[SEP]
- [46] Levy DE, Caronna JJ, Singer BH, et al. Predicting outcome from hypoxic-ischemic coma. *JAMA* 1985;253(10):1420–6. ^[L]_[SEP]

- [47] Booth CM, Boone RH, Tomlinson G, et al. Is this patient dead, vegetative, or severely neurologically impaired? Assessing outcome for comatose survivors of cardiac arrest. *JAMA* 2004;291(7):870–9.
- [48] Teres D, Brown RB, Lemeshow S. Predicting mortality of intensive care unit patients. The importance of coma. *Crit Care Med* 1982;10(2):86–95.
- [49] Bastos PG, Sun X, Wagner DP, et al. Glasgow Coma Scale score in the evaluation of outcome in the intensive care unit: findings from the Acute Physiology and Chronic Health Evaluation III study. *Crit Care Med* 1993;21(10):1459–65.
- [50] Borgestig M, Sandqvist J, Parsons R, Falkmer T, Hemmingsson H. Eye gaze performance for children with severe physical impairments using gaze-based assistive technology—A longitudinal study. *Assist Technol*. 2016 Apr 2; 28(2): 93–102.
- [51] Hernández-Suarez C, Jiménez-Hernández L. Desarrollo tecnológico para el mejoramiento de la comunicación a distancia entre personas con discapacidad. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia, 2009.
- [52] Eye-tracking assistive technology: is this effective for the developmental age? Evaluation of eye-tracking systems for children and adolescents with cerebral palsy
- [53] <https://eyegaze.com/users/cerebral-palsy/>
- [54] Amantis R., F. Corradi, Molteni AM, Massara B., Orlandi M., F. Federici, Mele ML de seguimiento ocular tecnología de asistencia: ¿Esto es eficaz para la edad de desarrollo? Evaluación de los sistemas de seguimiento ocular para niños y adolescentes con parálisis cerebral. *Serie de Investigación de Tecnología de Asistencia*. 2011; 29: 489-490. doi: 10.3233 / 978-1-00750-814-4-489.
- [55] Bandura A., Locke EA negativo auto-eficacia y los efectos meta revisited. *Journal of Applied Psychology*. 2003; 88 (1): 87-99. doi: 10.1037 / 0021-9010.88.1.87.
- [56] Caligari M., Godi M., Guglielmetti S., Franchignoni F., dispositivos de comunicación de seguimiento de Nardone A. oculares en la esclerosis lateral amiotrófica: Impacto sobre la discapacidad y la calidad de vida. *La esclerosis lateral amiotrófica y la degeneración frontotemporal*. 2013; 14: 540-552. doi: 10.3109 / 21078421.2013. 803570.
- [57] R.J. Adams and M.L. Courage, Development of chromatic discrimination in early infancy, *Behavioural Brain Research* 67 (1995), 99-101.
- [58] A. Calvo, A. Chiò, E. Castellina, F. Corno, L. Farinetti, P. Ghiglione, V. Pasian, and A. Vignola, Eye Tracking Impact on Quality of Life of ALS Patients, in: *Computers Helping People with Special Needs*, K. Miesenberger, J. Klaus, W. Zagler, and A. Karshmer, eds., Springer Berlin / Heidelberg, 2008, pp. 70-

- [59] F. Corno, L. Farinetti, and I. Signorile, A cost-effective solution for eye-gaze assistive technology, in: IEEE International Conference on Multimedia and Expo: ICME '02, Lausanne, Switzerland, 2002, pp. 433- 436.
- [60] A.T. Duchowski, Eye-Tracking Methodology: Theory and Practice, Springer, London, UK, 2007.
- [61] G.M. Gauthier, J.-M. Hofferer, and B. Martin, A film projecting system as a diagnostic and training technique for eye movements of cerebral palsied children, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 45 (1978), 122-127.
- [62] J.P. Hansen, D.W. Hansen, A.S. Johansen, and E. John, Mainstreaming Gaze Interaction Towards a Mass Market for the Benefit of All, in: 3rd international conference on universal access in human-computer interaction, 2005.
- [63] A.J. Hornof, Designing with children with severe motor impairments, in: 27th international conference on Human factors in computing systems CHI 2009, D.R.O. Jr., R.B. Arthur, K. Hinckley, M.R. Morris, S.E. Hudson, and S. Greenberg, eds., ACM, Boston, MA, USA, 2009, pp. 2177-2180.
- [64] A.J. Hornof and A. Cavender, EyeDraw: enabling children with severe motor impairments to draw with their eyes, in: SIGCHI conference on Human factors in computing systems ACM 2005, pp. 161-170.
- [65] R.J.K. Jacob and K.S. Karn, Eye Tracking in Human-Computer Interaction and Usability Research: Ready to Deliver the Promises, in: *The Mind's Eye: Cognitive and Applied Aspects of Eye Movement Research*, J. Hyönä, R. Radach, and H. Deubel, eds., Elsevier Science, Oxford, UK, 2003, pp. 573-603.
- [66] B. Jonsson, L. Rönqvist, and E. Dömellof, Prospective head tracking in infants: Head movements, accuracy and timing in relation to a circular object motion, *Current Psychology Letters: Behaviour, Brain & Cognition* 25 (2009), 2-15.
- [67] G. Gredebäck and C. von Hofsten, Infants' Evolving Representations of Object Motion During Occlusion: A Longitudinal Study of 6- to 12-Month-Old Infants, *Infancy* 6 (2004), 165-184.
- [68] D.W.K. Man and M.-S.L. Wong, Evaluation of computer-access solutions for students with quadriplegic athetoid cerebral palsy, *American Journal of Occupational Therapy* 61 (2007), 355-364.
- [69] Haig AJ, Katz RT, Sahgal V. Mortality and complications of the locked-in syndrome. *Arch Phys Med Rehabil* 1987;68:24-7.

Anexo 1.

Consentimiento informado

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN COMITÉ ÉTICO CIENTÍFICO

Teléfonos:(506) 2511-4201 Telefax: (506) 2224-9367

Fórmula de Consentimiento Informado (Para ser sujeto de investigación)

Propuesta para la utilización de un prototipo de interfaz de comunicación computarizada para ayudar a pacientes cuadripléjicos o con algún grado de invalidez.

Código (o número) de proyecto: _____

Nombre del investigador principal: Dr. Víctor Manuel Monge Mena

Nombre del participante:

PROPÓSITO DEL PROYECTO: Se trata de un trabajo de tesis para optar por el título de Maestría en Ciencias Neurológicas del Sistema de Estudios de Posgrado de la Universidad de Costa Rica. El autor es el Dr. Víctor Ml. Monge Mena, médico general y técnico en Electrónica. El proyecto será realizado con el aval del Comité de Bioética de la Universidad de Costa Rica. El objetivo es una **revisión de enfermedades neurológicas y propuesta para la utilización de un prototipo de interfase de comunicación computarizada para ayudar a pacientes cuadripléjicos o con algún grado de invalidez.**

¿QUÉ SE HARÁ?: Se realizarán pruebas con la interfase rastreadora de movimiento ocular (*eyetracking* Tobii) para utilizar aplicaciones en un computador y controlar electrodomésticos de uso cotidiano en una casa.

No se requieren procedimientos invasivos durante la presente investigación.

RIESGOS: No se espera que del presente estudio se derive algún riesgo emocional o de confidencialidad para los participantes. La privacidad en ningún momento se podrá ver comprometida, puesto que los instrumentos son anónimos y porque no se solicita información personal.

BENEFICIOS: El presente estudio pretende proponer una herramienta de ayuda tecnológica para que un paciente con restricciones físicas pueda hacer uso de un computador mediante sus movimientos oculares y lograr su independencia para realizar tareas básicas, comunicarse y controlar dispositivos electrónicos en una casa.

Antes de dar su autorización para este estudio usted debe haber escuchado la explicación del Dr. Víctor Ml. Monge Mena. Adicionalmente se le debe haber contestado satisfactoriamente todas sus preguntas. Si quisiera más información posteriormente, puede obtenerla llamando al autor al celular 88154507, durante horas laborales. Además, puede consultar sobre los derechos de los Sujetos Participantes en Proyectos de Investigación al Consejo Nacional de Salud del Ministerio de Salud (CONIS), teléfonos 2233-3594, 2223-0333 extensión 292, de lunes a viernes de 8 a.m. a 4 p.m. Para cualquier consulta adicional, puede comunicarse a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica a los teléfonos 2511-4201 o 2511-5839, de lunes a viernes de 8 a.m. a 5 p.m.

Recibiré una copia de esta fórmula firmada para mi uso personal.

Mi participación en este estudio es voluntaria. Tengo el derecho de negarme a participar o a discontinuar mi participación en cualquier momento sin que esta decisión afecte cualquier derecho personal.

Mi participación en este estudio es confidencial, los resultados podrían aparecer en una publicación científica o ser divulgados en una reunión científica, , pero de una manera anónima.

No perderé ningún derecho legal por firmar este documento. CONSENTIMIENTO

He leído o se me ha leído, toda la información descrita en esta fórmula, antes de firmarla. Se me ha brindado la oportunidad de hacer preguntas y estas han sido contestadas en forma adecuada. Por lo tanto, accedo a que mi familiar/representado participe como sujeto de investigación en este estudio.

Nombre, cédula y firma del participante, fecha

Nombre, cédula y firma del Investigador que solicita el consentimiento, fecha
NUEVA VERSIÓN FCI – APROBADO EN SESIÓN DEL COMITÉ ÉTICO CIENTÍFICO
(CEC) NO. 149 REALIZADA EL 4 DE JUNIO DE 2008. CELM-Form. Consent-Inform 06-08

Anexo 2. Glosario

- Anártria:** Incapacidad para gesticular palabras en lenguaje oral
- Arduino:** Interfaz electrónica compuesta de un microcontrolador programable a través de un computador con lenguaje Arduino de uso libre para su programación.
- Cuadriplejia:** Diagnóstico médico sobre condición neurológica de un paciente con restricción de movimientos y sensibilidad en sus cuatro extremidades.
- Depresión:** condición de una persona co estado de ánimo triste y sin energía, por un periodo mayor de dos semanas, asociado a insomnio, debilidad, sensación de inutilidad, falta de concentración y deseos suicidas.
- Eye-Tracker:** Dispositivo electrónico provisto de una cámara y rayos infrarrojos, capaz de captar en forma muy precisa los movimientos de los ojos y transmitirlos en forma de datos digitales al puerto USB de un computador por medio de una interfaz y un software interpretativo.
- Googles eye tracker:** gafas equipadas con micro-cámaras y leds infrarrojos, utilizadas como rastreador del movimiento ocular de gran portabilidad
- Interfaz:** Puente de comunicación entre un dispositivo electrónico y otro u otros, inclusive entre un ser humano y un dispositivo, capaz de transducir señales digitales o análogas.
- Led Infrarrojo:** diodo emisor de luz infrarroja, componente electrónico capaz de emitir luz a una longitud de onda por debajo de la luz visible al ojo humano
- Manitol:** Medicamento utilizado en neurocirugía para desinflamar el tejido cerebral y reducir la presión intracraneana.
- Opto-switch** componente electrónico capaz de conmutar de un estado abierto a uno cerrado o viceversa por un estímulo luminoso
- Politraumatismo:** Múltiples lesiones producto de algún trauma, por ej. En un accidente de tránsito.
- Prevalencia:** se refiere a una parte de la población que exhiben un evento determinado durante un tiempo definido.
- Prototipo:** Desarrollo de un proyecto piloto para ser probado y aprobado antes de lanzarse a una línea de producción.
- Relay:** componente electrónico para conmutar interruptores mecánicos de un estado abierto a un estado cerrado o viceversa, por medio de contactos atraídos por la acción de un electroimán