

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Innovando la Comunicación Accesible: Interfaz de Escritura
para Personas con Movilidad Limitada**

Trabajo de graduación presentado por Jose Pablo Monzon Zenteno para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en Ciencias de la
Computación y Tecnologías de la Información

Guatemala,

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Innovando la Comunicación Accesible: Interfaz de Escritura
para Personas con Movilidad Limitada**

Trabajo de graduación presentado por Jose Pablo Monzon Zenteno para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en Ciencias de la
Computación y Tecnologías de la Información

Guatemala,

2024

Vo.Bo.:



(f)

Lic. Armando Benjamín Cush

Tribunal Examinador:



(f)

Lic. Armando Benjamín Cush



(f)

Dr. Gabriel Barrientos Rodríguez



(f)

MSc. Julio Mérida López

Fecha de aprobación: Guatemala, 4 de diciembre de 2024.

Lista de figuras	VII
Resumen	IX
Abstract	XI
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	5
4. Objetivos	7
4.1. Objetivo general	7
4.2. Objetivos específicos	7
5. Alcance	9
5.1. Obligaciones del Estado	9
6. Marco teórico	11
6.1. Tecnologías de asistencia y accesibilidad	11
6.1.1. Aplicaciones en la educación	11
6.1.2. Desafíos en su implementación	12
6.2. Interacción Humano Computador	12
6.2.1. HCI para tecnologías accesibles	12
6.2.2. El rol de la Inteligencia Artificial	13
6.3. Sistemas de comunicación alternativa	13
6.3.1. Comunicación basada en gestos	13
6.3.2. Interfaces cerebro-computadora	13
6.3.3. Comunicación Aumentativa y Alternativa	14
6.4. Predicción de palabras y oraciones	14
6.4.1. Modelos <i>N-gram</i>	14

7. Metodología	17
7.1. Diseño y desarrollo de la interfaz de usuario	17
7.2. Implementación de funcionalidades y compatibilidad	18
7.2.1. Arquitectura	19
7.2.2. Funcionalidad	19
7.2.3. Interacción con el computador	20
7.3. Integración y prototipo	20
8. Resultados	25
8.1. Pruebas de funcionalidad	25
8.1.1. Pruebas de eficacia	25
8.1.2. Pruebas de precisión	26
8.1.3. Pruebas de usabilidad	26
8.1.4. Observaciones de un usuario con CMT	26
9. Discusión	27
9.1. Evaluación de resultados	27
9.1.1. Interfaz de usuario simple y adaptable	27
9.1.2. Respuesta eficaz e inclusiva	27
9.1.3. Compatibilidad futura	28
9.1.4. Impacto del modelo <i>N-grams</i>	28
9.2. Análisis de impacto	28
10. Conclusiones	29
11. Recomendaciones	31
12. Bibliografía	33

Lista de figuras

1.	Demostración de <i>speller</i> escribiendo un documento.	21
2.	Teclado de emojis del <i>speller</i>	21
3.	Modo navegación del <i>speller</i>	22
4.	Modo con configuraciones de navegador del <i>speller</i>	22
5.	Menú de configuración del <i>speller</i>	22
6.	Menú principal del <i>speller</i> en tamaño pequeño	23
7.	Menú de configuración del <i>speller</i> con el modo daltonismo activado	23

El presente trabajo se enfoca en el desarrollo de una interfaz de comunicación simplificada, diseñada para personas con movilidad limitada, con el objetivo de mejorar su capacidad para interactuar con computadores personales respondiendo a la creciente necesidad de crear tecnologías accesibles y fáciles de usar que permitan a estos usuarios superar las barreras de comunicación impuestas por sus condiciones físicas.

El sistema propuesto utiliza un único método de entrada y está optimizado mediante la implementación de modelos predictivos *N-gram*, lo que facilita la escritura de palabras y frases. Además, su diseño asegura la compatibilidad con diversas tecnologías emergentes como las interfaces cerebro-computadora y los sistemas de seguimiento ocular en un futuro.

Se realizaron pruebas de funcionalidad con usuarios, incluyendo uno con la enfermedad de *Charcot-Marie-Tooth* (CMT), que demostraron la eficacia, precisión y usabilidad del sistema. Aunque inicialmente los usuarios encontraron dificultades para comprender la lógica del sistema, posteriormente se adaptaron y utilizaron el programa manera más eficiente. El usuario con CMT destacó que el software facilita el acceso y reduce la necesidad de movimientos repetitivos, mejorando su capacidad de comunicación.

Estos resultados indican que el sistema desarrollado ofrece una alternativa viable y eficiente para usuarios con discapacidades físicas severas, superando limitaciones comunes en tecnologías existentes, como la complejidad y la curva de aprendizaje. Además, el diseño optimizado de la interfaz permite ajustes como velocidad, posición en la pantalla, transparencia, idioma y paleta de colores para personas con daltonismo, aumentando la inclusividad y eficacia de la solución.

A través de este proyecto, no solo se busca contribuir al campo de las tecnologías de asistencia, sino también promover una mayor inclusión social y mejorar la autonomía de las personas con discapacidades. Esto generaría un impacto a nivel internacional, especialmente en países en desarrollo, donde las barreras para la inclusión son aún más significativas y afectan profundamente áreas como la educación.

This work focuses on developing a simplified communication interface designed for individuals with limited mobility, aiming to enhance their ability to interact with personal computers addressing the growing need for accessible and user-friendly technologies that allow these users to overcome communication barriers imposed by their physical conditions.

The proposed system employs a single input method and is optimized through the implementation of predictive N-gram models, facilitating the typing of words and phrases. Additionally, its design ensures compatibility with various emerging technologies, such as brain-computer interfaces and eye-tracking systems, in the future.

Functionality tests were conducted with users, including one with Charcot-Marie-Tooth (CMT) disease, which demonstrated the system's effectiveness, accuracy, and usability. Initially, users faced difficulties in understanding the system's logic, but they eventually adapted and used the program more efficiently. The user with CMT highlighted that the software reduces the need for repetitive movements, thereby improving their communication ability.

These results indicate that the developed system provides a viable and efficient alternative for users with severe physical disabilities, overcoming common limitations in existing technologies, such as complexity and steep learning curves. Additionally, the optimized interface design allows for adjustments like speed, screen position, transparency, language, and a color palette suitable for individuals with color blindness, enhancing the solution's inclusivity and effectiveness.

This project seeks not only to contribute to the field of assistive technologies, but also to promote greater social inclusion and improve the autonomy of people with disabilities. This could have an international impact, especially in developing countries, where barriers to inclusion are even more significant and deeply affect areas like education.

Actualmente, las personas que cuentan con discapacidades físicas se enfrentan importantes barreras en la interacción con la tecnología, la cual cada vez forma una parte mucho más vital en nuestras vidas. Esto limita significativamente su autonomía y capacidad para integrarse plenamente en la sociedad [1].

A pesar de los avances en el desarrollo de tecnologías de asistencia, la accesibilidad y usabilidad de estas herramientas sigue siendo un desafío lo que genera una brecha digital. Muchas de las soluciones existentes son costosas, complejas de usar o están limitadas a plataformas específicas lo que restringe su adopción masiva por parte de aquellos que más lo necesitan [2].

El desarrollo de sistemas de comunicación alternativos, como el *Assistive Context-Aware Toolkit* o múltiples *spellers*, ha demostrado ser crucial para mejorar la calidad de vida de las personas con discapacidades severas, el mayor ejemplo de esto es el físico Stephen Hawking. Sin embargo, estos sistemas enfrentan dificultades en cuando a personalización, curva de aprendizaje y disponibilidad, lo que hace evidente la necesidad de crear soluciones más simples y accesibles que puedan beneficiar a más usuarios [3].

En este contexto se propone el desarrollo de una interfaz de comunicación simplificada, diseñada específicamente para personas con movilidad limitada. Este proyecto busca proporcionar una herramienta de fácil acceso que permita la interacción efectiva con computadores personales a través de un único método de entrada. La cual estará equipada con funcionalidades de predicción de palabras, disposición optimizada del teclado y funciones optimizadas para la navegación de la computadora.

A través de esto no solamente se busca contribuir al campo de las tecnologías de asistencia, sino también una mayor inclusión social y mejorar la autonomía de las personas con discapacidades. Esto generando un impacto internacionalmente, especialmente en países en desarrollo donde las barreras para la inclusión son aún más significativas e impactan profundamente en áreas como la educación.

El desarrollo de tecnologías accesibles ha sido clave para mejorar la calidad de vida de las personas con discapacidades, especialmente aquellas que tienen limitaciones de movilidad. Diverso tipo de soluciones han surgido con el objetivo de ofrecer medios simples de comunicación. Un ejemplo de ello es el *Assistive Context-Aware Toolkit (ACAT)*, desarrollado por *Intel*. Este permite controlar una computadora mediante movimientos mínimos como el uso de sensores en la piel, integrando capacidades de predicción de texto y síntesis de voz, un caso destacado es el del físico teórico Stephen Hawking [4].

Otro uso relevante de la tecnología para mejorar la calidad de vida de las personas con discapacidad es el uso de *Brain Computer Interfaces (BCI)*, estas interfaces cerebro-computadora permiten la comunicación a través de señales cerebrales sin necesidad de movimientos musculares. Un ejemplo de esto son los *BCI-spellers*, sistemas que permiten a los usuarios seleccionar letras o símbolos una a una mediante interpretación de señales EEG. Estos se han podido categorizar en distintos paradigmas como *P3000* y *Steady-State Visual Evoked Potentials* y han demostrado ser eficientes para los pacientes con discapacidades físicas severas como la esclerosis lateral amiotrófica [5].

A pesar de estos avances significativos todavía existen desafíos, como la necesidad de interfaces más simples que puedan adaptarse a una variedad más amplia de usuarios con discapacidades varias. Asimismo lo costoso de las herramientas, la complejidad de personalización y la curva de aprendizaje son barreras que deben superarse para hacer estas tecnologías más accesibles.

En Guatemala, organizaciones como UNESCO, CONADI y UNICEF han implementado programas con el objetivo de mejorar las oportunidades de las personas con discapacidad mediante el uso de la tecnología [6]. Sin embargo, múltiples obstáculos como la falta de información y la escasa difusión de estas tecnologías y aplicaciones, representan un desafío significativo para la calidad de vida de estas personas. Iniciativas como el Proyecto Mesamérica han promovido talleres regionales sobre el uso de tecnología como herramienta de desarrollo para personas con discapacidad con el objetivo de recopilar información y fomentar una mayor inclusión a mano de la tecnología [7].

Asimismo, en los últimos 5 años, se ha evidenciado la importancia de las tecnologías accesibles, pudiéndose observar un aumento significativo en el uso de funciones de accesibilidad como herramientas de comunicación virtual o interacción a manos libres con los dispositivos. Sin embargo, en el país, las limitaciones de acceso y la brecha digital incrementan la exclusión de las poblaciones discapacitadas [8]. Haciendo crucial el desarrollo de interfaces de comunicación simples y accesibles para personas con movilidad limitada

Las personas con discapacidades físicas enfrentan obstáculos significativos en su interacción con dispositivos computacionales, limitando su autonomía y capacidad de comunicación. La evolución de tecnologías de asistencia como las BCI o *eye-tracking*, ha abierto un nuevo horizonte de posibilidades, permitiendo a estos usuarios controlar dispositivos electrónicos sin requerir acciones físicas como el movimiento manual o dictado por voz [9], [10]. Este avance es crucial, ya que proporciona una vía de comunicación e interacción para aquellos que están severamente limitados por sus condiciones físicas.

Sin embargo, a pesar de los progresos logrados, las BCI basadas en EEG enfrentan desafíos en términos de precisión, usabilidad y accesibilidad, lo que restringe su aplicación práctica [11]. Adicionalmente, sistemas como el ACAT son anticuados y están limitados a dispositivos con procesadores *Intel* restringiendo su accesibilidad para usuarios que no disponen de este hardware específico [12].

Existe una urgente necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas que mejoren significativamente la calidad de vida de las personas con discapacidades físicas, ofreciéndoles nuevas vías para interactuar con el mundo digital [13]. Al desarrollar una interfaz de comunicación simplificada que permita a los usuarios con movilidad limitada comunicarse y controlar dispositivos tecnológicos de manera eficiente se pueden abrir puertas a nuevas aplicaciones en asistencia, educación, y autonomía personal, marcando una diferencia tangible en la vida de muchos.

Asimismo, al mejorar la simplicidad, disponibilidad y accesibilidad se alinea con los esfuerzos globales por inclusión y accesibilidad tecnológica, respondiendo a un llamado ético y social para asegurar que los avances tecnológicos beneficien a todos los sectores de la sociedad, incluyendo a aquellos históricamente marginados por sus discapacidades [14]. La investigación y desarrollo en este ámbito no solo tienen el potencial de transformar vidas individuales, sino también de inspirar innovaciones inclusivas que promuevan la equidad social.

4.1. Objetivo general

Desarrollar una interfaz de comunicación simple que permita a personas con movilidad limitada escribir e interactuar con computadores personales.

4.2. Objetivos específicos

- Diseñar y desarrollar una interfaz de usuario intuitiva y adaptable, optimizada para usuarios con diferentes niveles de capacidad cognitiva.
- Asegurar la compatibilidad futura al limitar la interacción a un único método de entrada.
- Implementar funciones de predicción de palabras y personalización de la interfaz para mejorar la eficacia de la comunicación.
- Realizar pruebas de funcionalidad para evaluar la eficacia, precisión y usabilidad del sistema.

Según la edición del 2024 de datos estadísticos de personas con discapacidad en Guatemala, de los casi 18 millones de habitantes, aproximadamente 1,700,000 reportaron tener al menos una dificultad, lo cual equivale al 10.4 % de la población guatemalteca [15]. Esto representa una significativa porción de la población, que enfrenta dificultades que afectan su calidad de vida y acceso a oportunidades.

Una de las brechas más preocupantes es la de la alfabetización. En una sociedad que ya cuenta con amplias disparidades socioeconómicas, las dificultades que enfrentan las personas con discapacidad contribuyen a ampliar estas brechas. Por ejemplo, en el departamento de Baja Verapaz, el 50.5 % de las personas con alguna discapacidad mayores de 15 años no saben leer ni escribir, en comparación con el 22.2 % de las personas sin discapacidad. Esto significa que existe una brecha del 28.2 %, evidenciando la urgente necesidad de luchar por la inclusión y soluciones accesibles [15].

5.1. Obligaciones del Estado

La Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad, ratificada por Guatemala, establece en su Artículo 21 que los Estados están obligados a facilitar el uso de formatos aumentativos y alternativos de comunicación, tales como lengua de señas y braille. Además, alienta a las entidades privadas a ofrecer servicios en formatos accesibles para personas con discapacidad y a los medios de comunicación a hacer accesible su información [16].

Este proyecto se alinea con dichos objetivos, al ofrecer una interfaz de comunicación alternativa que puede impactar positivamente la manera en la que las personas con discapacidad se comunican, promoviendo su inclusión efectiva en la sociedad.

El artículo 24 de la misma Convención reconoce el derecho a la educación de las personas con discapacidad, priorizando la igualdad de oportunidades y haciendo posible su

participación efectiva en la sociedad. Sin embargo, las grandes brechas de alfabetización previamente mencionadas demuestran que el Estado actualmente no está cumpliendo con estas obligaciones [16].

En la sección 3.1 del Artículo 24, se insta a los estados a adoptar medidas que faciliten el aprendizaje de métodos de escritura alternativos o aumentativos, para asegurar que las personas con discapacidad no queden excluidas del sistema educativo. Este proyecto se presenta como una de esas medidas, contribuyendo directamente a cerrar la brecha de alfabetización y ofrecer igualdad de oportunidades, cumpliendo así con los estándares internacionales de derechos humanos y promoviendo la inclusión de personas con discapacidad.

6.1. Tecnologías de asistencia y accesibilidad

Las tecnologías de asistencia juegan un papel crucial en el incremento en la accesibilidad para personas con discapacidad, permitiéndoles interactuar con su ambiente y realizar actividades diarias de manera mucho más efectiva. Existen múltiples tipos de tecnologías de asistencia como ayudas de movilidad, visuales o cognitivas; asimismo ciertos dispositivos para asistencia auditiva o de comunicación. La diversidad de estas refleja el gran espectro de necesidades para individuos con discapacidad [17]. Al mejorar la accesibilidad a través de la tecnología podemos mejorar significativamente su independencia y calidad de vida.

6.1.1. Aplicaciones en la educación

La integración de estas tecnologías en ámbitos educativos es una oportunidad significativa para mejorar el acceso para estudiantes con discapacidad. El trabajo de Santos Rodrigues en el 2023 [18] indica que acceso a tecnologías como *Internet of Things* (IoT) puede facilitar una experiencia de aprendizaje mucho más fructífera al enfrentar las barreras de la educación mediada por la tecnología. Estos avances permiten ambientes personalizados de aprendizaje que le proveen las necesidades únicas de estudiantes con alguna discapacidad. Asimismo, menciona el acceso limitado a tecnologías de asistencia y la falta de preparación por profesores y maestros relacionada a la usabilidad de la tecnología puede causar efectos adversos, por lo que no podemos separar de lo prometedor de estas nuevas herramientas el hecho que es necesario entender los problemas de la exclusión o de acceso limitado a estos beneficios.

6.1.2. Desafíos en su implementación

A pesar de los potenciales beneficios existen múltiples dificultades que restan la eficiencia de las tecnologías de asistencia al usarlas en un ambiente real.

Existen problemas de usabilidad ya que muchos dispositivos de asistencia son abandonados debido a las dificultades en su manejo, configuración o requieren un gran esfuerzo cognitivo para su uso efectivo [19]. Para prevenir esto es necesario extensas evaluaciones esenciales para mejorar estas tecnologías estando enfocadas en la experiencia de usuario (UX), la usabilidad de las interfaces (UI) y la accesibilidad del sistema.

Asimismo, los altos costos en desarrollo e investigación pueden limitar el acceso a muchos individuos que los necesiten. Junto con ello se tiene que al ser limitado el acceso los usuarios que requerirían algún tipo de apoyo para utilizar las tecnologías adecuadamente no tendrían material disponible o personas con capacidades.

6.2. Interacción Humano Computador

La Interacción Humano-Computador (HCI) se centra en la creación de interfaces que sean fáciles de usar e inclusivas, garantizando que todas las personas, independientemente de sus habilidades físicas o cognitivas, puedan interactuar de manera efectiva con la tecnología. Por lo tanto desempeña un papel crucial en el desarrollo de programas y tecnologías que mejoran la accesibilidad para personas con discapacidades [20].

6.2.1. HCI para tecnologías accesibles

Uno de los pilares más importantes del HCI es el diseño centrado en el usuario. Este enfoque hace un énfasis en comprender las necesidades únicas de los usuarios a través de métodos como pruebas de funcionalidad y usabilidad. Al integrar la adaptabilidad y la personalización en las interfaces tecnológicas educativas, los desarrolladores pueden crear entornos que satisfagan diversas necesidades de aprendizaje, especialmente para personas con discapacidades [21].

Recientes avances en tecnología han dado lugar a nuevos métodos innovadores de entrada que mejoran significativamente la accesibilidad. Uno de estos métodos es la tecnología de seguimiento ocular [22], que permite a los usuarios con movilidad limitada controlar el cursor utilizando sus ojos, eliminando la necesidad de dispositivos de entrada tradicionales, como el ratón o el teclado, y ofreciendo una forma más intuitiva de interactuar con las computadoras.

Por otro lado, las interfaces de usuario basadas en la voz (VUIs) han surgido para mejorar la accesibilidad, permitiendo a los usuarios interactuar mediante comandos de voz, lo cual resulta especialmente beneficioso para quienes enfrentan dificultades con la interacción física. Estudios recientes destacan que estas VUIs no solo mejoran la usabilidad, sino que también aumentan la inclusión [23].

Los electroencefalogramas miden la actividad eléctrica en el cerebro utilizando electrodos.

Esta tecnología puede permitir la interacción con dispositivos para usuarios con movilidad extremadamente limitada [9]. Múltiples estudios han hecho pruebas para controlar dispositivos como computadores y sillas de ruedas, asimismo empresas como *Neuralink* se enfocan en crear una conexión directa entre el cerebro y una computadora lo que permite mayor control con el coste de sufrir una operación invasiva [24].

6.2.2. El rol de la Inteligencia Artificial

Esta se está integrando cada vez más en el HCI para mejorar aún más la accesibilidad. Nuevas tecnologías como el procesamiento del lenguaje natural y el aprendizaje automático pueden personalizar las experiencias de los usuarios y mejorar la usabilidad de las interfaces. Al analizar el comportamiento y las preferencias del usuario, la IA puede ayudar a los diseñadores a crear sistemas más intuitivos y receptivos que satisfagan específicamente las necesidades de los usuarios con discapacidades [25].

6.3. Sistemas de comunicación alternativa

A medida que la tecnología avanza, los sistemas alternativos de comunicación se vuelven cada vez más importantes para permitir que los usuarios, especialmente aquellos con discapacidades, interactúen de manera efectiva con las computadoras. Estos sistemas abarcan diversos métodos y tecnologías que facilitan la comunicación más allá de los métodos tradicionales.

6.3.1. Comunicación basada en gestos

El uso de gestos manuales ha sido ampliamente explorado como un método de comunicación existiendo tecnologías de reconocimiento de gestos que permiten a los usuarios realizar comandos a través de movimientos físicos, lo que puede mejorar la accesibilidad para individuos que tienen dificultades con los dispositivos de entrada tradicionales [26].

6.3.2. Interfaces cerebro-computadora

Las Interfaces Cerebro-Computadora (BCI) representan un enfoque revolucionario en la comunicación, permitiendo a los usuarios controlar computadoras directamente a través de la actividad cerebral [27]. Estas pueden utilizar estímulos visuales u otras señales para provocar respuestas cerebrales que pueden traducirse en comandos.

También pueden diseñarse para reconocer estados emocionales o necesidades físicas, lo cual es crucial para mejorar la experiencia del usuario. Lo que puede conducir a interfaces de comunicación más personalizadas y efectivas, que puedan anticiparse a las necesidades del usuario. Por ejemplo detectar el hambre [11].

6.3.3. Comunicación Aumentativa y Alternativa

Los sistemas de Comunicación Aumentativa y Alternativa (AAC) están diseñados para apoyar a personas que tienen dificultades con la comunicación verbal. Estos sistemas pueden variar desde herramientas simples como tableros con letras hasta sofisticadas aplicaciones de software entre ellas *spellers*. Estos son interfaces que permiten a los usuarios seleccionar letras o palabras de manera eficiente, a menudo utilizando entradas mínimas, lo que facilita la comunicación en personas con limitaciones físicas o del habla [5]. Estudios recientes han identificado que las numerosas aplicaciones que brindan los AAC mejorando la interacción social y el aprendizaje para usuarios con trastornos del habla [28].

Un proyecto centrado en desarrollar un dispositivo AAC personalizado para un usuario con necesidades complejas demuestra cómo interfaces de *hardware* y software pueden mejorar significativamente la usabilidad y reducir la carga cognitiva durante las interacciones. Destacando que la personalización es clave en los sistemas AAC [29].

6.4. Predicción de palabras y oraciones

La predicción de palabras y oraciones son tareas fundamentales en el área de Procesamiento de Lenguaje Natural (NLP) que mejoran la experiencia del usuario utilizados en diversas aplicaciones, como la mensajería de texto y la redacción de correos electrónicos. Uno de los métodos más simples, pero efectivos para lograr esto es a través de los modelos *N-gram* [30].

6.4.1. Modelos *N-gram*

Un *N-gram* es una secuencia continua de n elementos de una muestra dada de texto o habla. El valor de n determina el tipo de *N-gram* de modo que un unigrama son palabras individuales, un bigrama son pares de palabras consecutivas, un trigramas son tres palabras consecutivas, así dependiendo del valor de n . Los modelos *N-gram* operan bajo el principio de que la probabilidad de que ocurra una palabra depende solo de las palabras anteriores. Esta suposición simplifica el modelado del lenguaje al reducir la complejidad involucrada en predecir la siguiente palabra en una secuencia [31].

La probabilidad de una secuencia de palabras puede aproximarse utilizando *N-grams*. Para un modelo bigrama, la probabilidad de una oración se calcula como la probabilidad condicional de cada palabra dada su predecesora. Este cálculo se basa en conteos de frecuencias obtenidas de un conjunto de palabras para su entrenamiento llamado corpus [31].

Debido a su simplicidad y efectividad los modelos *N-gram* se utilizan ampliamente para diversas tareas de NLP como predicción de palabras en la escritura, corrección de faltas ortográficas y gramáticas, traducción de textos y completar frases y oraciones [32].

Una de las grandes limitaciones de los modelos *N-gram* es, por la manera como funcionan, solo consideran una cantidad fija de palabras anteriores lo que puede llevar a malas predicciones en un texto muy largo. Por lo que para mitigar algunos de estos problemas es

necesario realizar técnicas como suavizado, o pre-entrenar el programa con un n lo suficientemente amplio para abarcar el lenguaje necesario y lo suficientemente pequeño para que las operaciones no tomen mucho tiempo [33].

Fue desarrollada una solución que permite a las personas con movilidad limitada comunicarse de manera eficiente mediante un método de entrada único, con la intención de que en el futuro pueda conectarse cualquier interfaz que interactúe con el usuario para escribir, ya sea un casco de electroencefalografía (EEG), una interfaz ocular u otra tecnología. La idea es proporcionar una herramienta que mejore la accesibilidad y la autonomía de estos usuarios, utilizando un modelo predictivo que les ayude a escribir con menos esfuerzo.

La necesidad de este proyecto surge de las limitaciones que enfrentan los sistemas actuales, los cuales suelen ser costosos, poco accesibles o difíciles de usar. Nuestro enfoque está orientado a maximizar la simplicidad y efectividad, abordando tanto la usabilidad como la compatibilidad del sistema para llegar al mayor número posible de usuarios.

7.1. Diseño y desarrollo de la interfaz de usuario

El proceso comenzó con el diseño de una interfaz de usuario simple con el objetivo de proveer a los usuarios con movilidad limitada la habilidad de interactuar de manera efectiva con el *speller*. Este diseño se centró en la usabilidad, asegurando una experiencia de usuario (UX) intuitiva y fluida, reduciendo al mínimo la carga cognitiva.

Para ello, se realizó una investigación preliminar sobre los elementos de interfaz más adecuados analizando aspectos como el tamaño de los botones, la accesibilidad visual, velocidad de interacción y la distribución óptima de letras en la pantalla. Además, se consideraron opciones adaptables de la interfaz para ajustarse a las necesidades específicas de cada usuario, garantizando una experiencia personalizada y fácil de usar por personas con diversas limitaciones motoras o discapacidades físicas.

La distribución se basa en un *matrix speller* similar a los utilizados en sistemas P300, diseñados específicamente para interfaces cerebro-computadora (BCIs) [5]. Este diseño fue optimizado tomando como referencia la técnica de Faraz Akram [34]; sin embargo, en lugar de emplear *random forest* para las predicciones de texto, se utiliza un enfoque de *N-grams* que permite al modelo aprender activamente. Inspirado también en el *Hex-O-Spell* de Blankertz et al. [35], se adoptaron grupos de caracteres en la navegación, lo cual incrementa la precisión y mejora la atención del usuario. De acuerdo con las recomendaciones de Rezeika et al. [5], el aumento de comandos reduce el rendimiento. Para disminuir esto se agruparon comandos similares donde era posible para reducir el tiempo de escritura.

Se diseñó una interfaz limpia y minimalista, con botones grandes y distinguibles. Los colores fueron cuidadosamente seleccionados para mejorar la visibilidad, y se añadieron patrones específicos a los botones según su estado, de modo que los elementos visuales sean claros para usuarios con deficiencias visuales o daltonismo. Además, se incluyó una opción de modo para tritanopia, adaptando la paleta de colores específicamente para este tipo de ceguera. [36]

El *layout* de las teclas en el teclado se organizó según la frecuencia de uso de cada letra en el idioma seleccionado, permitiendo que las letras más comunes sean más accesibles y reduciendo así el tiempo para escribir palabras frecuentes. También se implementó un *layout* alternativo para la primera letra de cada palabra, empleando frecuencias optimizadas para las letras que suelen iniciar palabras, lo cual mejora aún más la velocidad de escritura. Este sistema permite integrar nuevos idiomas fácilmente por medio de una lista de caracteres organizada por frecuencias.

La interfaz se desarrolló utilizando tecnologías web comunes, como *React* para la gestión de componentes y *CSS* para el diseño visual. Se incluyeron varios apartados: el menú de inicio, un teclado de escritura, un teclado de navegación y una pantalla de configuración, todo orientado a que el usuario pueda navegar por la aplicación mediante un único método de entrada.

Dentro de las opciones de configuración, es posible ajustar parámetros como el tamaño, la posición y la transparencia de la ventana, asegurando que el sistema se adapte a diferentes dispositivos y situaciones, optimizando la experiencia del usuario.

7.2. Implementación de funcionalidades y compatibilidad

En esta etapa se implementó la funcionalidad principal del sistema, que permite al usuario escribir utilizando un único botón de entrada. Se trabajó en la compatibilidad del sistema para asegurar que el usuario pueda utilizar la aplicación en diferentes sistemas operativos y dispositivos de *hardware*, minimizando así las barreras tecnológicas. Para garantizar el funcionamiento en una amplia variedad de sistemas operativos, se optó por desarrollar en *ElectronJs* junto con *Vite* como el constructor, y *TypeScript* como principal lenguaje de programación. Esto nos permitió construir la aplicaciones para ser multiplataforma de manera eficiente, aprovechando tecnologías web y asegurando una amplia compatibilidad sin sacrificar funcionalidad.

7.2.1. Arquitectura

Para la implementación se adoptó una arquitectura Modelo-Vista-Modelo de Vista (MVVM), permitiendo una clara separación entre lógica, interfaz y manejo de datos, lo cual facilita la implementación mediante una mejor organización y reutilización de componentes similares [37].

En esta arquitectura, el modelo gestiona tanto los datos como la lógica del sistema, incluyendo el modelo de *N-grams* que genera y actualiza el lenguaje, sugiriendo palabras en función del contexto, basado en las entradas previas del usuario el cual, con cada uso, mejora su precisión adaptándose a las preferencias de escritura del usuario.

La vista está formada por los componentes de la interfaz mencionados en la sección anterior, los cuales se comunican con el modelo de vista para actualizarse dinámicamente según las interacciones del usuario y las sugerencias generadas por el modelo. Este modelo de vista actúa como intermediario, gestionando la lógica de estado de la interfaz, conectando ambos mediante conectores de *Inter-Process Communication* (IPC) y facilitando la actualización de configuraciones y solicitudes de predicción de palabras. Esto permite que la vista permanezca independiente de la lógica del modelo, mejorando la modularidad del sistema y facilitando futuras modificaciones.

7.2.2. Funcionalidad

Con el objetivo de mantener un único método de entrada, se implementó un sistema que permite seleccionar opciones en pantalla mediante un solo botón registrando una tecla global. Al pulsar esta tecla, el sistema realiza una selección mientras un cursor recorre las opciones disponibles en pantalla. La tecla de entrada es configurable según las necesidades del usuario, y el sistema está diseñado para aislar esta selección de modo que sea simple la implementación de otras interfaces que puedan ejecutar esta misma función solamente mandando un comando.

El selector rota a través de rutas predeterminadas, que agrupan caracteres u opciones. Una vez el usuario presiona la tecla en el grupo deseado, el selector comienza a recorrer caracteres individuales o sub-opciones hasta llegar a la opción final, que puede ser una letra o un comando.

Además del teclado principal, se añadieron teclados secundarios con opciones útiles que no son tan comunes como para ampliar el teclado original: un teclado de símbolos, que incluye todos los caracteres accesibles al utilizar la tecla *shift* en un teclado convencional; un teclado numérico, que replica las funcionalidades de un teclado físico; y un teclado de emojis, dado que estos son elementos esenciales en la comunicación actual, especialmente para las nuevas generaciones [38]. Asimismo, se incorporó un modo de navegación que permite usar comandos de desplazamiento sin necesidad de un *mouse*, facilitando la navegación por la pantalla. Este modo permite además agregar comandos específicos para distintos programas, como los comandos propios de un navegador, ampliando así la versatilidad y adaptabilidad del sistema.

El sistema también optimiza la escritura de forma automática al insertar espacios después

de seleccionar una palabra de las predicciones y al capitalizar automáticamente la primera palabra al inicio de una oración. Para el idioma español, se añadieron teclas rápidas para caracteres acentuados y diéresis, evitando así la combinación de múltiples teclas. Además que al seleccionar los signos de exclamación o interrogación, estos se colocan en su forma invertida al inicio de la oración siguiendo reglas gramaticales [39].

Se implementó un modelo predictivo basado en *N-grams* para facilitar la escritura de frases, usando las entradas del usuario para predecir la palabra más probable y ofrecer las 10 mejores. Este utiliza bi-gramas, que logran un buen equilibrio entre precisión y velocidad, además de ser livianos, permitiendo su uso en dispositivos de baja capacidad. Este modelo incluye puntuación, como comas y puntos, cuando detecta la necesidad de cerrar una oración o insertar una coma, reduciendo así el número de selecciones necesarias. El modelo se actualiza dinámicamente con las entradas del usuario, adaptándose a su estilo de escritura y vocabulario específico.

Para el idioma inglés, el modelo fue precargado con el *corpus* de la librería *nltk* "*brown*", que proporciona una base sólida, especialmente útil para pruebas. Este corpus fue procesado previamente en Python y exportado, optimizando el tiempo de procesamiento en el *speller*.

7.2.3. Interacción con el computador

Para que este prototipo pueda comunicarse eficazmente con la computadora, se añadió la capacidad de interactuar mediante la biblioteca *robotjs*, la cual permite enviar comandos a las ventanas abiertas en pantalla. Esta biblioteca es de código abierto y multiplataforma lo que significa que tiene compatibilidad con sistemas operativos como *Mac*, *Windows* y *Linux*, lo cual expande significativamente la flexibilidad y el alcance del sistema [40].

7.3. Integración y prototipo

Una vez desarrollada la interfaz y las funcionalidades básicas, se integraron todos los componentes en un prototipo funcional, como se muestra en la Figura 1. El *speller* utiliza su modelo de *n-grams* para recomendar las 10 palabras más probables, facilitando así su uso. Además, la organización del teclado sigue la frecuencia de las letras en el idioma seleccionado, optimizando el tiempo de escritura.

En idiomas donde existe una lista de caracteres más frecuentes al inicio de palabras, se despliega un teclado alternativo para la primera letra de cada palabra. Además, la primera letra de cada oración se capitaliza automáticamente. El sistema también incluye menús específicos para símbolos, letras y emojis (ver Figura 2).

Muchas veces es necesario desplazarse entre distintas pantallas para llegar a la parte de escritura. Por ello, se implementó un modo de navegación con comandos comunes para moverse por la pantalla (ver Figura 3).

Este modo puede ampliarse para agregar funcionalidades específicas para ciertos programas. En este caso, se incluyeron algunos comandos que funcionan en la mayoría de los

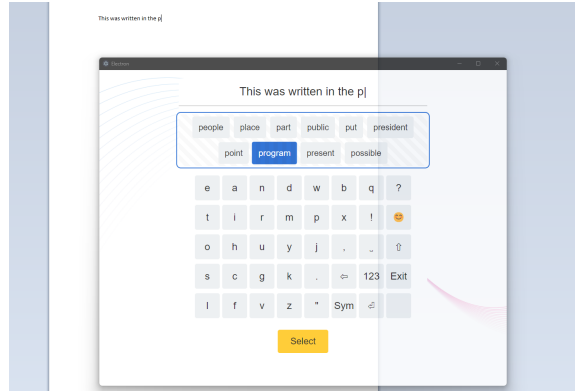


Figura 1: Demostración de *speller* escribiendo un documento.

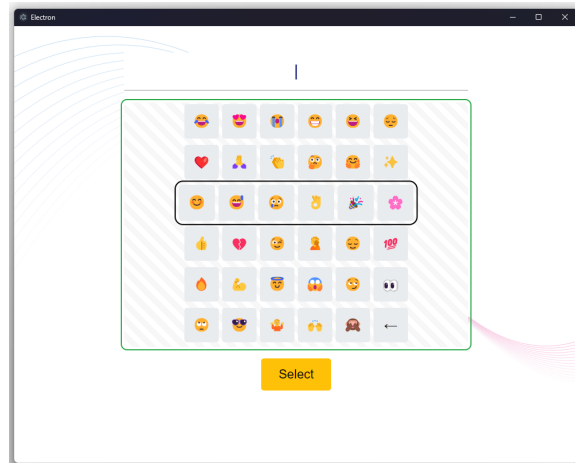


Figura 2: Teclado de emojis del *speller*

navegadores (ver Figura 4).

Todas las configuraciones están organizadas en un apartado accesible mediante una única entrada (ver Figura 5). Este menú permite ajustar opciones como la velocidad de ciclo, cambiar entre idiomas y modificar la transparencia y posición de la ventana, en caso de que esta oculte información relevante.

La selección de idiomas está diseñada de manera que, para agregar uno nuevo, solo se requiere cargar una lista de caracteres ordenados por frecuencia. Para asegurar la compatibilidad con distintos tipos de pantallas, se han preparado tamaños de ventana variables (ver Figura 6).

Los colores predeterminados están pensados para usuarios con deuteranopia y protanopia; sin embargo, esta combinación puede dificultar la visibilidad para personas con tritanopia [36]. Para estos casos, se añadió un modo de daltonismo que cambia la paleta de colores, mejorando la accesibilidad (ver Figura 7).

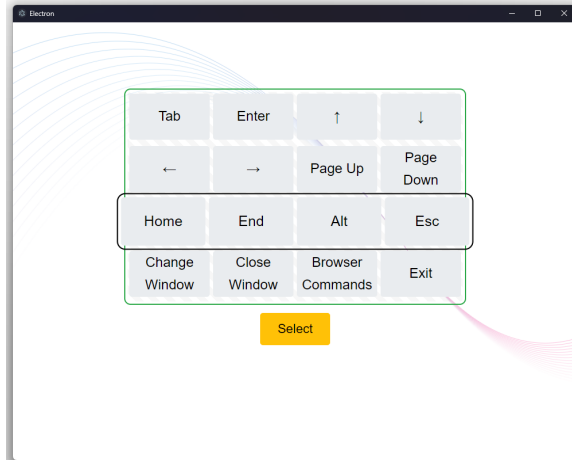


Figura 3: Modo navegación del *speller*

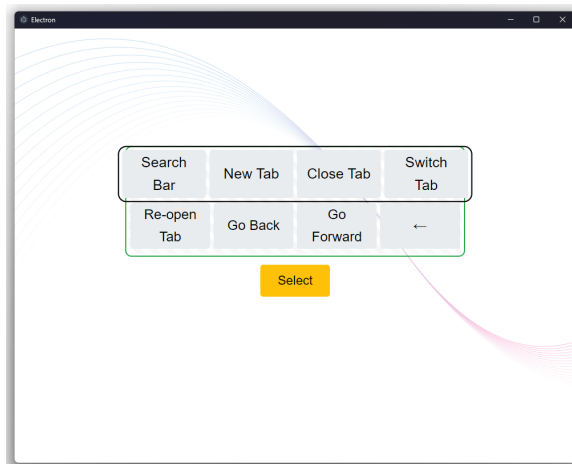


Figura 4: Modo con configuraciones de navegador del *speller*



Figura 5: Menú de configuración del *speller*

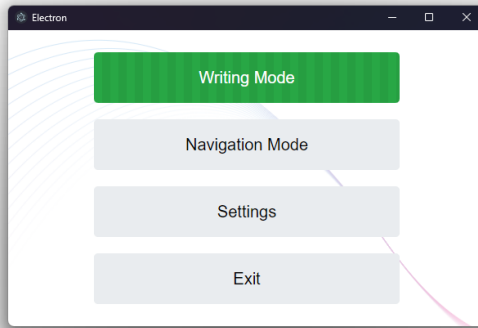


Figura 6: Menú principal del *speller* en tamaño pequeño



Figura 7: Menú de configuración del *speller* con el modo daltonismo activado

8.1. Pruebas de funcionalidad

Las pruebas funcionales buscan realizar una comparación entre los requisitos del software y sus características, de modo que cada función se compara con el requisito para determinar si su resultado cumple con las expectativas. [41]

Según lo mencionado por Giroux *et al* [19] se obtienen múltiples beneficios al trabajar con participantes saludables simulando las acciones de una persona con discapacidad para, de forma preliminar, identificar problemas de usabilidad en tecnologías de asistencia por lo que destaca la fiabilidad de la evaluación por parte de este grupo.

Para evaluar la funcionalidad, precisión y usabilidad del programa, se efectuaron pruebas a un grupo de cuatro usuarios. Tres de estos, sin ninguna limitación de movilidad, y un usuario que presenta la enfermedad de *Charcot-Marie-Tooth* (CMT), caracterizada por debilidad muscular progresiva y atrofia de las extremidades [42]. Estas fueron realizadas en los sistemas operativos *macOS* y *Windows* en las respectivas computadoras de los usuarios utilizando una tecla como único método de entrada.

8.1.1. Pruebas de eficacia

Los usuarios tienen el objetivo específico de completar frases comunes en inglés, esto para que el modelo pre cargado simule un ambiente ya entrenado por el usuario.

A pesar de que inicialmente les resultó complicado, los usuarios lograron completar frases como: *Good morning everyone.*, *I want to read the newspaper.* y el nombre de su canción favorita con el uso de las predicciones de texto, reduciendo el número total de interacciones

en comparación de seleccionar caracter por caracter para ir formando palabras.

8.1.2. Pruebas de precisión

Para medir la precisión del programa, se verifica que, al escribir las oraciones dichas anteriormente, se cumpla con seguir correctamente las indicaciones dadas por el usuario. En este se puede observar que el programa sigue correctamente las indicaciones del usuario, siempre escribiendo los caracteres y sugerencias correctos al momento en que el usuario los selecciona, agregando la puntuación y espacios correctamente.

8.1.3. Pruebas de usabilidad

Los usuarios encontraron que, aunque con el tiempo el programa se vuelve más sencillo de usar, al inicio resultaba difícil entender la lógica de cómo funcionaba el sistema. Al escribir sus primeras palabras, las hacían de forma bastante lenta, debido a que no conocían exactamente cómo se movían el selector o las posiciones de las letras. Sin embargo, posteriormente se sintieron más cómodos y pudieron utilizar el programa con una mayor rapidez. Incluso, un usuario, después de probar en la velocidad más baja, accedió a las opciones y aumentó la velocidad a media para adaptarla a su ritmo.

8.1.4. Observaciones de un usuario con CMT

El usuario con CMT, representando a una persona con una necesidad real del programa, mencionó que el software, en efecto, facilita el acceso y reduce la necesidad de realizar movimientos repetitivos. Asimismo, indicó que en su caso solamente utiliza un dedo para manejar la computadora y que, debido a su enfermedad, en ocasiones debe hacer un esfuerzo enorme para soportar el dolor y mover los brazos.

También señaló que conoce a personas con movilidad aún más reducida y considera que el programa podría ser de gran ayuda para ellas. Destaco la ventaja de utilizar un único método de entrada, ya que incluso con un teclado convencional se evita que la persona tenga que desplazarse a otras partes del mismo, lo que disminuye el esfuerzo requerido. Comentando que le hubiera ayudado durante periodos en los que le costaba mover los brazos debido a la inflamación; al solo tener que mover un músculo, el proceso hubiera sido mucho más efectivo.

9.1. Evaluación de resultados

Las pruebas realizadas con los cuatro usuarios, incluyendo un usuario con Charcot-Marie-Tooth (CMT), proporcionan evidencia sobre la funcionalidad de la interfaz desarrollada:

9.1.1. Interfaz de usuario simple y adaptable

Los resultados demuestran que, aunque inicialmente los usuarios encontraron dificultades para comprender la lógica del sistema, con el tiempo lograron adaptarse y utilizar el programa de manera más eficiente. Al escribir sus primeras palabras, los usuarios las construían de forma lenta debido al desconocimiento de las posiciones de las letras y el funcionamiento del selector. Sin embargo, posteriormente se sintieron más cómodos y pudieron utilizar el programa con mayor rapidez. Esto indica que la interfaz es simple y adaptable, facilitando la escritura y la interacción con computadoras personales para personas con movilidad limitada.

9.1.2. Respuesta eficaz e inclusiva

Al ser probado por usuarios sin limitaciones y por un usuario con CMT, se evaluó la efectividad del programa en distintos niveles de capacidad. Logrando completar oraciones utilizando funciones de predicción de texto, reduciendo el número de interacciones necesarias con la selección de caracteres y de forma precisa. Esto evidencia que la interfaz responde eficazmente a diferentes niveles de habilidad, asegurando una experiencia eficiente y precisa para todos los usuarios.

9.1.3. Compatibilidad futura

Las pruebas se realizaron utilizando una tecla como único método de entrada. Esto demuestra que el sistema puede operar eficientemente con interacción limitada, facilitando su integración con tecnologías alternativas y reduciendo el esfuerzo físico, lo que permite que personas con movilidad limitada puedan beneficiarse del programa.

9.1.4. Impacto del modelo *N-grams*

Durante las pruebas, los usuarios pudieron completar frases comunes en inglés utilizando las predicciones de texto, pre-cargadas, lo que redujo el número total de interacciones en comparación con la selección de carácter por carácter. Confirmando así que las funciones de predicción basadas en modelos *n-gram* son efectivas en esta aplicación, incrementando la eficiencia de la comunicación, especialmente en textos con palabras comunes.

9.2. Análisis de impacto

El programa amplía las posibilidades de interacción para personas con limitaciones de movilidad. Lo que es especialmente significativo para usuarios con enfermedades como CMT, quienes enfrentan desafíos al utilizar dispositivos de entrada convencionales, ya que los movimientos repetitivos y el uso de grandes combinaciones de músculos pueden causar fatiga e incluso dolor; por lo que el programa puede tener un impacto positivo en la calidad de vida al reducir estos problemas asociados con el uso de dispositivos tradicionales.

Al contar con posibilidad hacer ajustes de calidad de vida como la velocidad, posición en la pantalla, transparencia, idioma y paleta de colores para personas con daltonismo se permite que el programa sea utilizado por una amplia gama de usuarios con diversas necesidades, aumentando la inclusividad y eficacia de la solución.

Obteniendo una respuesta positiva de una persona con una necesidad real del programa, respalda la efectividad, precisión y usabilidad del programa. Confirmando así que el programa desarrollado cumple con los objetivos planteados, ofreciendo una interfaz simple, adaptable y eficaz para usuarios con movilidad limitada.

1. Se ha desarrollado una interfaz de usuario simple y adaptable que facilita la escritura e interacción con computadores personales para las personas con movilidad limitada.
2. La interfaz desarrollada responde eficazmente a los diferentes niveles de capacidad de los usuarios al ser simple y directa, asegurando una experiencia accesible y eficiente.
3. La solución garantiza compatibilidad futura al limitar la interacción a un único método de entrada. Esto permite que el sistema se integre fácilmente con diversidad de tecnologías, como *eye-tracking* e interfaces cerebro-computadora, ampliando su potencial futuro para distintos entornos y usuarios.
4. La implementación de funciones de predicción de texto, basadas en modelos *N-gram*, ha demostrado ser efectiva, ya que reduce el tiempo y esfuerzo necesarios para que los usuarios escriban, incrementando así la eficiencia de la comunicación, especialmente en textos con palabras comunes.
5. Las pruebas realizadas demuestran que, aunque inicialmente los usuarios encontraron dificultades, lograron adaptarse y utilizar el programa de manera eficiente, indicando que el diseño de la interfaz es efectivo y accesible.

CAPÍTULO 11

Recomendaciones

1. Se sugiere continuar expandiendo la compatibilidad del sistema para incluir mayor variedad de tecnologías de asistencia como dispositivos de *eye-tracking* o interfaces cerebro-computadora. Esto incrementara la posibilidad de adopción del programa y facilitara el uso para personas con discapacidades físicas severas.
2. Se recomienda llevar a cabo evaluaciones a largo plazo con una muestra más amplia de usuarios con diferentes tipos y grados de discapacidad motora. Esto proporcionará una comprensión más profunda del impacto del programa en la vida diaria y permitirá identificar áreas adicionales de mejora.

-
- [1] MMIAalytics, *Rompiendo barreras: el poder de la tecnología en la inclusión de personas con discapacidad*, elDiario.es, ago. de 2023. dirección: https://www.eldiario.es/canariasahora/brands/canarias-analytics/rompiendo-barreras-tecnologia-inclusion-personas-discapacidad-1_132_10474390.html (visitado 29-10-2024).
 - [2] E. Comunicacion, *¿Cómo afecta la brecha digital a las personas con discapacidad?* Pasiona Consulting, abr. de 2024. dirección: <https://pasiona.com/brecha-digital-personas-discapacidad/> (visitado 29-10-2024).
 - [3] I. Labs, *Assistive context-aware toolkit (ACAT) - user guide*, Intel. dirección: <https://www.intel.com/content/www/us/en/content-details/812454/assistive-context-aware-toolkit-acat-user-guide.html> (visitado 05-2024).
 - [4] I. Labs, *Assistive Context-Aware Toolkit (ACAT) - User Guide*, Intel. dirección: <https://www.intel.com/content/www/us/en/content-details/812454/assistive-context-aware-toolkit-acat-user-guide.html> (visitado 29-05-2024).
 - [5] A. Rezeika, M. Benda, P. Stawicki, F. Gembler, A. Saboor e I. Volosyak, “Brain–Computer Interface Spellers: A Review,” *Brain Sciences*, vol. 8, pág. 57, abr. de 2018. DOI: 10.3390/brainsci8040057. dirección: <https://www.mdpi.com/2076-3425/8/4/57>.
 - [6] A. Lopez, *IoP y recursos tecnológicos para personas con discapacidad | Decimo Septima Edicion - Agrotecnología*, Github.io, ago. de 2020. dirección: <https://revistaecys.github.io/17Edicion/articulo05.html> (visitado 30-10-2024).
 - [7] AGN, *Promueven las TIC en beneficio de personas discapacitadas - Agencia Guatemalteca de Noticias*, Agencia Guatemalteca de Noticias - AGN, jun. de 2022. dirección: <https://agn.gt/promueven-las-tic-en-beneficio-de-personas-discapacitadas/> (visitado 30-10-2024).
 - [8] I. Reyes, *Sin barreras: más acceso tecnológico para personas con discapacidad*, Prensa Libre, dic. de 2020. dirección: <https://www.prensalibre.com/vida/tecnologia/sin-barreras-mas-acceso-tecnologico-para-personas-con-discapacidad/> (visitado 30-10-2024).

- [9] D. Pawuś y S. Paszkiel, “BCI wheelchair control using expert system classifying EEG signals based on power spectrum estimation and nervous tics detection,” *Applied Sciences*, vol. 12, pág. 10 385, oct. de 2022. DOI: 10.3390/app122010385.
- [10] J. Arshad, A. Qaisar, A.-U. Rehman et al., “Intelligent control of robotic arm using brain computer interface and artificial intelligence,” *Applied Sciences*, vol. 12, pág. 10 813, oct. de 2022. DOI: 10.3390/app122110813.
- [11] E. Cetin, G. Bilgin, S. Bilgin, Y. Bicer Gomceli y A. M. Kayikci, “Investigation of Hunger and Satiety Status During Eyes Open and Closed Using EEG Signals,” *Journal of Intelligent Systems with Applications*, págs. 35-38, mayo de 2020. DOI: 10.54856/jiswa.202005105.
- [12] M. Rashid, N. Sulaiman, A. Majeed et al., “Current status, challenges, and possible solutions of EEG-Based brain-computer interface: A comprehensive review,” *Frontiers in Neurorobotics*, vol. 14, jun. de 2020. DOI: 10.3389/fnbot.2020.00025.
- [13] S. Jacob, V. G. Menon, F. Al-Turjman, V. P. G. y L. Mostarda, “Artificial Muscle Intelligence System With Deep Learning for Post-Stroke Assistance and Rehabilitation,” *IEEE Access*, vol. 7, págs. 133 463-133 473, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2941491. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8839118>.
- [14] I. B. I. Association, *Brain Injury Facts*, International Brain Injury Association. dirección: <https://www.internationalbrain.org/resources/brain-injury-facts>.
- [15] CONADI, *Datos Estadísticos de Personas con Discapacidad en Guatemala*, Conadi.gob.gt, 2024. dirección: <https://datosestadisticos.conadi.gob.gt/revista2/>.
- [16] CONADI, *Convención Sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad*, 2020. dirección: <https://conadi.gob.gt/web/wp-content/uploads/2020/02/Convencion-sobre-los-derechos.pdf>.
- [17] K. B. Budak, G. Atefi, V. Hoel et al., “Can technology impact loneliness in dementia? A scoping review on the role of assistive technologies in delivering psychosocial interventions in long-term care,” *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, págs. 1-13, nov. de 2021. DOI: 10.1080/17483107.2021.1984594.
- [18] I. S. Rodrigues, “IoT as Assistive Technology: Applications in Education as a Tool for Inclusion,” *International Journal of Technology in Education*, vol. 6, págs. 100-112, feb. de 2023. DOI: 10.46328/ijte.357.
- [19] F. Giroux, L. Couture, C. Lasbareille et al., “Usability Evaluation of Assistive Technology for ICT Accessibility: Lessons Learned with Stroke Patients and Able-Bodied Participants Experiencing a Motor Dysfunction Simulation,” *Lecture notes in information systems and organisation*, págs. 349-359, ene. de 2022. DOI: 10.1007/978-3-031-13064-9_35. (visitado 18-04-2024).
- [20] V. Kanade, *What Is HCI (Human-Computer Interaction)? Meaning, Importance, Examples, and Goals*, Spiceworks, jul. de 2022. dirección: <https://www.spiceworks.com/tech/artificial-intelligence/articles/what-is-hci/>.
- [21] Y. Luo, *Enhancing educational interfaces: Integrating user-centric design principles for effective and inclusive learning environments*, Applied y Computational Engineering, 2024. (visitado 08-10-2024).

- [22] M. S y M. N, “Human Computer Interaction for Disabled People Using Artificial Intelligence,” *IEEE*, mayo de 2024. DOI: 10.1109/iceccc61767.2024.10593865. (visitado 08-10-2024).
- [23] R. Jha, F. Hossain, A. Mahedi, C. Rai, M. M. Islam y R. K. Sah, “Analyzing the Effectiveness of Voice-Based User Interfaces in Enhancing Accessibility in Human-Computer Interaction,” *IEEE*, vol. 14, págs. 777-781, abr. de 2024. DOI: 10.1109/csnt60213.2024.10545835. (visitado 08-10-2024).
- [24] Neuralink, *Neuralink*, neuralink.com, 2024. dirección: <https://neuralink.com/>.
- [25] M. Antona, G. Margetis, S. Ntoa y H. Degen, “Special Issue on AI in HCI,” *International Journal of Human-Computer Interaction*, págs. 1-4, feb. de 2023. DOI: 10.1080/10447318.2023.2177421.
- [26] M. Gonçalves, M. Pinheiro, V. Teichrieb, M. Gonçalves, M. Pinheiro y G. Ramalho, “MARIANA GONÇALVES MACIEL PINHEIRO AN INVESTIGATION THROUGH SCI-FI MOVIES AND STATE-OF-THE-ART LITERATURE ON HAND GESTURE-BASED INTERACTION RECIFE, 2016 FEDERAL UNIVERSITY OF PERNAMBUCO INFORMATICS CENTER GRADUATE COURSE IN COMPUTER SCIENCE,” 2017. dirección: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:221783276>.
- [27] J. J. Shih, D. J. Krusienski y J. R. Wolpaw, “Brain-Computer Interfaces in Medicine,” *Mayo Clinic Proceedings*, vol. 87, págs. 268-279, mar. de 2012. DOI: 10.1016/j.mayocp.2011.12.008. dirección: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3497935/>.
- [28] R. E. d. O. S. Ascari, R. Pereira y L. Silva, “Mobile Interaction for Augmentative and Alternative Communication: a Systematic Mapping,” *Journal on Interactive Systems*, vol. 9, pág. 1, ago. de 2018. DOI: 10.5753/jis.2018.704.
- [29] F. D. Cascone, G. D. Gironimo, A. Gloria, M. Martorelli y A. Lanzotti, “An intuitive hardware layout for personalized augmentative and alternative communication systems,” en *Symposium on Psychology-Based Technologies*, 2019. dirección: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:209453772>.
- [30] E. C. V. Glossary, *NLP Definition | Encord*, Encord.com, 2023. dirección: <https://encord.com/glossary/nlp-definition/> (visitado 29-10-2024).
- [31] S. Srinidhi, *Understanding Word N-grams and N-gram Probability in Natural Language Processing*, Medium, ene. de 2020. dirección: <https://towardsdatascience.com/understanding-word-n-grams-and-n-gram-probability-in-natural-language-processing-9d9eef0fa058>.
- [32] R. Taylor, *Understanding N-Gram Language Models*, Rev. dirección: <https://www.rev.com/blog/resources/understanding-n-gram-language-models>.
- [33] D. Bourgin, *N-gram smoothing models — numpy-ml 0.1.0 documentation*, numpy-ml, 2022. dirección: https://numpy-ml.readthedocs.io/en/latest/numpy_ml_ngram.html (visitado 08-10-2024).
- [34] F. Akram, S. M. Han y T.-S. Kim, “An efficient word typing P300-BCI system using a modified T9 interface and random forest classifier,” *Computers in Biology and Medicine*, vol. 56, págs. 30-36, 2015, ISSN: 0010-4825. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2014.10.021>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010482514002959>.

- [35] B. Blankertz, G. Dornhege, M. Krauledat et al., “The Berlin Brain-Computer Interface presents the novel mental typewriter Hex-o-Spell,” en *Proceedings of the 3rd International Brain-Computer Interface Workshop and Training Course 2006*, 2006, págs. 108-109. dirección: <https://mural.maynoothuniversity.ie/1786/>.
- [36] R. Staats, *Designing UI with Color Blind Users in Mind*, Secret Stache Media, sep. de 2018. dirección: <https://www.secretstache.com/blog/designing-for-color-blind-users/>.
- [37] michaelstonis, *Model-View-ViewModel*, learn.microsoft.com, abr. de 2022. dirección: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/architecture/maui/mvvm>.
- [38] C. v. Zyl, *Why emojis matter in digital communication*, League Digital, 2020. dirección: <https://www.leaguedigital.com/blogs/why-emojis-matter-in-digital-communication/>.
- [39] RAE, *Diccionario panhispánico de dudas RAE - ASALE*, «Diccionario panhispánico de dudas», jul. de 2024. dirección: <https://www.rae.es/dpd/signos%20de%20interrogaci%C3%B3n%20y%20exclamaci%C3%B3n> (visitado 31-10-2024).
- [40] J. Stallings, *RobotJS - Node.js Desktop Automation*, Robotjs.io, 2024. dirección: <https://robotjs.io/> (visitado 31-10-2024).
- [41] OpenText, *Functional Testing*, OpenText, 2024. dirección: <https://www.opentext.com/es-es/que-es/functional-testing>.
- [42] N. C. for Advancing Translational Sciences, *Enfermedad de Charcot-Marie-Tooth | Genetic and Rare Diseases Information Center (GARD) – an NCATS Program*, Nih.gov, 2016. dirección: <https://rarediseases.info.nih.gov/espanol/11876/enfermedad-de-charcot-marie-tooth>.