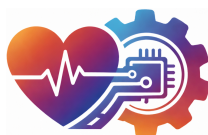




**UNIVERSIDAD
DE BURGOS**

Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería de la Salud



**TFG del Grado en Ingeniería de la
Salud**

**Sistemas alternativos de
comunicación para personas
con discapacidad**

Presentado por Lucía Gil Aire
en Universidad de Burgos

8 de junio de 2026

Tutor: Pedro Luis Sánchez Ortega

Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado aborda el diseño e implementación de un sistema de información y recomendación automatizado de Sistemas Aumentativos y Alternativos de Comunicación (SAAC) para personas afectadas por Esclerosis Lateral Amiotrófica (ELA). Debido a la naturaleza degenerativa de esta enfermedad, la pérdida de la comunicación verbal impacta drásticamente en la calidad de vida de los pacientes. Para mitigar esta problemática, se ha desarrollado una base de datos relacional que unifica un catálogo de 46 soluciones clasificadas en software, hardware y servicios de clonación de voz recopiladas de fuentes de referencia como el CEAPAT y la asociación ELA Andalucía. Deriva en la creación de una página web con cuestionario que evalúa el perfil del usuario y le devuelve una recomendación personalizada ajustada a sus capacidades. La solución permite realizar filtrados dinámicos multivariable y almacenar el histórico de consultas sentando las bases tecnológicas para agilizar la selección de estos sistemas en entornos clínicos y familiares reales.

Descriptores

Sistemas Aumentativos y Alternativos de Comunicación (SAAC), Esclerosis Lateral Amiotrófica (ELA), Tecnología asistencial, PostgreSQL, Base de datos relacional, Python, HTML, Accesibilidad web, Algoritmo de recomendación, Sistema de ayuda a la toma de decisiones.

Abstract

This Bachelor's Thesis addresses the design and implementation of an automated information and recommendation system for Augmentative and Alternative Communication (AAC) systems tailored for individuals affected by Amyotrophic Lateral Sclerosis (ALS). Due to the degenerative nature of this disease, the loss of verbal communication severely impacts patients' quality of life. To mitigate this issue, a relational database has been developed, unifying a catalog of 46 solutions classified into software, hardware, and voice cloning services gathered from reference sources such as CEAPAT and the ELA Andalucía association. This results in the creation of a website featuring a questionnaire that evaluates the user's profile and provides a personalized recommendation tailored to their capabilities. The solution enables complex multivariable dynamic filtering and stores consultation history, establishing the technological foundations to streamline the selection of these systems in real clinical and family environments.

Keywords

Augmentative and Alternative Communication (AAC), Amyotrophic Lateral Sclerosis (ALS), Assistive technology, PostgreSQL, Relational database, Python, HTML, Web accessibility, Recommendation algorithm, Decision support system.

Índice general

Índice general	iii
Índice de figuras	v
Índice de tablas	vi
Introducción	1
Objetivos	3
2.1. Objetivos específicos	3
2.2. Objetivos técnicos	4
2.3. Objetivos formativos	4
Fundamentos teóricos y estado del arte	7
3.1. Introducción	7
3.2. Esclerosis Lateral Amiotrófica (ELA)	7
3.3. Sistemas Aumentativos y Alternativos de Comunicación (SAAC)	10
3.4. Criterios técnicos de evaluación e ingeniería de atributos en SAAC	11
3.5. Modelado de variables de decisión centradas en el usuario . .	12
3.6. Fundamentos de los Sistemas de Apoyo a la Decisión (SAD)	13
3.7. Análisis del estado del arte y trabajos relacionados	14
Metodología	17
4.1. Marco metodológico y uso de herramientas asistidas	17
4.2. Descripción de los datos	17
4.3. Técnicas y herramientas	19

4.4. Metodología software	19
Resultados	21
5.1. Resumen de resultados	21
5.2. Enlace a resultados	28
Discusión	29
6.1. Discusión de los resultados	29
Conclusiones	33
7.1. Aspectos relevantes	34
Líneas de trabajo futuras	35
8.1. Optimización y accesibilidad de la plataforma web	35
8.2. Actualización del catálogo de SAAC y nuevos sistemas	36
8.3. Validación clínica con pacientes reales	36
8.4. Evolución de las funcionalidades y experiencia de usuario	36
8.5. Mejoras técnicas y evolución de la ingeniería de software	37
8.6. Conclusión	38
Bibliografía	39

Índice de figuras

5.1. Primer caso de paciente real.	22
5.2. Segundo caso de paciente real.	23
5.3. Primer caso de paciente simulado.	24
5.4. Sugerencia de voice banking preventivo.	24
5.5. Plan de respaldo.	25
5.6. Segundo caso de paciente simulado.	25
5.7. Tercer caso de paciente simulado.	26
5.8. Cuarto caso de paciente simulado.	27
5.9. Quinto caso de paciente simulado.	27
5.10. Recomendación preventiva.	28

Índice de tablas

Introducción

La Esclerosis Lateral Amiotrófica (ELA) es una enfermedad neurodegenerativa progresiva que afecta selectivamente a las neuronas motoras, destruyendo de forma irreversible el control muscular voluntario y comprometiendo de manera drástica, en fases avanzadas, la comunicación oral de las personas que la padecen [Start Stem Cells, 2026]. A medida que la enfermedad progresa, más del 80 % de los pacientes experimentan una pérdida gradual de la inteligibilidad del habla debido al deterioro bulbar, evolucionando desde la disartria hasta la anartria completa [Cave and Bloch, 2021]. Esta pérdida del canal verbal dificulta gravemente la interacción con su entorno habitual y genera un impacto directo en su autonomía personal, su autoidentidad y su bienestar emocional.

En este contexto, los Sistemas de Comunicación Aumentativa y Alternativa (SAAC) desempeñan un papel fundamental [Plena Inclusión, 2026], ya que permiten a las personas con ELA mantener la capacidad de comunicarse mediante diferentes tecnologías adaptadas a sus limitaciones y al estadio de la enfermedad [Smith et al., 2025]. Actualmente existe una amplia variedad de SAAC, que difieren en cuanto a su nivel tecnológico, métodos de acceso (interfaces visuales, pulsadores o control cefálico) y plataformas disponibles, lo que convierte el proceso de selección del sistema óptimo en una tarea altamente compleja tanto para los pacientes como para sus familias y los profesionales sanitarios.

Este trabajo se enmarca dentro del ámbito de la Ingeniería de la Salud y aborda esta problemática desde una perspectiva de apoyo a la toma de decisiones. Aunque ya existen catálogos oficiales y guías clínicas estáticas que recopilan información sobre los distintos SAAC disponibles [CEPAT - IMSERSO, 2024, ELA Andalucía, 2023], estos suelen presentarse en formatos extensos y estáticos que requieren tiempo, conocimientos

previos y esfuerzo por parte del usuario para extraer conclusiones. En la práctica clínica real, especialmente en el caso de enfermedades de progresión acelerada como la ELA, la ventana temporal para intervenir de manera preventiva es crítica, por lo que los métodos de consulta estáticos y manuales resultan ineficientes [Davis et al., 2026].

La motivación de este trabajo surge, por tanto, de la necesidad de transformar la información técnica existente en una herramienta más accesible, estructurada y orientada a la toma de decisiones. Desde la Ingeniería de la Salud es posible formalizar el conocimiento disponible sobre los SAAC y convertirlo en criterios y reglas que faciliten la selección del sistema más adecuado según las necesidades de cada usuario. Además, hará posible reconocer aquellos casos en los que los sistemas existentes no cubren completamente dichas necesidades, facilitará la identificación de carencias y permitirá desarrollar propuestas de mejora desde un enfoque de diseño inclusivo.

El objetivo principal de este trabajo es realizar una revisión y comparación técnica de los SAAC utilizados por personas con ELA y, a partir de dicho análisis, diseñar una herramienta de apoyo a la decisión que permita orientar sobre las opciones más adecuadas en función de cada perfil.

La memoria se estructura de la siguiente manera: El capítulo 2 presenta los objetivos específicos, técnicos y formativos del trabajo. El capítulo 3 desarrolla el marco teórico, revisando la literatura existente sobre la ELA, los sistemas SAAC disponibles y las herramientas de apoyo a la decisión en este ámbito. El capítulo 4 describe la metodología seguida durante el desarrollo, incluyendo la arquitectura de la aplicación, el diseño de la base de datos y el algoritmo de filtrado. El capítulo 5 presenta los resultados obtenidos tras la implementación y validación del sistema. Incluye también los enlaces correspondientes a la página desarrollada y el repositorio GitHub. El capítulo 6 recoge la discusión de dichos resultados, analizando su alcance y limitaciones. El capítulo 7 expone las conclusiones del trabajo. Finalmente, el capítulo 8 propone las líneas de trabajo futuras que podrían continuarse a partir de este proyecto.

Objetivos

El objetivo general de este Trabajo de Fin de Grado es analizar los Sistemas Aumentativos y Alternativos de Comunicación (SAAC) existentes y desarrollar una aplicación web interactiva que, mediante un cuestionario, recomiende de forma personalizada el sistema más adecuado para cada paciente.

2.1. Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- **Analizar el catálogo tecnológico:** Estudiar las soluciones de SAAC disponibles en el mercado, indexando sus especificaciones de hardware, software y métodos de acceso.
- **Definir las variables clínicas:** Identificar los parámetros de capacidad del usuario (motora, cognitiva, visual y lingüística) que determinan la elección de un SAAC.
- **Diseñar el modelo de recomendación:** Desarrollar la lógica que vincula las respuestas del cuestionario del usuario con las características de los sistemas del catálogo.
- **Desarrollar un prototipo funcional:** Construir la aplicación web interactiva que implemente el cuestionario, procese los filtros y recoja feedback de forma anónima.

- **Evaluar limitaciones del sistema:** Analizar de forma crítica los puntos débiles del prototipo, su infraestructura y su viabilidad legal de cara a un uso clínico real.

2.2. Objetivos técnicos

Desde la perspectiva de la ingeniería del software, se establecen los siguientes objetivos técnicos:

- **Implementar la base de datos:** Modelar y construir una base de datos relacional en PostgreSQL utilizando el ORM SQLAlchemy para almacenar el catálogo de SAAC.
- **Diseñar la arquitectura del software:** Estructurar la aplicación web utilizando el framework Flask y el motor de plantillas Jinja2 para la interfaz de usuario.
- **Programar el motor de reglas:** Implementar la lógica de filtrado por descarte mediante condicionales IF-THEN en Python, incluyendo el soporte para Voice Banking.
- **Integrar medidas de seguridad web:** Aplicar cabeceras de seguridad y mitigar vulnerabilidades comunes utilizando la librería Flask-Talisman bajo estándares OWASP.
- **Optimizar la interfaz y accesibilidad:** Diseñar las pantallas (HTML/CSS) para facilitar la navegación a usuarios no especializados y asentar las bases para el uso de pulsadores o eyetracking.

2.3. Objetivos formativos

Finalmente, desde el punto de vista del aprendizaje, el trabajo persigue los siguientes objetivos:

- **Aplicar la Ingeniería de la Salud:** Resolver un problema real del ámbito sanitario combinando el desarrollo de software con criterios médicos.
- **Gestionar el ciclo de vida del proyecto:** Adquirir competencias en análisis de requisitos, presupuestos bajo el Convenio TIC y cumplimiento legal del RGPD.

- **Desarrollar autocrítica técnica:** Aprender a identificar la deuda técnica del proyecto y proponer soluciones de mejora.

Fundamentos teóricos y estado del arte

3.1. Introducción

En este capítulo se exponen los fundamentos teóricos, clínicos y tecnológicos que sustentan el diseño del sistema experto objeto de este trabajo. En primer lugar, se describe la caracterización fisiopatológica de la Esclerosis Lateral Amiotrófica (ELA) y su impacto secuencial en el aparato fonoarticulador, delimitando la ventana de oportunidad terapéutica para la preservación de la identidad vocal. En segundo lugar, se clasifican los Sistemas Aumentativos y Alternativos de Comunicación (SAAC) y se estructuran los criterios técnicos y variables de usuario requeridos para su modelado. Finalmente, se analizan los Sistemas de Apoyo a la Decisión (SAD) basados en reglas lógicas y se realiza una revisión crítica del estado del arte, contrastando las soluciones estáticas tradicionales con la propuesta interactiva desarrollada.

3.2. Esclerosis Lateral Amiotrófica (ELA)

La Esclerosis Lateral Amiotrófica (ELA) es una patología neurodegenerativa de carácter progresivo caracterizada por la pérdida selectiva de las motoneuronas superiores (corteza cerebral) e inferiores (tronco del encéfalo y médula espinal), responsables del control motor voluntario [Hardiman et al., 2017]. La interrupción de la vía corticoespinal y de las conexiones neuromusculares conduce a una atrofia muscular generalizada, fasciculaciones, espasticidad y parálisis progresiva.

Fenotipos clínicos y estadios de progresión

La heterogeneidad en la sintomatología clínica permite clasificar la enfermedad en dos fenotipos principales:

Fenotipo de inicio espinal: Manifiesta una prevalencia aproximada del 70 % de los casos. Las alteraciones iniciales se localizan en las motoneuronas de la médula espinal, afectando a la musculatura esquelética apendicular (extremidades superiores e inferiores). Clínicamente se traduce en debilidad distal, pérdida de destreza manual o caídas. En este fenotipo, la función bulbar y la capacidad fonoarticulatoria suelen preservarse en las fases tempranas, retrasando la necesidad inmediata de sistemas de comunicación sustitutivos.

Fenotipo de inicio bulbar: Afecta aproximadamente al 30 % restante de los pacientes, inician con la degeneración de los núcleos motores del tronco encefálico (pares craneales IX, X, XI y XII). Los síntomas iniciales incluyen disartria (dificultad para la articulación de la palabra) y disfagia (alteración de la deglución). En este escenario, la degradación de la inteligibilidad del habla se produce de forma acelerada, exigiendo una intervención tecnológica y logopédica precoz. [Rong et al., 2024, Rico Ivorra and Moltó Abad, 2021]

Independientemente del foco de inicio, la progresión de la ELA se categoriza en cuatro estadios clínicos según la escala de rehabilitación y pérdida funcional [Smith et al., 2025]:

1. **Estadio temprano:** Debilidad localizada o fatiga muscular leve. En el caso del inicio bulbar, se observan cambios leves que no impiden la comunicación funcional.
2. **Estadio intermedio:** Restricciones motoras crecientes en múltiples segmentos. La inteligibilidad del habla disminuye significativamente, limitando la participación social activa y requiriendo el uso de SAAC aumentativos.
3. **Estadio avanzado:** Pérdida generalizada de la movilidad voluntaria. El paciente presenta anartria (pérdida total del habla), precisando el despliegue de SAAC alternativos de alta tecnología con métodos de acceso avanzados (ej. *eyetracking*).

4. **Estadio terminal:** Parálisis neuromuscular total, afectando a la mecánica ventilatoria. La comunicación queda restringida a códigos binarios mínimos o interfaces cerebro-computador en ausencia de control ocular estable.

Fisiopatología del impacto en la comunicación humana

Las alteraciones de la comunicación en la ELA se derivan de la afectación combinada de la musculatura respiratoria, fonatoria y articularia. La pérdida de inteligibilidad afecta de forma directa a la autoidentidad, la autonomía y la calidad de vida de los pacientes, correlacionándose con elevados índices de aislamiento social.

No obstante, en la gran mayoría de los casos, las funciones cognitivas permanecen intactas. Esta disociación incrementa el sufrimiento psicológico del paciente, pero al mismo tiempo representa la justificación técnica para la implementación de sistemas expertos de recomendación de SAAC. Dado que el usuario conserva la capacidad cognitiva y la comprensión semántica, es apto para el aprendizaje, configuración y uso eficaz de interfaces de comunicación asistiva avanzadas.

Preservación de la identidad vocal mediante técnicas de Voice Banking

La introducción de soluciones tradicionales de síntesis de voz mediante motores de Texto a Voz (*Text-to-Speech*, TTS) basados en fonemas genéricos e impersonales introduce un factor de despersonalización. Estas voces sintéticas de catálogo omiten las particularidades acústicas del individuo, induciendo un impacto psicológico negativo y provocando la reticencia o el rechazo de la tecnología por parte del paciente y su núcleo familiar.

Para mitigar este fenómeno, la ingeniería biomédica actual incorpora procesos de *Voice Banking* y reconstrucción acústica personalizada. De acuerdo con el marco técnico seminal definido por Yamagishi et al. [Yamagishi et al., 2012], este método consiste en la digitalización y almacenamiento estructurado de muestras bioacústicas de habla del paciente mientras este conserva capacidades funcionales. Mediante algoritmos de síntesis por concatenación o modelado estadístico, se genera un clon de voz computacional que retiene los rasgos prosódicos, el timbre y la huella de identidad fonética del usuario [Yamagishi et al., 2012].

Estudios clínicos de alto impacto desarrollados por Cave y Bloch [[Cave and Bloch, 2021](#)] demuestran de forma cuantitativa que más del 80 % de las personas que sufren enfermedades de la neurona motora consideran que disponer de una voz sintetizada personalizada es indispensable para preservar su autoidentidad y mantener el rol social y familiar. Sin embargo, la efectividad del proceso está estrictamente delimitada por la variable temporal. [[Chen et al., 2025](#), [Rong et al., 2024](#)]

3.3. Sistemas Aumentativos y Alternativos de Comunicación (SAAC)

Los Sistemas Aumentativos y Alternativos de Comunicación (SAAC) abarcan un conjunto heterogéneo de herramientas, estrategias y códigos estructurados para compensar las deficiencias graves de expresión verbal.

Clasificación funcional

Desde una perspectiva funcional, los sistemas de comunicación asistida se dividen en dos categorías:

- **Sistemas Aumentativos:** Se implementan como un recurso complementario al habla natural cuando esta, debido a la disartria, ha perdido inteligibilidad pero conserva funcionalidad parcial. El sistema ayuda mediante herramientas predictivas o clarificadores.
- **Sistemas Alternativos:** Actúan como sustitutos absolutos de la capacidad oral en escenarios de anartria proporcionando un canal de comunicación independiente mediante síntesis de texto o selección de símbolos.

Asimismo, en función de su arquitectura e infraestructura de soporte, se categorizan según las redes de apoyo especializado [[AlfaSAAC, 2026](#)]:

- **SAAC sin ayuda:** Estrategias comunicativas que no requieren elementos físicos externos al cuerpo del paciente (códigos gestuales, lengua de signos, parpadeo codificado). Presentan alta disponibilidad pero un acoplamiento estricto a la presencia de un interlocutor entrenado.
- **SAAC con ayuda (Baja tecnología):** Soluciones que emplean soportes físicos pasivos (cuadernos de comunicación, tableros pictográficos

impresos o sistemas de comunicación por intercambio de imágenes). Tienen un coste bajo y no requieren suministro eléctrico, pero limitan la velocidad de transmisión del mensaje.

- **SAAC con ayuda (Alta tecnología):** Dispositivos electrónicos que ejecutan *software* especializado de comunicación. Integran motores de síntesis de voz y algoritmos de predicción semántica.

3.4. Criterios técnicos de evaluación e ingeniería de atributos en SAAC

La prescripción de un SAAC en una base de conocimiento relacional exige transformar las especificaciones comerciales de los fabricantes (como Tobii Dynavox, Irisbond o AssistiveWare) [Tobii Dynavox, 2026, Irisbond, 2026, AssistiveWare, 2026] en una matriz de atributos normalizados. Los parámetros evaluados para conformar el catálogo del sistema experto se definen bajo criterios objetivos de ingeniería:

- **Umbral de capacidad operativa:** Requisitos mínimos normalizados en una escala ordinal (0-3) sobre el estado cognitivo, la agudeza visual, la discriminación auditiva y la competencia tecnológica exigidos por el sistema para evitar el rechazo por carga cognitiva.
- **Hardware y métodos de acceso:** Compatibilidad de la solución con periféricos de entrada avanzados, incluyendo interfaces de seguimiento ocular (*eyetracking*), pulsadores mecánicos o de proximidad y conmutadores cefálicos.
- **Software y entorno operativo:** Restricciones de la aplicación, tales como el sistema operativo (Windows, iOS, Android, arquitecturas web), la compatibilidad con motores de base de datos y la localización lingüística.
- **Portabilidad, ergonomía y autonomía energética:** Factores físicos que condicionan el uso del dispositivo en movilidad, tales como el consumo de batería, el peso, la resistencia al exterior y la compatibilidad con sistemas de anclaje para sillas de ruedas.

Cabe destacar que las variables financieras o de coste de adquisición de hardware especializado se han omitido del algoritmo de decisión principal.

Esto se fundamenta en que, dentro del marco normativo del Sistema Nacional de Salud español y de las directrices específicas del Servicio de Salud de Castilla y León (Sacyl), los productos de apoyo regulados en los catálogos oficiales de prestaciones ortoprotésicas cuentan con vías de financiación pública integral o subvención mayoritaria [CEAPAT - IMSERSO, 2024], priorizando los criterios de idoneidad clínica sobre el impacto presupuestario directo del usuario.

3.5. Modelado de variables de decisión centradas en el usuario

La construcción del recomendador requiere la captura del perfil fisiológico, cognitivo y del entorno del paciente mediante un cuestionario clínico multivariable. Las preguntas del sistema se diseñaron para mapear las siguientes variables de decisión:

- **Preferencias lingüísticas e idioma:** Se identifica el idioma con el que el paciente se siente más cómodo para comunicarse diariamente, garantizando el soporte tanto para el castellano como para las diferentes lenguas cooficiales.
- **Capacidades perceptivas y cognitivas:** Se evalúa el nivel visual y auditivo del usuario, su capacidad de atención, su nivel de lectoescritura y su grado de familiarización previa con el uso de ordenadores o dispositivos electrónicos.
- **Fatiga y resistencia funcional:** Se mide la capacidad del paciente para mantener una acción repetitiva a lo largo del tiempo, evitando recomendar sistemas que le exijan un esfuerzo físico o visual excesivo que pueda causarle frustración o cansancio extremo.
- **Naturaleza del contenido (Alfabeto o Pictogramas):** Se determina si el usuario prefiere o necesita una comunicación basada en texto alfabético (con teclado virtual y predicción de palabras) o si, debido a su evolución clínica o preferencia personal, requiere un sistema basado en pictogramas y símbolos visuales.
- **Formas de acceso:** Se analiza qué forma de acceso al dispositivo es la más viable (táctil, por parpadeo, mediante control cefálico, pulsadores o sistemas de seguimiento ocular).

- **Plataformas tecnológicas y entorno de uso:** Se consulta al usuario sobre sus preferencias en cuanto al sistema operativo o plataforma tecnológica que le gustaría utilizar (Windows, iOS, Android, entornos web o soportes físicos en papel). Asimismo, se valora el entorno preferido de uso (si se utilizará principalmente en el domicilio, en centros institucionales o en exteriores) para asegurar la autonomía de la batería y la visibilidad de la pantalla.
- **Uso de productos de apoyo móviles:** Se pregunta específicamente si el paciente utiliza silla de ruedas u otros elementos de asistencia para la movilidad reducida. Esta variable condiciona la necesidad de buscar sistemas SAAC que admitan soportes de anclaje mecánicos y que cuenten con una estructura ligera y portátil.

3.6. Fundamentos de los Sistemas de Apoyo a la Decisión (SAD)

Los Sistemas de Apoyo a la Decisión (SAD) o *Decision Support Systems* (DSS) constituyen una rama de la ingeniería del software orientada al desarrollo de aplicaciones que procesan bases de conocimiento complejas para asistir en la resolución de problemas de diagnóstico o prescripción multivariable.

Dentro de la taxonomía de los sistemas de información, el recomendador desarrollado se estructura como un Sistema Experto basado en Reglas Lógicas. En lugar de utilizar algoritmos probabilísticos complejos, el conocimiento clínico extraído de las guías médicas se ha traducido en un motor de inferencia determinista que opera mediante condicionales estructurados del tipo ****IF-THEN**** (Si-Entonces).

El sistema funciona bajo un principio de inferencia por filtrado progresivo o descarte. Esto significa que el motor lógico asume inicialmente que todos los sistemas SAAC del catálogo son opciones válidas para el paciente. A medida que el usuario avanza en el cuestionario y selecciona sus características, el motor evalúa las incompatibilidades y va eliminando del mapa aquellas soluciones que no se adaptan a su perfil.

Para entender el comportamiento del motor, la lógica de exclusión sigue este esquema conceptual:

SI [Variable_Usuario] no cumple [Requisito_Mínimo_Sistema] $\implies$
ENTONCES [Estado_Sistema] = Excluido

Por ejemplo, si el usuario indica en el cuestionario que su nivel de control manual es nulo, el motor de reglas activa inmediatamente una directiva de descarte: se evalúan todos los sistemas del catálogo y aquellos que tengan como requisito de acceso obligatorio la interacción táctil quedan automáticamente excluidos de la selección final.

A través de consultas a la base de datos el recomendador reduce dinámicamente el rango de soluciones hasta obtener el subconjunto óptimo compatible con las capacidades específicas del paciente, garantizando una propuesta limpia y clínicamente coherente al terminar el cuestionario.

3.7. Análisis del estado del arte y trabajos relacionados

En el escenario actual de la gestión asistencial de la ELA, existen diversos recursos documentales y guías clínicas orientadas a guiar a los profesionales en la selección de tecnologías de apoyo. El exponente de referencia es la *Guía para la Comunicación y Autonomía en la ELA*, editada por la asociación ELA Andalucía [ELA Andalucía, 2023]. Esta obra compila las soluciones comerciales disponibles.

No obstante, este tipo de soluciones presenta limitaciones derivadas de su formato estático:

1. **Lectura secuencial y sobrecarga cognitiva:** Al tratarse de documentos estáticos en formato de texto (PDF o manuales impresos), exigen que el terapeuta ocupacional, el familiar o el propio paciente realicen un proceso de lectura, análisis y comparación manual de cientos de páginas de especificaciones técnicas.
2. **Ausencia de automatización y riesgo de sesgo:** Al carecer de un motor algorítmico no se realiza un filtrado cruzado de variables en tiempo real. La selección final del sistema queda expuesta a la experiencia subjetiva del prescriptor o al conocimiento limitado del catálogo de un fabricante concreto, lo que incrementa la probabilidad de incurrir en una prescripción subóptima.
3. **Incompatibilidad temporal frente a una enfermedad progresiva:** Las guías impresas describen soluciones puntuales pero no integran una lógica de predicción o alerta que anticipe de forma automatizada las necesidades tecnológicas futuras asociadas a la pérdida de funcionalidad muscular bulbar o espinal.

Por otra parte, la revisión sistemática internacional conducida por Davis et al. [Davis et al., 2026] analiza la temporalidad de la implantación del soporte tecnológico de control en la ELA, concluyendo que las demoras en la provisión del dispositivo adecuado frustran la adaptación del paciente debido a la velocidad del deterioro motor. En el ámbito nacional, estudios como los de Rico Ivorra y Moltó Abad [Rico Ivorra and Moltó Abad, 2021] demuestran que el uso temprano y correcto de la CAA correlaciona de forma positiva con la reducción de comorbilidades como la depresión y la ansiedad reactiva en el paciente y sus cuidadores.

A pesar de la existencia de estos marcos teóricos descriptivos en la literatura académica [Pérez Rodríguez, 2023], se detecta una clara brecha tecnológica: la ausencia de herramientas informáticas interactivas que unifiquen en una plataforma web tanto la captura del perfil del usuario como un motor de inferencia lógica automatizado para la prescripción. La presente herramienta de apoyo a la decisión solventa esta deficiencia del estado del arte, transformando el conocimiento clínico estático en un sistema de información ágil, objetivo y escalable.

Es necesario apuntar que el prototipo desarrollado presenta, en su estado actual, ciertas limitaciones metodológicas comunes en fases tempranas de ingeniería. El catálogo inicial de 46 sistemas se gestiona mediante inserciones de datos estáticas, careciendo de integraciones dinámicas automatizadas (como conexiones mediante APIs a bases de datos vivas del CEAPAT) o de flujos de despliegue continuo. Sin embargo, como solución de validación conceptual, este sistema sienta las bases operativas para automatizar un proceso que hasta ahora era completamente analógico, legitimando el valor de la propuesta de ingeniería de la salud desarrollada.

Metodología

4.1. Marco metodológico y uso de herramientas asistidas

El desarrollo de este trabajo se ha articulado bajo una metodología de diseño propio centrada en la resolución de problemas clínicos mediante ingeniería de software. Al tratarse del desarrollo de un prototipo funcional se priorizó un enfoque ágil que permitiera validar de forma rápida la lógica clínica del recomendador.

Para optimizar ciertas fases técnicas y garantizar el cumplimiento de estándares de seguridad y legalidad, se ha hecho uso de herramientas de Inteligencia Artificial Generativa (IAG) como soporte técnico especializado. Es importante destacar que la IA ha actuado como un recurso metodológico y consultivo, siendo la toma de decisiones, la validación clínica y la arquitectura final responsabilidad íntegra del autor. El detalle pormenorizado de cada interacción, prompts utilizados y criterios de validación se encuentra documentado en el **Apéndice I: Registro de interacciones con sistemas de IA**.

4.2. Descripción de los datos

Los datos que sustentan el sistema de recomendación provienen de un análisis de soluciones tecnológicas actuales para la comunicación en pacientes con Esclerosis Lateral Amiotrófica (ELA). La base de conocimiento se ha estructurado en una base de datos relacional que categoriza los Sistemas Aumentativos y Alternativos de Comunicación (SAAC) según criterios clínicos y técnicos.

- **Origen de los datos:** La información ha sido recopilada a partir de catálogos de productos de apoyo (CEAPAT) [CEAPAT - IMSERSO, 2024], documentación de asociaciones de ELA (como ELA Andalucía) [ELA Andalucía, 2023] y especificaciones técnicas de desarrolladores de software especializado (Tobii Dynavox, Smartbox, Qinera, Irisbond, etc.) [Tobii Dynavox, 2026, Qinera, 2026, Irisbond, 2026].
- **Tipología y formato:** Los datos se almacenan en un sistema de gestión de bases de datos relacionales (PostgreSQL). Se dividen en:
 - **Entidades maestras:** Catálogos de idiomas (español, gallego, catalán, euskera), tipos de entrada (manos, ojos, cabeza, voz, pulsador), plataformas (Windows, iOS, Android, web, panel físico), entornos de uso (domicilio o exterior) y métodos de comunicación (alfabeto o pictogramas).
 - **Sistemas SAAC:** 46 registros que incluyen software, hardware y servicios de Voice Banking. La selección inicial se basó en los catálogos de CEAPAT y entidades de ELA citadas anteriormente. Esta base fue posteriormente validada y contrastada mediante un análisis asistido por IA para asegurar que no se omitieran sistemas críticos en la progresión de la enfermedad, garantizando así un catálogo exhaustivo (ver proceso de validación en *Apéndice I, Interacción 1*). Todas las fuentes técnicas finales han sido referenciadas en la bibliografía general.
 - **Requisitos funcionales:** Atributos numéricos que definen los niveles mínimos necesarios (0-3) de capacidad visual, auditiva, cognitiva, tecnológica y de habla para cada sistema.
- **Carga e inicialización de datos:** Para esta primera versión del prototipo, se ha optado por una estrategia de inicialización estática mediante scripts SQL estructurados para el poblamiento del catálogo de 46 sistemas. Si bien esto asegura un entorno controlado y reproducible para la validación del MVP, la automatización de este flujo mediante procesos ETL (Extract, Transform, Load) y el control de versiones de datos se contemplan como evolución del sistema.
- **Características principales:** Los datos permiten un filtrado dinámico mediante consultas SQL que cruzan las capacidades del usuario con las prestaciones del sistema.

Una visión más detallada de los datos se puede encontrar en el anexo F-Datos.

4.3. Técnicas y herramientas

El desarrollo de la aplicación se ha basado en una arquitectura web con procesamiento de reglas de recomendación.

Herramientas de desarrollo

- **Python y Flask:** Seleccionados por la versatilidad del lenguaje y la familiarización adquirida durante el grado. Para robustecer el despliegue frente a vulnerabilidades, la implementación de seguridad (basada en estándares OWASP) contó con el soporte técnico documentado en el *Apéndice I (Interacción 3)*, utilizando la librería Flask-Talisman.
- **Frontend (HTML/CSS):** Se ha diseñado una interfaz mediante pestañas para facilitar la navegación. Mientras que la estructura funcional es de creación propia, el diseño estético y la optimización de la hoja de estilos CSS se apoyaron en herramientas de IA para garantizar una visualización profesional y accesible (ver *Apéndice I, Interacción 2*).
- **PostgreSQL y SQLAlchemy:** Para la persistencia de datos se utiliza PostgreSQL. La interacción entre la aplicación y la base de datos se realiza mediante el ORM SQLAlchemy, abstrayendo las consultas SQL directas y permitiendo una gestión de modelos orientada a objetos más intuitiva y segura frente a ataques de inyección SQL.
- **Jinja2:** Como motor de plantillas para la generación dinámica de las interfaces de usuario (cuestionario e informes de resultados). Es utilizado como extensión al uso de Flask.

4.4. Metodología software

Tal y como se introdujo en la sección anterior, el software desarrollado se categoriza como un Sistema de Apoyo a la Decisión (SAD). Su construcción se ha articulado mediante una metodología iterativa e incremental, centrada en la implementación de un motor de decisión basado en lógica proposicional.

Modelado de la lógica proposicional

El recomendador es un sistema que evalúa un conjunto de sentencias lógicas, el conocimiento clínico se traduce en operaciones booleanas y comparativas:

- **Estructura de las reglas:** Se han definido reglas bajo la estructura condicional IF-THEN. Por ejemplo, si la proposición indica que si el control manual es nulo, se excluyen automáticamente los sistemas de interacción táctil.
- **Inferencia por filtrado progresivo:** El sistema opera mediante un proceso de eliminación. A medida que el usuario responde al cuestionario, se van validando o invalidando proposiciones lógicas que reducen el conjunto de soluciones posibles hasta obtener el subconjunto óptimo para el paciente.
- **Lógica de post-procesamiento:** Además de la exclusión, se han implementado reglas de recomendación proactiva para sugerir acciones preventivas como el Voice Banking.

Organización de fases y tareas

Para garantizar la fiabilidad del sistema, el desarrollo se organizó en las siguientes fases:

1. **Fase de análisis y captura de reglas:** Identificación de los umbrales críticos de capacidad (visual, cognitiva, motora). Se incluye aquí el diseño de la base legal del sistema. Dada la sensibilidad de los datos de salud, se utilizó IA para la redacción técnica del borrador de la cláusula de consentimiento según el RGPD, la cual fue posteriormente revisada y adaptada (ver *Apéndice I, Interacción 5*). Asimismo, las auditorías de seguridad y robustecimiento del sistema (como la integración de Flask-Talisman) se planificaron para mitigar los riesgos detectados antes del despliegue final.
2. **Diseño e implementación del motor lógico:** Traducción de las reglas a consultas SQL y estructuras de control en Python (Flask). En esta fase se realizaron múltiples iteraciones para ajustar los filtros lógicos a medida que se realizaban pruebas de funcionamiento.
3. **Validación del sistema experto:** Verificación del comportamiento del recomendador mediante la introducción de perfiles de usuario tipo para asegurar que los resultados fueran clínicamente coherentes. Para esta fase, se generó un banco de pruebas de estrés mediante IA para simular perfiles de usuario complejos, asegurando la coherencia clínica de los resultados (ver *Apéndice I, Interacción 4*).

Resultados

5.1. Resumen de resultados

El trabajo realizado ha dado como resultado una herramienta web operativa que funciona como un asistente inteligente para la recomendación de Sistemas Aumentativos y Alternativos de Comunicación (SAAC). A través de un cuestionario sencillo, la aplicación es capaz de traducir las necesidades y capacidades de una persona en una propuesta concreta de soluciones tecnológicas.

La aplicación web y el modelo de recomendación

En lugar de obligar al usuario o al profesional a buscar entre decenas de catálogos, la herramienta centraliza una gran variedad de información de los SAAC del mercado en una base de datos. El diseño se ha centrado en que la interfaz sea muy limpia e intuitiva, pensada para usuarios no expertos.

Pruebas con casos reales

Para comprobar el funcionamiento real de la herramienta se introdujeron y analizaron los perfiles de dos pacientes reales evaluados en mayo de 2026 gracias a la colaboración de ELACyL. Los resultados de estas simulaciones muestran cómo responde el sistema ante dos casos diferentes:

- **Paciente PAC-T5NE4D (Caso avanzado):** Este perfil representa a una persona con un nivel de habla nulo (nivel 0) y fatiga pronunciada (resistencia nivel 1), aunque ve, oye y se maneja con la tecnología de forma aceptable (niveles 2). Como no tiene movilidad fina en las

manos pero necesita comunicarse escribiendo (método alfabeto), el sistema detectó que la única forma de interactuar era a través de la mirada o movimientos de la cabeza, buscando programas compatibles con Windows y Android. El resultado fue una lista muy completa. En cuanto a programas, recomendó herramientas potentes de comunicación como *Grid 3*, *Communicator 5*, *Verbo*, *Look to Speak* y *OptiKey*, además de *Look to Learn* para entrenar el uso de la mirada. Para el equipo físico hardware), la aplicación seleccionó una tablet Android, un ordenador portátil, un lector de mirada (*Eye tracker*), un joystick de mentón (*BJOY Chin Plus*), varios pulsadores (de pedal y de soplido) y un brazo articulado para sujetarlo todo de forma segura en casa.

16/05/2026 19:29 PACIENTE REAL	PAC-T5NE4D	Visión: 2 Audición: 2 Habla: 0 Resistencia: 1 Tecnología: 2 Silla: No Autonomía: Nivel 0 Entorno: domicilio	Idioma: Español Plataforma: Windows, Android Método: Alfabeto Interacción: ojos, cabeza	SISTEMAS: Look to Speak, Grid 3, Verbo, Communicator 5, Look to learn, OptiKey, ComuniQa (TD Snap) HARDWARE: Tablet Android, Soporte de anclaje articulado, Ordenador Portátil, BJOY Chin Plus, Eye tracker, Conmutador de pedal, Conmutador por soplido (Pufo)	Valoración: 6/10 Usa recomendado: Sí Satisfacción: muy_satisfecho Cambiaría a otro: posible Motivo cese pasado: entorno "Sin sugerencias"
--------------------------------------	------------	--	--	--	--

Figura 5.1: Primer caso de paciente real.

La respuesta de feedback recibida por parte del paciente real validó el acierto del programa: el usuario aseguró que sí utiliza una de las combinaciones recomendadas y está “muy satisfecho” con esta. A su vez indica que está abierto a cambiar su sistema actual por otro en el futuro, por lo que confirma que el resto de soluciones propuestas le resultaron interesantes.

- Paciente PAC-7GUYVR (Caso de ELA bulbar):** Este segundo perfil es el opuesto al anterior. El paciente presenta un caso de ELA de inicio bulbar, lo cual significa que el habla se pierde antes que la movilidad. Ve y oye perfectamente (niveles 3), aún conserva algo de habla (nivel 2), tiene mucha resistencia (nivel 3) y se mueve en silla de ruedas, pero tiene total autonomía en sus decisiones (nivel 3). Como puede usar las manos para interactuar, el sistema simplificó la recomendación al máximo hacia una aplicación de escritura a voz. Por el lado del software, solo recomendó un programa básico de *Asistente de voz AAC*. Por el lado del hardware, sugirió: un *iPad*, una tablet Android, un portátil (ya que el usuario no seleccionó una plataforma de preferencia y esta aplicación se encuentra disponible multiplataforma), un ratón Bluetooth y un lápiz táctil, añadiendo un soporte para anclar la pantalla a la silla de ruedas (ya que marcó que sí utilizaba).

14/05/2026 12:12 PACIENTE REAL	PAC-7GUYVR	Visión: 3 Audición: 3 Habla: 2 Resistencia: 3 Tecnología: 1 Silla: Sí Autonomía: Nivel 3 Entorno: No definido	Idioma: Español Plataforma: Cualquiera Método: Alfabeto Interacción: manos	SISTEMAS: Asistente de voz AAC HARDWARE: Tablet Android, Soporte de anclaje articulado, Lápiz táctil, iPad, Ratón Bluetooth, Ordenador Portátil	Valoración: 6/10 Usa recomendado: No Satisfacción: muy_satisfecho Cambiaría a otro: posible Motivo cese pasado: n/a "Sin sugerencias"
--------------------------------------	------------	--	---	--	--

Figura 5.2: Segundo caso de paciente real.

Aunque este paciente también definió la experiencia como “muy satisfecho”, marcó que “No” utiliza la recomendación de forma habitual. La posible razón tras de esto sea que, al conservar un buen nivel de habla e independencia, ve el SAAC como un apoyo extra o puntual, y no como una necesidad vital para su día a día, pero que podrá considerar cuando su enfermedad progrese.

Estas dos pruebas demuestran que la herramienta web funciona correctamente, no da respuestas genéricas, sino que sabe cuándo proponer un despliegue tecnológico más grande y cuándo sugerir una solución sencilla y directa.

Pruebas con casos simulados

Debido al reducido tamaño del grupo de estudio se debieron realizar también pruebas de simulación para comprobar el funcionamiento en otra diversidad de situaciones. A continuación se mostrarán las más relevantes y aquellas con parámetros más diferenciados de los anteriores:

- Caso de prueba 1: PAC-XPIOTW (Acceso por voz):** Simulamos el perfil de un paciente en las primeras etapas de la enfermedad. Mantiene sus capacidades sensoriales, tecnológicas y cognitivas al máximo (niveles 3) y total autonomía (nivel 3), pero su resistencia física empieza a flaquear (nivel 2). Como todavía habla perfectamente (nivel 3), el sistema aprovechó esta ventaja y se configuró para un entorno mixto mediante el acceso por voz, sin importar la plataforma. El resultado orientó las soluciones hacia la autonomía del paciente en casa sin esfuerzo físico. En cuanto a software, recomendó sistemas de control por voz como *Voice Access* y asistentes virtuales (*Amazon Alexa* / *Google Home*). Para el apartado físico (hardware), el sistema sugirió una tablet Android montada en un soporte de anclaje articulado y un *Enchufe Inteligente WiFi* para poder encender y apagar aparatos de la casa directamente con la voz.

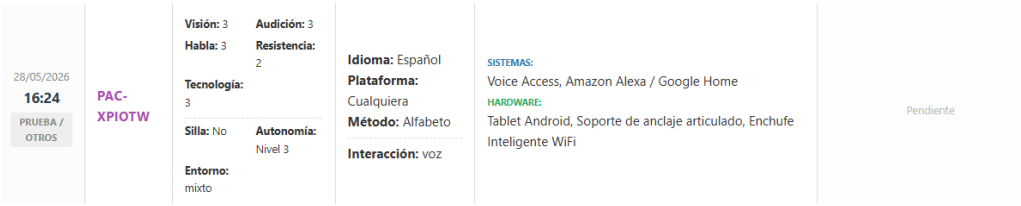


Figura 5.3: Primer caso de paciente simulado.

Debe especificarse además que, aunque no quede registrado este hecho en la base de datos, al paciente también se le recomendó comenzar de forma preventiva un proceso de voice banking, ya que cuenta con su habla totalmente preservada.

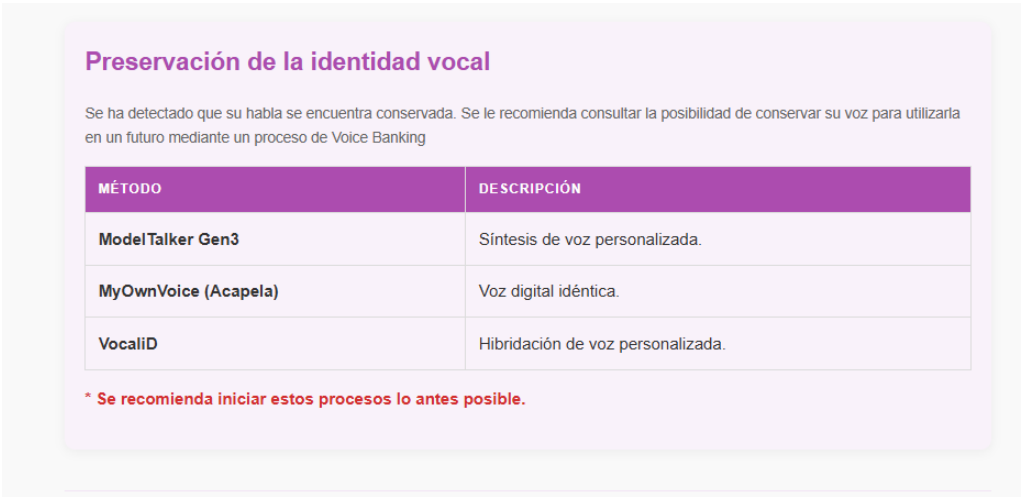


Figura 5.4: Sugerencia de voice banking preventivo.

Es importante además destacar que, siempre que se recomienden sistemas de alta tecnología aparecerá por pantalla un recordatorio de la importancia de contar con un plan de respaldo.

Recuerde: El plan de respaldo

Aunque los sistemas de alta tecnología aquí recomendados ofrecen la mayor autonomía, **nunca deben ser la única opción**. Sugerimos contar siempre con un sistema de baja tecnología (como un tablero alfabético o ETRAN) para:

- Situaciones de ducha o aseo personal.
- Exposición directa al sol (que afecta a los lectores oculares).
- Uso en exteriores bajo la lluvia.
- Momentos de agotamiento de batería o fallos del software.
- Traslados rápidos donde no se puede anclar el equipo.

Figura 5.5: Plan de respaldo.

- **Caso de prueba 2: PAC-JOUN1Y (Baja tecnología):** Este caso se diseñó para simular una fase más avanzada donde el paciente no puede hablar en absoluto (nivel 0), su resistencia es moderada (nivel 2) y no tiene conocimientos tecnológicos o prefiere no usar pantallas (tecnología 0). Al seleccionar la plataforma Panel físico / Papel en un entorno domiciliario, el algoritmo descartó por completo los ordenadores y los programas informáticos recomendando únicamente paneles y tableros físicos. Como soporte de hardware, la web prescribió herramientas de señalización física de gran utilidad: un *Puntero Láser*, unas *Gafas con Puntero Láser* integrado y un soporte de anclaje articulado para fijar los tableros.

SESIÓN	PACIENTE	PERFIL CLÍNICO	PREFERENCIAS	RECOMENDACIÓN	FEEDBACK
28/05/2026 16:40 PRUEBA / OTROS	PAC-JOUN1Y	Visión: 2 Audición: 3 Habla: 0 Resistencia: 2 Tecnología: 0 Silla: No Autonomía: Nivel 2 Entorno: domicilio	Idioma: Español Plataforma: Panel físico/Papel Método: Alfabeto, pictogramas Interacción: manos, ojos	SISTEMAS: Panel pictogramas, Panel alfabético, SpeakBook, Tablero ETRAN HARDWARE: Puntero Láser, Gafas con Puntero Láser, Soporte de anclaje articulado	Pendiente

Figura 5.6: Segundo caso de paciente simulado.

- **Caso de prueba 3: PAC-SKNTHB (Validación lingüística):** Este caso se diseñó con un doble objetivo: comprobar cómo se comporta el sistema cuando el usuario no define un método o interacción preferidos y, además, evaluar el soporte lingüístico seleccionando el *Euskera* como idioma principal. El perfil simula a un paciente con capacidades intermedias (visión, resistencia y tecnología en nivel 2) y una buena autonomía general (nivel 3), que todavía conserva algo

de habla (nivel 2), pero que busca opciones abiertas compatibles con cualquier plataforma en un entorno mixto. Como el sistema detectó que el paciente aún tiene habla residual y movilidad intermedia, ofreció un catálogo de software compatible con el euskera recomendando sistemas clave como *Verbo*, *TD Snap* y *Boardmaker 7*, junto al comunicador *QuickTalker 23*. En cuanto al hardware, al no haber restricciones en la interacción, la herramienta desplegó una amplia gama de opciones para que el profesional o el usuario puedan elegir la que mejor se adapte a su evolución: desde dispositivos comunes (*iPad*, tablet Android, ordenador portátil y ratón Bluetooth) hasta periféricos de acceso avanzado por si la enfermedad progresa, como un *Eye tracker*, el joystick de mentón *BJOY Chin Plus*, un soporte articulado y varios tipos de conmutadores (el *Spec Amarillo*, de pedal y de soplido).

28/05/2026 16:55 PRUEBA / OTROS	PAC- SKNTHB	Visión: 2 Audición: 3 Habla: 2 Resistencia: 2 Tecnología: 2 Silla: No Autonomía: Nivel 3 Entorno: mixto	Idioma: Euskera Plataforma: Cualquiera Método: Sin preferencia Interacción: No definidas	SISTEMAS: QuickTalker 23, Verbo, TD Snap, Boardmaker 7 HARDWARE: Conmutador Spec Amarillo, Ordenador Portátil, Soporte de anclaje articulado, BJOY Chin Plus, Eye tracker, Conmutador de pedal, Conmutador por soplido (Pufo), iPad, Tablet Android, Ratón Bluetooth	Pendiente
---------------------------------------	----------------	---	--	--	-----------

Figura 5.7: Tercer caso de paciente simulado.

- **Caso de prueba 4: PAC-L1O0R7 (Sin resultados compatibles):**
Este caso se diseñó con un fin de control crítico: evaluar el algoritmo ante un perfil clínico con capacidades extremadamente limitadas y criterios excluyentes. Se simuló a un paciente en una fase de máxima afectación orgánica y cognitiva, con niveles nulos en visión, audición, tecnología y habla (todos en nivel 0) y una fatiga física crítica (nivel 0). Como era de esperar debido a las estrictas restricciones relacionales de la base de datos, el sistema no devolvió ninguna coincidencia, mostrando una pantalla de advertencia sin software, hardware ni servicios disponibles.

31/05/2026 15:27 PRUEBA / OTROS	PAC- L100R7	Visión: 0 Audición: 0 Habla: 0 Resistencia: 0 Tecnología: 0 Silla: No Autonomía: Nivel 0 Entorno: No definido Idioma: Español Plataforma: Cualquiera Método: Sin preferencia Interacción: No definidas	SISTEMAS:	Pendiente
---------------------------------------	----------------	--	-----------	-----------

Figura 5.8: Cuarto caso de paciente simulado.

- **Caso de prueba 5: PAC-I0BNNZ (Uso preventivo)** Este último caso de prueba se realizó con intención de comprobar la correcta recomendación de uso preventivo de sistemas con seguimiento ocular. Este tipo de SAAC son los que tienen una curva de aprendizaje más pronunciada, los expertos recomiendan empezar a entrenar y familiarizarse con ellos de forma temprana, por eso se recomiendan cuando el paciente conserva buena visión (Nivel 3) y resistencia a fatiga (Nivel 3) y no ha seleccionado los ojos como un método de acceso.

02/06/2026 18:42 PRUEBA / OTROS	PAC- I0BNNZ	Visión: 3 Audición: 3 Habla: 0 Resistencia: 3 Tecnología: 3 Silla: No Autonomía: Nivel 3 Entorno: mixto Idioma: No seleccionado Plataforma: Cualquiera Método: Sin preferencia Interacción: manos, cabeza, pulsador	SISTEMAS: QuickTalker 23, Verbo, Proloquo2Go, TD Snap, Boardmaker 7, LetMeTalk, Predictable, VirtualTEC, EVA Facial Mouse, Ease Touch, Asistente de voz AAC, Speak4Me HARDWARE: Conmutador Spec Amarillo, Ordenador Portátil, Soporte de anclaje articulado, BJOY Chin Plus, Eye tracker, Conmutador de pedal, Conmutador por soplo (Pufo), iPad, Lápiz táctil, Tablet Android, Guantes antiincrustantes, Ratón Bluetooth	Pendiente
---------------------------------------	----------------	---	---	-----------

Figura 5.9: Quinto caso de paciente simulado.

Sistemas recomendados para entrenamiento temprano (Uso preventivo)		
Los siguientes sistemas permiten acceso por mirada. Se recomienda practicar con ellos ahora para facilitar la comunicación en el futuro.		
NOMBRE	JUSTIFICACIÓN CLÍNICA	HARDWARE NECESARIO
Grid 3	RECOMENDACIÓN PREVENTIVA: Entrenamiento temprano para el futuro control ocular.	Ordenador Portátil Soporte de anclaje articulado BJOY Chin Plus Eye tracker Conmutador de pedal Conmutador por soplido (Pufo)
Communicator 5	RECOMENDACIÓN PREVENTIVA: Entrenamiento temprano para el futuro control ocular.	Ordenador Portátil Soporte de anclaje articulado BJOY Chin Plus Eye tracker Conmutador de pedal Conmutador por soplido (Pufo)
Look to learn	RECOMENDACIÓN PREVENTIVA: Entrenamiento temprano para el futuro control ocular.	Ordenador Portátil Soporte de anclaje articulado Eye tracker
OptiKey	RECOMENDACIÓN PREVENTIVA: Entrenamiento temprano para el futuro control ocular.	Ordenador Portátil Soporte de anclaje articulado BJOY Chin Plus Eye tracker

Figura 5.10: Recomendación preventiva.

5.2. Enlace a resultados

El seguimiento del proyecto puede observarse a través del Github <https://github.com/itslxcy/Trabajo-fin-de-grado.git>. En cuanto a la página web con cuestionario diseñada puede consultarse en el siguiente enlace <https://cuestionario-tfg.onrender.com/>

Discusión

6.1. Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos a través de la web y las posteriores simulaciones demuestran que es posible facilitar la toma de decisiones en el ámbito de la ELA. A continuación, se realiza un análisis de estos hallazgos, interpretando su significado y contrastándolo con las necesidades del sector.

Análisis del feedback de los casos reales

La validación con los dos pacientes reales cedidos por ELACyL arroja una lectura valiosa sobre cómo los usuarios reciben las recomendaciones de la web en base a su experiencia previa con los SAAC.

- **El Paciente PAC-T5NE4D** (caso avanzado) representa al usuario que ya depende por completo de la tecnología. Respondió que “Sí” utiliza actualmente los SAAC recomendados (la combinación de lector ocular y programas como *Grid 3* o *Communicator 5*) y declaró estar “satisfecho, aunque abierto a informarse sobre otras opciones”. Al ver que la web le sugería sistemas que también encajaban con su perfil (como *Verbo* u *OptiKey*), marcó que “es posible” que considere usar otro en el futuro porque encuentra interesantes esas alternativas. Este paciente confirmó que uno de los sistemas ya se le recomendó en el pasado y lo había abandonado porque “no se ajustaba al entorno”. Esto nos indica que la herramienta aún debe pulirse en lo referido al entorno de uso de los SAAC para evitar recomendaciones inútiles. Para esta mejoría lo ideal sería editar la base de datos para definir de forma más estricta que SAACs permiten ser usados en exterior y cuales no.

En la actualidad la forma de clasificarlos fue teniendo en cuenta su portabilidad (tamaño, necesidad de recarga de batería), su robustez en condiciones climatológicas adversas (lluvia, mucho sol) y método de acceso (el seguimiento por eye-tracking no funciona correctamente en exteriores). Debería estudiarse si se ha dejado fuera alguna variable decisiva o si no se ha juzgado bien alguna de las mencionadas para alguno de los SAAC recomendados.

- **El Paciente PAC-7GUYVR** (caso de ELA bulbar) ofrece el punto de vista opuesto. Marcó que “No” utiliza actualmente la recomendación (el asistente de voz básico), por lo que su nivel de satisfacción con el sistema se registró como “No aplica”. Al conservar una buena movilidad (manos) y un nivel de autonomía 3, el paciente se sigue comunicando con sus recursos naturales y ve el SAAC como algo secundario. Sin embargo, que haya puntuado la recomendación con un 6/10 y que valore como “posible” cambiar a otro sistema en el futuro demuestra el valor preventivo de la aplicación: aunque ahora mismo no necesite el asistente de voz en su día a día, la web ya le aportado información sobre soluciones que le resultan interesantes para cuando la enfermedad avance.

Dos pacientes coincidieron en una nota de 6/10, esto demuestra que la herramienta aún tiene donde mejorar, pero que es realista. No pretende sustituir el criterio del terapeuta sino ofrecer una orientación que los propios pacientes y cuidadores validan como adecuada para empezar a explorar opciones.

Análisis de los casos de prueba

- El caso de acceso por voz (**PAC-XPIOTW**) demuestra que el sistema sabe adelantarse a la fatiga en las etapas iniciales. No solo se recomienda un software de recomendación, sino también productos de domótica que dotarán a la persona de una gran autonomía.
- El caso de baja tecnología (**PAC-JOUN1Y**) probó la funcionalidad de la página en casos orientados a personas de avanzada edad, donde el manejo de la tecnología podría suponer una complicación añadida. En el día a día, muchos pacientes sufren fatiga visual ante las pantallas, rechazan la informática (tecnología 0) o necesitan un sistema de emergencia sin baterías por si fallan los de mayor tecnología o se encuentran en un entorno donde no pueden utilizarlo (ducha, lluvia...).

- El caso de validación lingüística (**PAC-SKNTHB**) demostró una disponibilidad lingüística para que el usuario pueda comunicarse en su lengua materna o aquella con la que se encuentra más cómodo.
- El caso de perfil extremo sin resultados compatibles (**PAC-L1O0R7**) es de gran valor para la validación del proyecto, ya que demuestra que el recomendador no genera falsos positivos ni prescribe herramientas que el usuario sea incapaz de utilizar. Además arroja luz sobre una problemática más allá de los objetivos del trabajo: las herramientas existentes en la actualidad. Es necesario que la investigación y desarrollo de estos productos de apoyo siga avanzando para que cualquier paciente, independientemente de su situación, tenga una forma de comunicarse.
- Por último, el caso de uso preventivo (**PAC-I0BNNZ**) valida que el sistema sabe anticiparse. Al recomendar el seguimiento ocular cuando el paciente aún está bien de visión y fatiga, el sistema busca ganar tiempo para que el usuario aprenda a usar la tecnología con calma. Esto es fundamental en enfermedades degenerativas ya que es mucho mejor entrenar el manejo del sistema cuando el paciente tiene energía en lugar de esperar a que la progresión de la enfermedad haga que el aprendizaje sea demasiado cuesta arriba y se rechace.

Comparativa con trabajos previos y aportación del proyecto

Como se indicaba en el Capítulo 3 - teóricos, la mayoría de los catálogos actuales de SAAC se presentan en formatos estáticos (PDF, guías en papel o webs comerciales). Los profesionales de las asociaciones a menudo deben invertir mucho tiempo cruzando los datos e investigando las opciones.

La principal aportación de este trabajo es romper esa barrera mediante la automatización: se ha conseguido centralizar la información dispersa del mercado en un único punto y cruzarla instantáneamente con el perfil clínico y de accesibilidad del usuario. La herramienta actúa como un puente directo entre la ingeniería del software y el día a día de las asociaciones de pacientes.

Conclusiones

Tras completar el desarrollo, despliegue y validación de la herramienta web de recomendación de SAAC para pacientes con ELA, se presentan las principales conclusiones del proyecto divididas en los hitos alcanzados.

- **Cumplimiento de objetivos:** Se ha logrado diseñar e implementar un prototipo web funcional y accesible que centraliza las soluciones SAAC del mercado y automatiza su recomendación. La lógica del cuestionario traduce con éxito variables biomédicas y de accesibilidad en propuestas tecnológicas concretas, lo que optimiza un proceso que hasta ahora los profesionales realizaban de forma manual y dispersa.
- **Validación en entornos reales:** Las pruebas con pacientes reales de ELACyL demostraron la utilidad práctica del sistema. Obtener una nota de adecuación de 6/10 en las primeras pruebas reales valida que el recomendador ofrece una guía realista, sirviendo en dos casos muy diferentes, tanto de respuesta inmediata para fases avanzadas como de herramienta de planificación preventiva en las fases iniciales.
- **Impacto formativo e interdisciplinar:** Desde el punto de vista del aprendizaje, el proyecto ha permitido aplicar principios de Ingeniería de la Salud a un problema sociosanitario real. Se ha logrado unificar el lenguaje clínico (escalas de autonomía, fatiga o afectación del habla) con la lógica computacional (estructuras de bases de datos relacionales y condiciones lógicas de filtrado).

7.1. Aspectos relevantes

Esta sección resume la experiencia práctica acumulada durante las fases del proyecto, detallando las decisiones de diseño no triviales y los caminos descartados tras obtener resultados negativos.

El diseño del modelo de datos y el efecto embudo

Uno de los mayores retos del proyecto fue estructurar la base de datos de manera que reflejara fielmente el catálogo SAAC. Inicialmente, se planteó un modelo de emparejamiento demasiado rígido, donde cada perfil de usuario se conectaba directamente con un único kit cerrado de software y hardware. Sin embargo, las primeras simulaciones técnicas dieron resultados negativos: la ELA es una enfermedad muy heterogénea y este enfoque provocaba que muchos perfiles se quedaran sin ninguna recomendación válida al no cumplir con el 100 % de los requisitos estrictos de un kit.

Para solucionar esto, se optó por cambiar la estrategia hacia un modelo de filtrado por exclusión (efecto embudo). La base de datos se dividió en entidades independientes (software, hardware, periféricos, bancos de voz). El cuestionario web no busca el sistema ideal sino que va descartando lo que el paciente no puede usar.

Por ejemplo, si el usuario marca Interacción: ojos, el sistema elimina directamente los ratones y pantallas táctiles, pero mantiene abiertos todos los *Eye trackers* y softwares compatibles de la base de datos. Esto permite que el sistema trate de ofrecer alternativas viables y escalables.

Justificación de la plataforma

La elección de desarrollar una aplicación web (en lugar de una aplicación de escritorio o móvil) se justificó por criterios de accesibilidad y despliegue. Un entorno web garantiza que los profesionales de las asociaciones puedan acceder al recomendador desde cualquier dispositivo (Windows, Mac, tablet) sin necesidad de instalaciones complejas, únicamente entrando en un enlace. Además, facilita la actualización en tiempo real de la base de datos a medida que surjan nuevos dispositivos o aplicaciones de comunicación en el mercado, asegurando la sostenibilidad del proyecto a largo plazo.

Líneas de trabajo futuras

El desarrollo de este proyecto ha permitido asentar las bases para la recomendación y selección de Sistemas Aumentativos y Alternativos de Comunicación (SAAC) en pacientes con Esclerosis Lateral Amiotrófica (ELA). Sin embargo, la naturaleza progresiva de la enfermedad [[Start Stem Cells, 2026](#), [Hardiman et al., 2017](#)] y la constante evolución de la tecnología abren un amplio abanico de mejoras que enriquecerían el alcance y la utilidad de la propuesta actual.

A continuación, se presenta un informe que detalla las principales líneas de trabajo futuras, orientadas tanto a perfeccionar la herramienta existente como a expandir sus capacidades.

8.1. Optimización y accesibilidad de la plataforma web

Dado que los usuarios finales de la aplicación pueden presentar diferentes grados de afectación motriz o visual desde etapas tempranas, una prioridad absoluta es garantizar la mayor accesibilidad posible de la página web.

Actualmente, el diseño cumple con funciones básicas de navegación, pero es crucial adaptarlo a las pautas internacionales de accesibilidad web (como las WCAG). Esto implica diseñar interfaces compatibles con pulsadores externos, sistemas de barrido en pantalla, lectores de voz y optimizaciones para sistemas de seguimiento ocular (eyetracking). El objetivo es que el propio paciente, independientemente de su movilidad, pueda explorar la web de forma autónoma.

8.2. Actualización del catálogo de SAAC y nuevos sistemas

El campo de la tecnología asistencial avanza a gran velocidad. Para que la herramienta no quede obsoleta, el sistema debe concebirse como un entorno dinámico y escalable:

- **Inclusión de novedades tecnológicas:** Se debe establecer un protocolo para añadir de forma periódica los nuevos SAAC que se vayan inventando o comercializando en el mercado.
- **SAAC sin ayuda:** Aunque el proyecto se ha centrado notablemente en soluciones con ayuda, es importante abrir el espectro hacia la posibilidad de implementar SAAC sin ayuda, como la lengua de signos o códigos gestuales propios, que resultan de enorme utilidad en fases específicas de la enfermedad o en entornos familiares concretos.

8.3. Validación clínica con pacientes reales

Una de las fases más importantes para consolidar la efectividad del proyecto es su validación en el mundo real. Actualmente se ha podido comenzar en colaboración con la asociación de ELACyL, pero es fundamental coordinar estudios y pruebas de uso con más pacientes reales de ELA, sus familias y profesionales sanitarios (como logopedas y terapeutas ocupacionales).

Esta validación clínica permitirá contrastar la utilidad real del cuestionario de evaluación, identificar posibles preguntas ambiguas, corregir sesgos en las recomendaciones y detectar áreas de mejora en la experiencia de usuario que solo se manifiestan en el día a día de la convivencia con la enfermedad.

8.4. Evolución de las funcionalidades y experiencia de usuario

Para aportar un mayor valor añadido tanto al paciente como al profesional que lo acompaña, se proponen dos mejoras directas en la interacción con la plataforma:

- **Descarga de informes de recomendación:** Sería de gran utilidad ofrecer al usuario la posibilidad de descargarse un informe PDF que

detalle los resultados de su recomendación. Este documento serviría como guía de referencia para la familia o para entregar directamente al equipo médico y agilizar la toma de decisiones.

- **Incorporación de material multimedia:** La lectura de las características de un SAAC no siempre es suficiente para comprender su funcionamiento. Añadir vídeos explicativos con ejemplos prácticos de uso de cada sistema facilitaría la comprensión al usuario final y ayudaría a reducir la curva de aprendizaje y la reticencia inicial al uso de estas herramientas.

8.5. Mejoras técnicas y evolución de la ingeniería de software

Con el fin de mejorar el prototipo actual hacia un estándar de producción profesional y escalable se contemplan las siguientes directrices técnicas:

- **Automatización de pruebas e Integración Continua (CI):** Se plantea la migración de la validación funcional manual actual hacia un entorno basado en pruebas automatizadas mediante frameworks como *PyTest* o *Unittest*. Ello permitirá desplegar un flujo de trabajo automatizado (*pipeline*) en el repositorio que valide el "efecto embudo" del algoritmo ante modificaciones de las reglas lógicas, previniendo fallos de regresión.
- **Evolución hacia una arquitectura desacoplada (API-First):** Para asegurar la sostenibilidad tecnológica a largo plazo, se propone separar el motor de recomendación de la actual interfaz monolítica. Al transformar el backend en una API REST independiente, la lógica clínica del recomendador podrá ser utilizada por otros sistemas hospitalarios, aplicaciones móviles o terminales específicos en entornos clínicos.
- **Automatización en la gestión de datos (ETL y Migraciones):** El mantenimiento manual actual de scripts SQL estáticos se sustituirá por un sistema de control de versiones de base de datos como *Alembic* para *SQLAlchemy*. Asimismo, se planifica el desarrollo de un módulo de automatización de procesos ETL (Extract, Transform, Load) conectado a fuentes abiertas de datos de tecnología asistencial (como las APIs de CEAPAT) [CEAPAT - IMSERSO, 2024] para mantener el catálogo actualizado de forma autónoma.

- **Seguridad por diseño (Security by Design):** En futuras fases conceptuales, se sustituirá la incorporación de seguridad reactiva por un modelado de amenazas inicial y exhaustivo. Esto incluirá la integración en el ciclo de desarrollo de herramientas de Análisis Estático de Código (SAST) como *Bandit*, alineando el proyecto con los principios DevSecOps requeridos en el tratamiento seguro de datos de salud.

8.6. Conclusión

A modo de conclusión, la ruta trazada en este capítulo refleja que el sistema desarrollado no debe entenderse como un elemento estático similar a los que ya existían previamente, sino como una solución adaptable en el tiempo. La intersección entre la rápida evolución de la tecnología y la compleja realidad de la ELA exige un compromiso continuo con la accesibilidad, la actualización de contenidos y la validación empírica junto a profesionales y asociaciones. El verdadero éxito de este recomendador radicará en su capacidad para transformarse al ritmo que lo hacen las necesidades del usuario.

Bibliografía

- [Afecto Mariposa, 2024] Afecto Mariposa (2024). *Guía de comunicación Aumentativa Afecto Mariposa*. Archivo PDF: <https://afectomariposa.com/wp-content/uploads/2024/07/Guia-de-comunicacion-Aumentativa-Afecto-Mariposa1.pdf>.
- [AlfaSAAC, 2026] AlfaSAAC (2026). Comunicación aumentativa y alternativa (caa). Disponible en: <https://alfasaac.com/comunicacion-aumentativa-y-alternativa/>.
- [ARASAAC, 2026] ARASAAC (2026). Centro aragonés para la comunicación aumentativa y alternativa. Disponible en: <https://beta.arasaac.org/>.
- [AssistiveWare, 2026] AssistiveWare (2026). Proloquo2go - aplicación de comunicación aumentativa y alternativa. Disponible en: <https://www.assistiveware.com/es/productos/proloquo2go>.
- [Cave and Bloch, 2021] Cave, R. and Bloch, S. (2021). Voice banking for people living with motor neurone disease: Views and expectations. *International Journal of Language & Communication Disorders*, 56(1):116–129.
- [CEAPAT - IMSERSO, 2024] CEAPAT - IMSERSO (2024). Catálogo de productos de apoyo: Varias categorías. Disponible en: <https://catalogoceapat.imserso.es/productos/categorias/variascategorias>.
- [Chen et al., 2025] Chen, L., Wang, H., Kim, S., and Liu, Y. (2025). Artificial intelligence empowered voice generation for amyotrophic lateral sclerosis patients. *Scientific Reports*, 15:8472.

- [Davis et al., 2026] Davis, E., Martinez, K., and Technology Control Support Consortium (2026). Timing of communication and technology control support in als – a systematic review. *Amyotrophic Lateral Sclerosis & Frontotemporal Degeneration*, 27(2):112–125.
- [ELA Andalucía, 2023] ELA Andalucía (2023). *Publicación sobre Esclerosis Lateral Amiotrófica*. Disponible en: <https://www.elaandalucia.es/wp-content/uploads/2023/02/publication.pdf>.
- [Fundación Conectea, 2026] Fundación Conectea (2026). Sistemas alternativos y aumentativos de comunicación (saac). Disponible en: <https://www.fundacionconectea.org/novedades/blog/sistemas-alternativos-y-aumentativos-de-comunicacion-s-a-a-c>.
- [Hardiman et al., 2017] Hardiman, O., Al-Chalabi, A., Chio, A., Kiernan, M. C., Eisen, A., McDermott, C. J., Mitsumoto, H., and van den Berg, L. H. (2017). Amyotrophic lateral sclerosis. *Nature Reviews Disease Primers*, 3(1):1–19.
- [Irisbond, 2026] Irisbond (2026). Soluciones de comunicación aumentativa y alternativa. Disponible en: <https://www.irisbond.com/comunicacion-aumentativa-alternativa/soluciones/>.
- [Plena Inclusión, 2026] Plena Inclusión (2026). Recurso: Sistemas alternativos y aumentativos de comunicación. Disponible en: <https://www.plenainclusion.org/discapacidad-intelectual/recurso/sistemas-alternativos-y-aumentativos-de-comunicacion/>.
- [Pérez Rodríguez, 2023] Pérez Rodríguez, M. D. (2023). *Aplicación de los sistemas alternativos y aumentativos de comunicación*. Editorial ICB, 1 edition. Disponible en eLibro: <https://elibro-net.ubu-es.idm.oclc.org/es/lc/ubu/titulos/283824>.
- [Qinera, 2026] Qinera (2026). Soluciones de comunicación aumentativa. Disponible en: <https://qinera.com/es/soluciones/comunicacion-aumentativa/>.
- [Rico Ivorra and Moltó Abad, 2021] Rico Ivorra, A. and Moltó Abad, F. E. (2021). Comunicación aumentativa y alternativa en personas con esclerosis lateral amiotrófica y su impacto en la calidad de vida.
- [Rong et al., 2024] Rong, P., Heidrick, L., and Pattee, G. (2024). A multimodal approach to automated hierarchical assessment of bulbar involvement in amyotrophic lateral sclerosis. *Frontiers in Neurology*, 15:1396002.

- [Smith et al., 2025] Smith, J., Johnson, M., and ALS Clinical Review Group (2025). Stage-based communication rehabilitation in amyotrophic lateral sclerosis (als): A review of strategies for enhancing quality of life. *PubMed Central (PMC)*, 14:PMC12857845. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12857845/>.
- [Start Stem Cells, 2026] Start Stem Cells (2026). The stages of als: Understanding the progression of the disease. Disponible en: <https://www.startstemcells.com/es/the-stages-of-als-understanding-the-progression-of-the-disease.html>.
- [Sánchez, 2026] Sánchez, P. L. (2026). Implementación del voice banking (banco de voz) antes de la aparición de síntomas bulbares en ela. Material docente de la asignatura Sistemas Electrónicos de Ayuda a la Discapacidad, Universidad de Burgos.
- [Tobii Dynavox, 2026] Tobii Dynavox (2026). Productos de apoyo para la comunicación. Disponible en: <https://es.tobiidynavox.com/pages/products>.
- [Yamagishi et al., 2012] Yamagishi, J., Veaux, C., King, S., and Renals, S. (2012). Speech synthesis technologies for individuals with vocal disabilities: Voice banking and reconstruction. *Acoustical Science and Technology*, 33(1):1–5.