

Desarrollo de un sistema de traducción de textos impresos al braille mediante la metodología de diseño mecatrónico

Development of a Printed Text to Braille Translation System using the Mechatronic Design Methodology

Umanel **Hernandez Gonzalez**¹, Flabio **Mirelez Delgado**², José **Díaz Pérez**³,
Jesús **Letchipia Padilla**⁴, Roberto Cruz **Leija**⁵

Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas, Zacatecas, MÉXICO

¹ORCID: 0000-0002-4109-1776 | uahernandez@ipn.mx

²ORCID: 0000-0003-3547-9739 | fmirelezd@ipn.mx

³ORCID: 0009-0004-7139-7305 | jdiazp1501@alumno.ipn.mx

⁴ORCID: 0009-0000-8939-3784 | jletechipiap1500@alumno.ipn.mx

⁵ORCID: 0000-0003-1746-0487 | rocruzl@ipn.mx

Recibido 07/11/2024, aceptado 24/01/2025.

Resumen

El documento aborda el desarrollo de un sistema de traducción de textos impresos a lenguaje Braille mediante la metodología de diseño mecatrónico, con el objetivo de mejorar el acceso al conocimiento para personas con discapacidad visual. Se destaca la utilización de tecnologías de visión artificial y mecanismos para recrear letras en Braille que faciliten el aprendizaje en este lenguaje en edades tempranas. La estación propuesta permite al usuario leer cualquier texto impreso de manera convencional y brinda información útil para cuidadores, tutores o personal a cargo de la del usuario del prototipo. Se mencionan recomendaciones para el uso del sistema, como evitar papeles reflectores de luz y utilizar letras legibles. Se resalta el éxito del proyecto puesto que el sistema es capaz de reconocer texto escrito a mano alzada, brindando soluciones efectivas y accesibles para la comunidad de personas con discapacidad visual. Además, se presentan posibles actualizaciones y correcciones para mejorar la experiencia del usuario.

Palabras clave: inclusión, braille, visión artificial, sistemas mecatrónicos, tecnologías de la comunicación.

Abstract

The paper addresses the development of a system for the translation of printed texts into Braille language using the mechatronic design methodology, with the aim of improving access to knowledge for people with visual impairment. It highlights the use of artificial vision technologies and mechanisms to recreate Braille letters to facilitate learning in this language at an early age. The proposed station allows the user to read any printed text in a conventional way and provides useful information for caregivers, tutors or personnel in charge of the user of the prototype. Recommendations for the use of the system are mentioned, such as avoiding light-reflecting papers and using legible letters. The success of the project is highlighted since the system can recognize handwritten text, providing effective and accessible solutions for the visually impaired community. In addition, updates and corrections to improve the user experience are presented.

Index terms: inclusion, braille, machine vision, mechatronic systems, communication technologies.

I. INTRODUCCIÓN

En el presente documento se exponen los motivos esenciales que respaldan la implementación de este prototipo, así como los desafíos que enfrentan las personas al llevar a cabo su formación académica y los costos asociados. Según la Sociedad Mexicana de Oftalmología y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en México hay aproximadamente 2 millones 237 mil personas con deficiencia visual y más de 415 mil 800 personas con ceguera, lo que representa un 2.1% de la población total. Estas personas enfrentan dificultades para recibir una educación adecuada debido a la falta de personal capacitado, escasez de material y pérdida de interés. Esto dificulta el aprendizaje del sistema Braille durante la educación básica y su continuación hasta obtener una cedula profesional [1].

En el estado de Zacatecas, solamente la capital zacatecana cuenta con un aproximado de 600 jóvenes que presentan debilidad visual o ceguera y no pueden integrarse a un ambiente escolar. Debido a las nuevas políticas de inclusión, el gobierno estatal ha tomado la decisión que las personas que presentan este tipo de discapacidad deben de integrarse al ambiente escolar como el de los demás estudiantes [8]. Por otro lado, el tiempo de aprendizaje para lograr leer el sistema Braille tiene una duración promedio de 4 meses para la versión no contraída [2].

La impresión del código Braille en papel con relieve mediante impresoras especiales dificulta su producción. Los libros en Braille tienen desventajas en términos de tamaño y costo, ya que el relieve de las letras ocupa más espacio que la escritura en tinta y el papel utilizado es más caro y escaso [3]. Esto limita la accesibilidad y aumenta los costos de aprendizaje, lo que deja excluida a una parte importante de la población. Además, el aumento de la discapacidad visual a nivel mundial, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), plantea un problema que no puede ser ignorado [4].

La exdirectora del Instituto para la Atención e Inclusión de las Personas con Discapacidad en el Estado de Zacatecas, comentó que en el estado se cuenta con dos impresoras que permiten la lectura de archivos especiales que permiten el empastado de Braille, las cuales cada una de ellas tiene un costo superior a los \$150,000.00 MXN, además estos archivos son emitidos por un software que su licencia tiene un costo promedio \$15,000.00 MXN.

A partir de estos problemas, se desarrolló un prototipo que permita convertir rápidamente cualquier texto en Braille sin la necesidad de una computadora personal. Esto mejorara el acceso al conocimiento para las personas con discapacidades visuales y reduciría los costos de aprendizaje y autonomía. Además, se abrirían nuevas oportunidades de investigación y trabajo para estas personas. Aunque existen sistemas similares en el mercado, la ventaja de este prototipo es que no se limita a la lectura de documentos digitales, sino que abarca a todos los estudiantes con problemas de visión, desde la educación básica hasta la universidad. El diseño del prototipo utilizara tecnologías de visión artificial y mecanismos para recrear letras en Braille, creando un relieve texturizado que facilite el aprendizaje de diversos temas en el lenguaje Braille.

II. TRABAJO RELACIONADO

En la actualidad, el avance tecnológico ha permitido la creación de diversas herramientas tecnológicas que ayudan al aprendizaje de lectura, como de redacción en lenguaje Braille a las personas que lo necesitan. A continuación, se presentan algunas herramientas diseñadas actualmente con el objetivo de facilitar el aprendizaje de Braille, las cuales presentan las siguientes características [5].

Braibook es un dispositivo que permite la lectura de diversos documentos digitales de cualquier formato, sin importar el idioma, al Braille, además permite salida de audio, tiene un solo carácter con la finalidad de que el usuario, con solo pasar la mano por encima de él, pueda realizar la lectura. Cuenta con una batería que permite su uso por 5 horas, con una capacidad de 8 GB, además cuenta con entrada USB y bluetooth para la recepción de libros. Con un costo de \$17 500.00 MXN [6].

Jogar es un juguete diseñado por Marisol Amador Salas, egresada de diseño industrial de la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA). Jugar es un tablero electrónico, que con ayuda de piezas denominadas hongos, el niño puede formar una letra, sílaba o palabra, y al finalizar presiona un botón, verificando que esté bien escrita, si es así se escuchará fonéticamente, sino es así permanecerá en silencio. También ayuda a desarrollar el tacto con ayuda de fichas y regletas para formar palabras, mientras amplía su vocabulario [7].

Braille Sense U2 es un dispositivo electrónico cuya función es permitir que las personas con discapacidad visual puedan acceder a una variedad de aplicaciones y herramientas que les facilitan su vida diaria, como procesamiento de textos, lectura de libros electrónicos, navegación por internet, correo electrónico, entre otras. Además, el dispositivo también cuenta con aplicaciones como calculadora científica, visor de correo

electrónico, Excel, PowerPoint, y redes sociales como Facebook y Twitter. Su precio en el mercado se sitúa en torno a los \$95,000.00 MXN, según la conversión de dólares [8].

El proyecto que se desarrolló se caracteriza ya que permite la lectura de diferentes textos, incluyendo letra a mano alzada, lo que permite a los pacientes leer cualquier texto.

III. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto se decidió usar la metodología de diseño mecatrónico ya que además de obtener buenos resultados en proyectos de robótica como en [9], [10], [11] y [12]. El objetivo principal del proyecto consiste en diseñar y construir un prototipo de una máquina didáctica que mediante el uso de visión artificial permita la interpretación y traducción de un texto impreso a Braille. Para lograr lo anterior se debe programar la traducción del abecedario a lenguaje Braille y desarrollar una máquina receptora en la que se pueda palpar la traducción. Así mismo, se debe integrar una interfaz para una persona que asista al usuario y que permita observar el número de palabras leídas, el tiempo que tardó en leerlas y cambiar la velocidad de lectura de caracteres mediante botones. Otro punto importante es que mediante el uso de actuadores se puede construir el relieve en el dispositivo receptor y mediante visión artificial se puede detectar y capturar los caracteres impresos en una hoja de papel bond tamaño carta, con ayuda de la implementación de un OCR (*Optical Character Recognition* por sus siglas en inglés y en español Reconocimiento Óptico de Caracteres).

IV. DESARROLLO

A. Identificación de necesidades

Las personas que presentan algún tipo de discapacidad visual al ser un porcentaje mínimo en la población mexicana, desde temprana edad presentan problemas para empezar su educación, ya que no se cuenta con el suficiente personal capacitado para esta minoría en el sistema educativo. Pero en la actualidad se cuenta con la tecnología suficiente, que permite la creación de dispositivos que faciliten la educación de este sector de la población, para la comprensión de la lectura y escritura en sistema Braille [11].

B. Análisis del problema

Para dar respuesta a la necesidad que se propuso, se tiene que plantear el desarrollo del prototipo de estación de lectura de Braille donde su creación se puede dividir en 4 subproblemas:

1. El diseño y construcción de la estructura del prototipo, para que este sea capaz de soportar el peso de los documentos a escanear al igual que iluminarlos correctamente.
2. El desarrollo del sistema de visión artificial enfocado al reconocimiento óptico de caracteres.
3. El diseño e implementación de mecanismos sujetos a actuadores para hacer posible la interpretación al lenguaje Braille.
4. La creación de la interfaz a mostrar en el display para indicar información relacionada a la lectura del usuario y su avance de aprendizaje.

Como parte del proceso de diseño mecatrónico y para dar una mejor idea del funcionamiento deseado del sistema en la siguiente sección se muestra la metodología IDEF-0 en la cual se desarrollan los distintos niveles de los sistemas que conforman el proyecto.

En la Figura 1 se muestra el diagrama A-0, en donde se describe de manera general el proceso de traducción del sistema, con sus respectivas entradas, controles, mecanismos y salidas. La Figura 2 muestra el diagrama A0, el cual se muestran los procesos para el funcionamiento del sistema de traducción Braille, donde los controles que rigen los procesos son la configuración de velocidad, tiempo de respuesta, tamaño de fuentes e iluminación; los mecanismos son los actuadores, instrumentación y el microcontrolador, la entrada es el texto impreso para obtener como salida el texto traducido a Braille, los tres subprocesos son: el reconocimiento óptico de caracteres, el procesamiento de datos, la activación de mecanismos de impresión y la muestra de datos y estadística de avance.

4

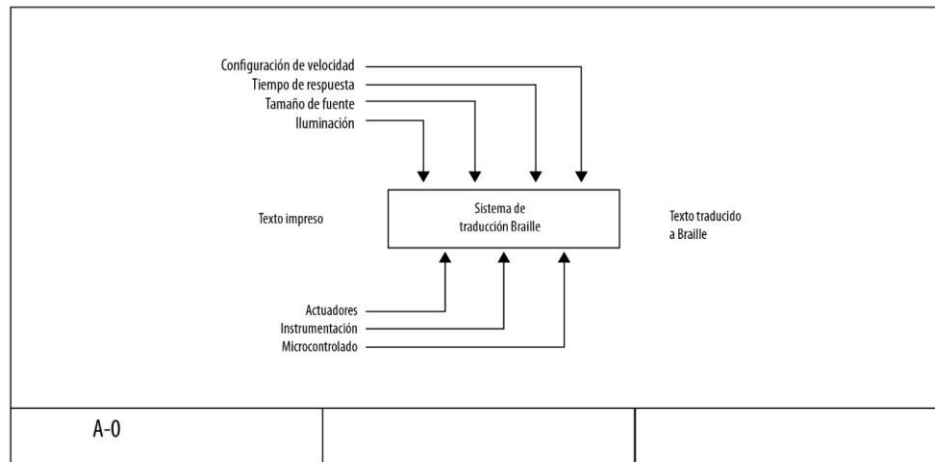


Fig. 1. Diagrama IDEF nivel A-0.

Para poder definir las especificaciones de diseño se deben enlistar las necesidades que debe llevar el proyecto ponderando del 1 al 5, donde 5 es lo más importante y 1 es lo menos importante. Cabe destacar que estas ponderaciones se hicieron de acuerdo con las necesidades que los desarrolladores del proyecto detectaron, esto se muestra en la Tabla 1.

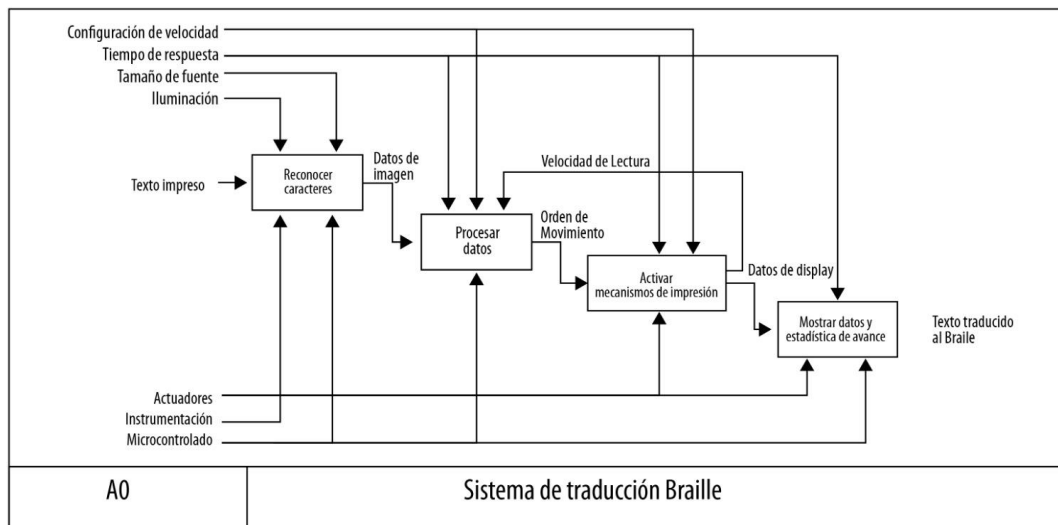


Fig. 2. Diagrama IDEF nivel A0.

TABLA I. LISTA DE NECESIDADES.

No.	Necesidad	Importancia
1	Preciso al reconocer caracteres	5
2	Fácil de usar	4
3	Buena estética	2
4	Tener control de velocidad	4
5	Contar el número de letras leídas por minuto	4
6	Permitir la sujeción de una hoja tamaño carta	4
7	Resistente a caídas	3
8	Tiene una interfaz de usuario amigable	3
9	La estructura debe contar con elementos de seguridad	2
10	Bajo costo	3
11	Fácil de trasladar	3
12	Compacto	2

Una vez se tienen las necesidades ponderadas, se tienen que asociar al proyecto en forma de métricas y de esta manera se puedan expresar las especificaciones de diseño. En la Tabla 2 se muestran las métricas que se lograron definir al igual que su relación con las necesidades y su importancia.

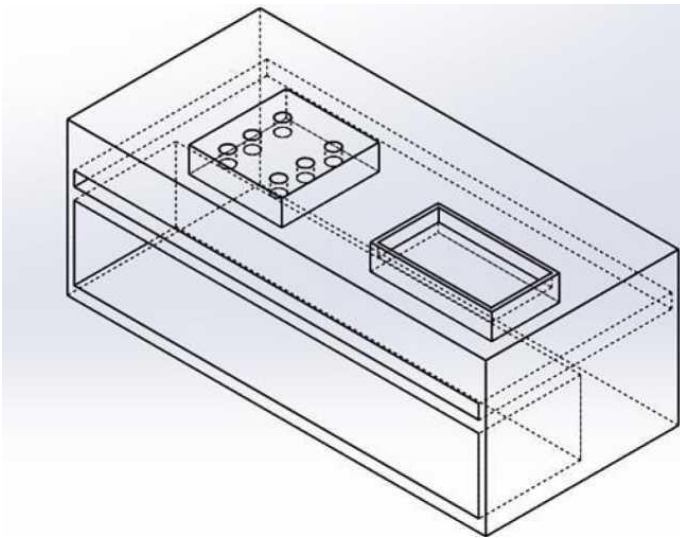
C. Propuestas de posibles soluciones

Con base en algunas ideas generadas por pensamiento divergente, se realizaron 3 diseños conceptuales para ser analizados y elegir el que mejor se adecue a los criterios necesarios para el correcto funcionamiento del prototipo.

- a) **Diseño conceptual 1.** Se caracteriza por tener una gran durabilidad y una carcasa tipo rectangular. El material principal es madera y tiene un compartimiento específico para agrupar los componentes, cosa que facilita su mantenimiento. Así mismo emplea el mecanismo de levas como principal recurso de funcionamiento (véase Figura 3).

TABLA 2. LISTA DE MÉTRICAS.

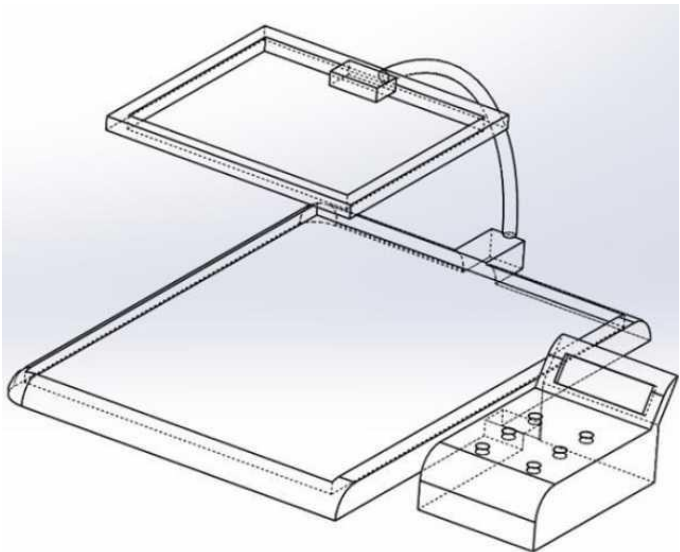
No. de Métrica	No. de Necesidad	Métrica	Importancia	Unidades
1	1	Control de iluminación	5	Lúmenes
2	4, 5	Conteo de letras	5	-
3	1	Precisión	5	-
4	3	Estética	2	-
5	1	Calidad de la cámara	3	Píxeles
6	8, 2	Facilidad de uso	4	-
7	9, 11	Estabilidad de la estructura	3	-
8	11	Peso	2	Kilogramo
9	11, 12	Volumen de estructura	2	Metro Cúbico
10	10	Costo del prototipo	3	Peso Mexicano
11	9	Seguridad del usuario	3	-
12	7	Esfuerzo	3	Newtons
13	8	Interfaz amistosa	3	-



Características	DC1
Estilo de Atril	Geométrico
Material de la estructura	Madera
Sistema de iluminación	Bombilla incandescente
Actuadores	Micro-reductor
Mecanismos	Mecanismo de levas
Alimentación	Conector DC

Fig. 3. Boceto del diseño conceptual 1.

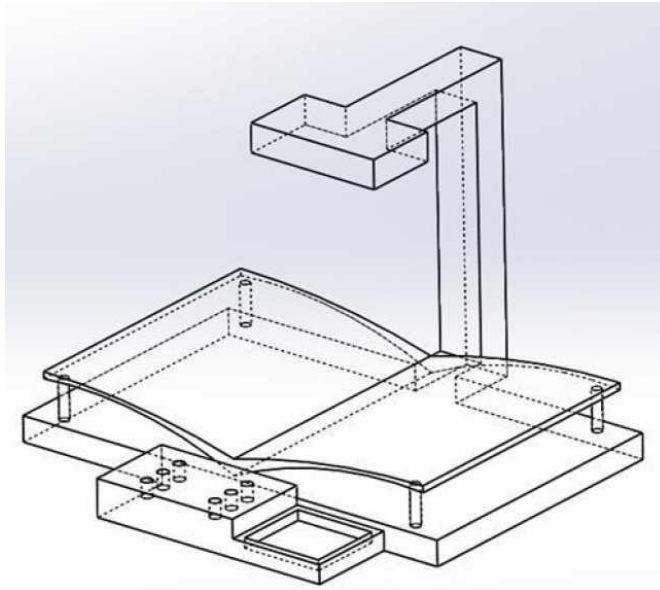
b) **Diseño conceptual 2.** En la Figura 4 se muestra la propuesta de un diseño conceptual. Este presenta una carcasa hecha a partir de acrílico. La principal característica de esta es su forma orgánica que evita accidentes gracias a sus esquinas redondeadas. Utiliza un mecanismo biela-manivela y un sistema de iluminado construido a partir de tiras de LED SMD. Añadiendo una mayor portabilidad gracias a su sistema de alimentación de baterías.



Características	DC1
Estilo de Atril	Orgánica
Material de la estructura	Acrílico
Sistema de iluminación	LED SMD
Actuadores	Picoservomotor
Mecanismos	Mecanismo de biela manivela
Alimentación	Batería LiPo

Fig. 4. Boceto del diseño conceptual 2.

- c) **Diseño conceptual 3.** Este diseño (véase Figura 5) presenta una construcción a base de plástico con estilo moderno. Su principal característica es el uso de un atril para libros junto con el empleo de un Led tipo COB para la iluminación. El mecanismo usado por este diseño es del tipo piñón cremallera.



Características	DC1
Estilo de Atril	Moderno
Material de la estructura	Plástico
Sistema de iluminación	LED COB
Actuadores	Microservomotor
Mecanismos	Piñón-cremallera
Alimentación	Batería ácido-plomo

Fig. 5. Boceto del diseño conceptual 3.

Después de generar las diferentes soluciones, se definen criterios de selección para evaluar los diferentes diseños conceptuales y elegir la solución que se ajuste mejor a las necesidades del problema planteado. A partir de la Tabla 3 se evaluó cada diseño conceptual asignando una ponderación para cada criterio de 80% = excelente, 60% = bueno y 40% = malo.

TABLA 3. TABLA DE PERTENENCIA.

Criterios de selección	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Total	Pertenencia
A. Debe de iluminar toda la hoja a escanear	X	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	0.182
B. Tamaño	0	X	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0.018
C. Costo de componentes	0	1	X	1	0	0	1	1	0	0	0	4	0.073
D. Fácil de transportar	0	1	0	X	0	0	1	1	0	0	1	4	0.073
E. Durabilidad	0	1	1	1	X	1	1	1	1	1	1	9	0.164
F. Facilidad de uso	0	0	1	1	0	X	1	1	1	1	0	6	0.109
G. Facilidad de mantenimiento	0	1	0	0	0	0	X	1	1	0	1	4	0.073
H. Ensamble sencillo	0	1	0	0	0	0	0	X	1	1	0	3	0.055
I. Seguridad	0	1	1	1	0	0	0	0	X	1	1	5	0.091
J. Autonomía	0	1	1	1	0	0	1	0	0	X	1	5	0.091
K. Proceso de manufactura	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	X	4	0.073
												55	1

De acuerdo con los resultados de la Tabla 4 se toma el diseño conceptual 2 como diseño final debido a que destaca tanto en seguridad, tamaño y facilidad de transporte, sin dejar de tener un buen rendimiento en los demás criterios de selección por lo que se acerca más a los criterios necesarios para un correcto funcionamiento.

TABLA 4. TABLA DE SELECCIÓN.

Criterios de selección	DC1	DC2	DC3	Pertenencia
A. Debe de iluminar toda la hoja a escanear	0.8000 0.1456	0.8000 0.1456	0.8000 0.1456	0.1820
B. Tamaño	0.4000 0.0072	0.8000 0.0144	0.8000 0.0144	0.0180
C. Costo de componentes	0.8000 0.0584	0.4000 0.0292	0.4000 0.0292	0.0730
D. Fácil de transportar	0.4000 0.0292	0.8000 0.0584	0.6000 0.0438	0.0730
E. Durabilidad	0.8000 0.1312	0.6000 0.0984	0.6000 0.0984	0.1640
F. Facilidad de uso	0.6000 0.0654	0.6000 0.0654	0.6000 0.0654	0.1090
G. Facilidad de mantenimiento	0.8000 0.0584	0.6000 0.0438	0.6000 0.0438	0.0730
H. Ensamble sencillo	0.6000 0.0330	0.6000 0.0330	0.6000 0.0330	0.0550
I. Seguridad	0.4000 0.0364	0.8000 0.0728	0.6000 0.0546	0.0910
J. Autonomía	0.4000 0.0364	0.6000 0.0546	0.8000 0.0728	0.0910
K. Proceso de manufactura	0.6000 0.0438	0.6000 0.0438	0.6000 0.0438	0.0730
Total	0.6450	0.6594	0.6448	1.0000

D. Diseño detallado

A continuación, se aborda lo referente al diseño detallado del prototipo de la estación para lectura y enseñanza de Braille que permita la traducción de textos impresos, teniendo en cuenta tanto la parte mecánica y estructural, así como la parte electrónica.

- Diseño mecánico. En el proceso de generar el movimiento de los eslabones finales para la producción del relieve simbólico en Braille a partir del engrane y la cremallera, se incluyen barras de unión como se puede observar en la Figura 6. Por otro lado, en la Figura 7 se muestra la estructura final propuesta para la estación de traducción.

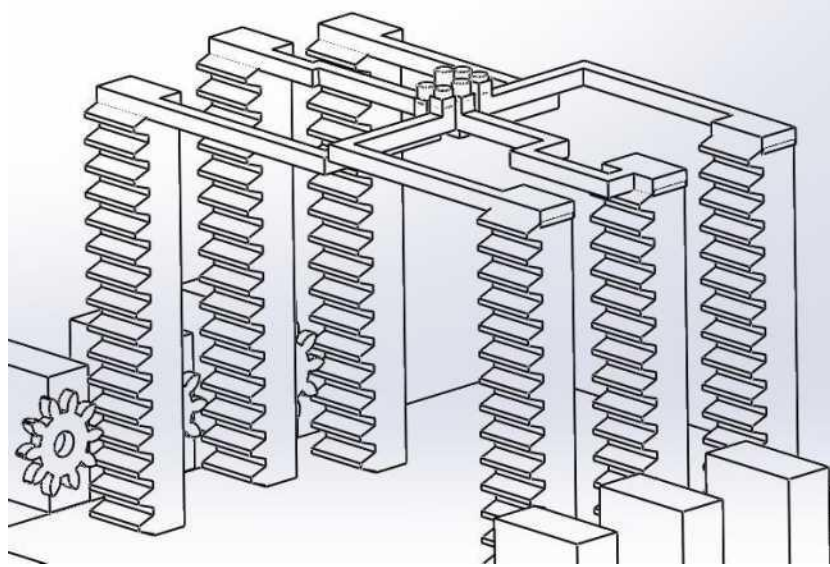


Fig. 6. Mecanismo piñón-cremallera.

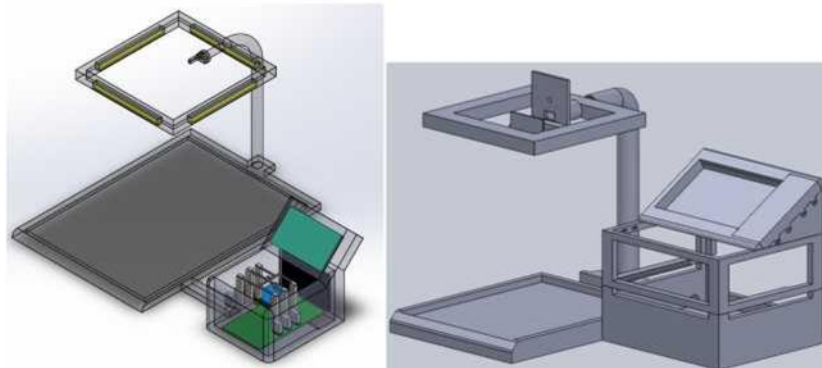


Fig. 7. Estructura final.

E. Diseño electrónico

En la Figura 8 se puede observar el diagrama de conexiones teniendo en cuenta que se realizó en un software de diseño electrónico, este circuito debe tener la conexión con la etapa de acondicionamiento de señales, las resistencias, los actuadores y el microcontrolador.

F. Diseño gráfico de la interfaz

En la Figura 9, se muestra el diseño gráfico de la interfaz el cual cuenta con un diseño sencillo e intuitivo, para que la persona responsable pueda comprender de manera sencilla su funcionamiento, donde se muestra un menú con los diversos apartados que se consideran además de un apartado para apagar el prototipo.

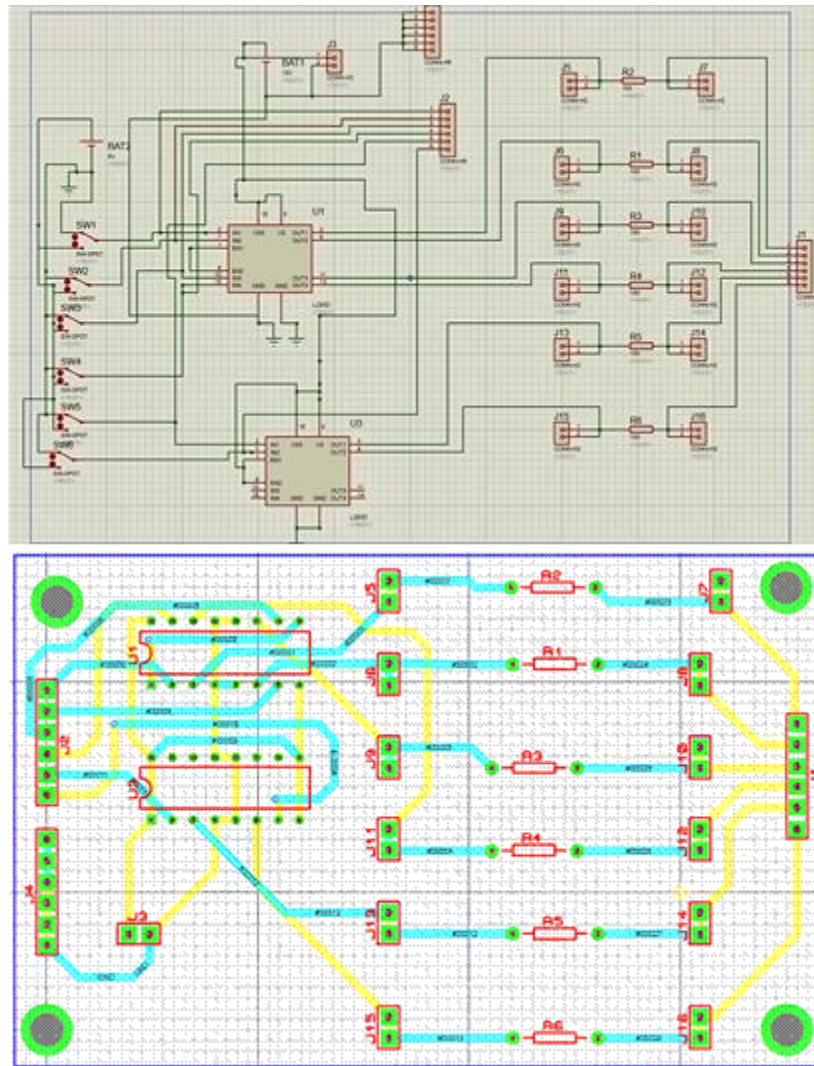


Fig. 8. PCB Rediseño (Parte superior diseño electrónico y parte inferior Placa PBC).

La Figura 10 muestra el diseño gráfico de la ventana de verificación de posición donde se contará con una vista previa de la posición de la hoja que se desea traducir, una vez que sea colocada de manera correcta se observará la velocidad que cuenta el prototipo y el número de caracteres, además de contar con dos botones de iniciar con la traducción y otro para parar la misma en el momento que el encargado crea conveniente.

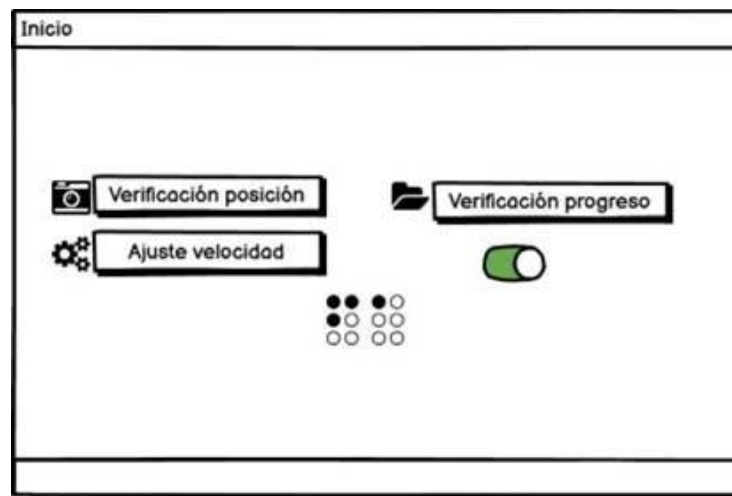


Fig. 9. Diseño gráfico de interfaz ventana inicio.

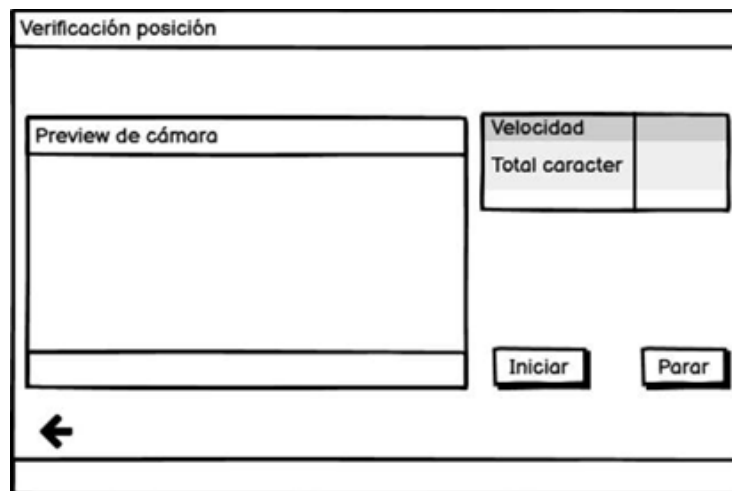


Fig. 10. Diseño gráfico de interfaz verificación posición.

V. ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

El prototipo final se muestra en la Figura 11, donde se puede observar la interfaz, el sistema de iluminación y el sistema de relieves para la lectura en Braille.

En la fase inicial de evaluación del sistema, se realizaron pruebas mediante la impresión de múltiples documentos con fragmentos de texto con distintos tamaños de fuente. El objetivo principal de este experimento era determinar el rango de tamaños de fuente para el cual el prototipo exhibía un desempeño adecuado.



Fig. 11. Prototipo construido.

El proceso de evaluación se inició con tamaños de fuente comprendidos entre 20 y 12, para así establecer los límites de funcionamiento del sistema (véase Figura 12).

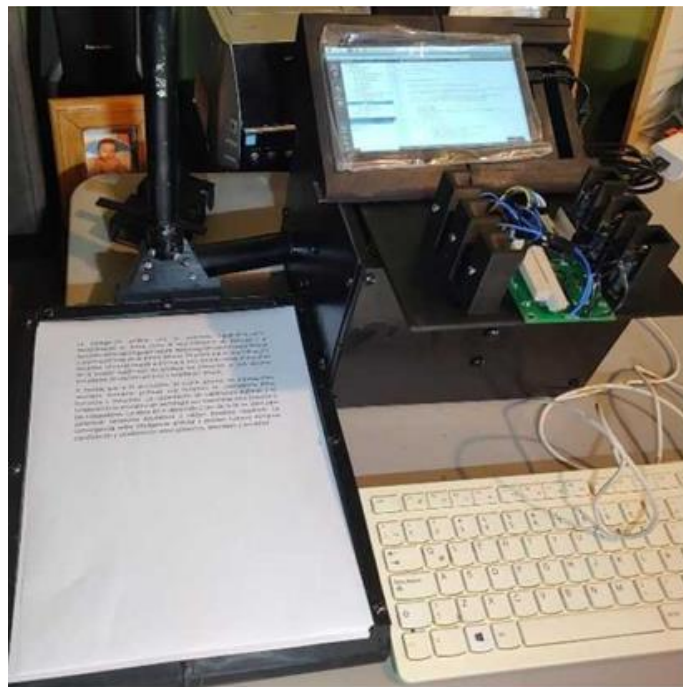


Fig. 12. Prueba del prototipo para determinar el rango de captación.

Adicionalmente, se evaluaron diversas condiciones y tipos de texto como el uso de hojas arrugadas o dobladas, cuyos resultados eran evaluados en fases posteriores. Además, se incluyeron ensayos con texto manuscrito (véase Figura 13) utilizando una diversidad de instrumentos de escritura, con el fin de ampliar la cobertura de situaciones probadas y validar la adaptabilidad del sistema.

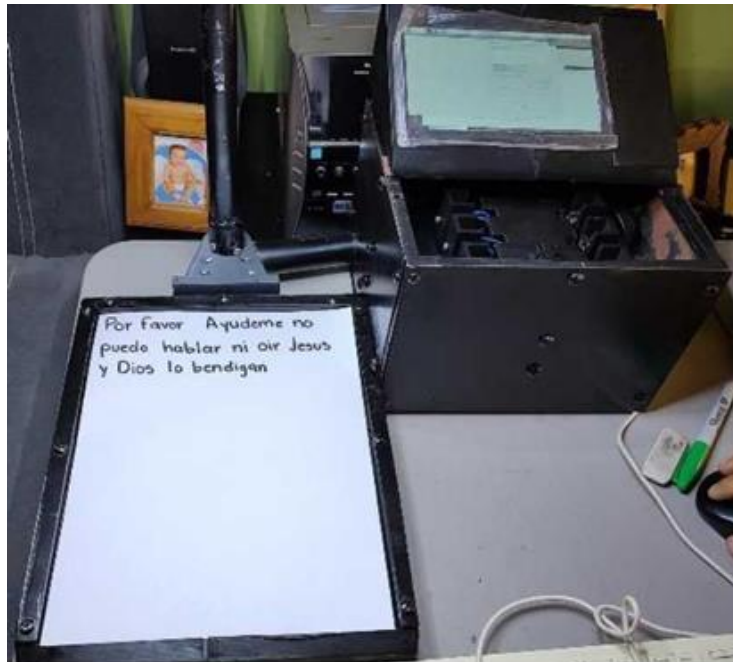


Fig. 13. Prueba utilizando letra manuscrita.

Tras la ejecución de las pruebas en el sistema, se llevó a cabo un análisis comparativo entre las palabras de entrada y salida, con el propósito de cuantificar el error inherente al sistema de reconocimiento óptico de caracteres (OCR). Este proceso de análisis y documentación permitirá la identificación de áreas de mejora para la mejora del sistema y, se derivaban recomendaciones técnicas de uso destinadas a mitigar posibles ambigüedades y confusiones para el usuario final.

En la Figura 14, se muestra una gráfica obtenida de las pruebas realizadas, donde se registra la efectividad que se tiene, donde se percató que el tamaño de los caracteres más fáciles de reconocer son del tamaño 20 hasta el 14. Dado que el OCR empleado (Tesseract) utiliza una red neuronal, se observó que, a medida que se realizaban más pruebas, la precisión del reconocimiento aumentaba.



Fig. 14. Gráfica de desempeño de reconocimiento.

En pruebas con texto en fuente Arial 12, no se reconoció nada del texto. Se continuó realizando pruebas con este tipo de texto y el reconocimiento fue aumentando su efectividad, comprobando que el entrenamiento del OCR se estaba efectuando de manera correcta. Por otro lado, se utilizaron hojas que contenían varias imágenes donde se captaban las palabras que contenían dentro de las figuras. Además, en ciertas ocasiones se confundían letras con número como el 1 con la l o el 4 con A, pero entre más pruebas se realizaban era más efectivo el reconocimiento.

Una vez que se realizaron las pruebas de reconocimiento se procedió a comprobar el funcionamiento de los actuadores, estas consistían en colocar diversos textos a reconocer y verificar que los actuadores del mecanismo se activaran correctamente y realizar el carácter deseado. Posteriormente se realizaban las mismas pruebas, buscando observar su comportamiento al de variar la velocidad; en la Figura 15, se puede apreciar un ejemplo de activación de los actuadores, en este caso la letra E, en el lado izquierdo se puede comprobar que se activaron los actuadores derechos 1 y 3 (los actuadores se enumeran de arriba hacia abajo), esto con el fin de indicar que la letra que se representará será mayúscula, en el lado derecho se aprecia que se activan los actuadores izquierdo 1 y derecho 2 indicando que le letra es la E.



Fig. 15. Implementación de los actuadores para representar la letra E.

Siguiendo con la línea de las pruebas anteriores, se presentan otros dos ejemplos que los actuadores se activaban de manera adecuada según la letra que se va representando. En la Figura 16, en el lado izquierdo se puede representar la letra g mediante los actuadores izquierdos 1 y 2, además de los derechos 1 y 2, en el lado derecho se presenta la letra n mediante los actuadores de izquierdos 1 y 3, además de los derechos 1 y 2.

Observando los resultados de la Tabla 5 se puede analizar cómo es que procede el sistema al momento de realizar las pruebas, el comportamiento que se puede observar es que, en los textos pequeños los actuadores se desempeñaban de manera adecuada y que los errores que se localizaban eran en el OCR ya que ir lo reconoce como w, sin embargo, los actuadores representaban dicha letra, de manera similar con la letra u que era reconocida como letra v, la cual se mostraba en los actuadores, es importante denotar que las textos usados para las pruebas y sus resultados involucran el uso del abecedario en minúsculas, mayúsculas y en tamaño de letras distinto.

En el caso de las siguientes pruebas, se procedió a la cuantificación de la totalidad de palabras presentes en el texto sujeto a reconocimiento. Posteriormente, se llevó a cabo una evaluación manual de las palabras identificadas por el sistema, otorgando un énfasis particular a aquellas asociadas con las acciones de los actuadores. Seguidamente, se registraron los errores inherentes a los actuadores, así como el tiempo global requerido para la presentación completa del texto.

TABLA 5. TABLA DE RESULTADOS DE PRUEBAS.

No. De Prueba	Palabras totales	Palabras reconocidas	Palabras en Actuadores	Velocidad	Observaciones
1	13	12	11	Principiante	<i>ir</i> reconocido como <i>w</i>
2	13	13	13	Principiante	<i>ir</i> reconocido como <i>w</i> , la letra <i>u</i> como <i>w</i>
3	6	5	6	Principiante	
4	6	6	6	Intermedio	
5	6	6	6	Avanzado	Una vez que se seleccionó la velocidad no cambiarla
6	196	159	159	Intermedio	Al contener muchas palabras los actuadores se llegan a trabar por calentamiento
7	98	53	53	Personalizada	
8	13	15	15	Intermedio	Por falta de iluminación el sistema agrego palabras
9	6	5	5	Intermedio	La letra <i>r</i> la confunde con <i>t</i>
10	8	7	7	Principiante	Cuando el texto se encuentra en un cambio de fondo, no se logra reconocer
11	6	5	5	Avanzado	Cuando el fondo cambia, el texto reconocido es el encuentra en el espacio blanco
12	81	77	77	Personalizada	El fondo debe de ser de un solo color, además los actuadores se llegan a sobrecalentar al interpretar mucho texto
13	166	157	157	Avanzada	La letra <i>n</i> no se logra a reconocer, además que la página tenía una mancha lo que dificulto la detección, además al ser una cantidad de letras mayor, los actuadores se calientan
14	68	7	7	Intermedio	No se recomienda el uso de fondo color negro, o general oscuros



Fig. 16. Implementación de los actuadores para representar las letras g y n.

Es relevante señalar que el texto utilizado en esta ocasión se caracterizó por las siguientes especificaciones:

- Tipo de texto: Impreso.
- Fuente: Arial.
- Tamaño de fuente: 13.
- Iluminación: Desactivada.

Considerando lo anterior, la Tabla 6 corresponde a una prueba con 23 palabras impresas en una hoja de papel, donde se obtiene un error absoluto de 3.22 palabras reconocidas y 3.26 palabras traducidas, así mismo el error relativo fue 16% y la efectividad del 84%.

Posteriormente, se llevan a cabo otro conjunto de pruebas idénticas; no obstante, en este caso se trata de un tipo diferente de texto, específicamente, texto manuscrito. Por lo tanto, el contenido utilizado en esta instancia se caracteriza por las siguientes especificaciones:

- Tipo de texto: Manuscrito.
- Iluminación: Desactivada.

En la Tabla 7 se pueden observar los mismos tipos de datos que estaban presentes en la tabla anterior, no obstante, en este escenario, los valores varían en función de los resultados obtenidos con el texto manuscrito. Uno de los datos más destacados que experimenta cambios es la eficacia, superando el umbral del 90%. En términos generales, el sistema opera de manera satisfactoria cuando se trata de un texto manuscrito. Es pertinente señalar que de las pruebas realizadas el error absoluto fue de 0.55 tanto para las palabras reconocidas como para las traducidas, el error relativo fue del 6% para ambos casos y la efectividad fue del 94%.

TABLA 6. PRUEBAS DE FIABILIDAD (IMPRESO).

No. De Prueba	Palabras Reconocidas	Palabras Traducidas	Velocidad	Tiempo total
1	23	21	Principiante	05:40
2	15	15	Intermedio	02:31
3	10	10	Avanzado	01:27
4	22	21	Personalizada	07:04
5	17	17	Avanzado	02:29
6	23	23	Intermedio	04:16
7	22	21	Personalizada	04:11
8	20	17	Personalizada	05:57
9	20	20	Intermedio	04:25
10	23	23	Principiante	03:10
11	13	13	Principiante	02:53
12	17	17	Avanzada	02:31
13	23	23	Avanzada	02:20
14	23	23	Intermedio	04:04
15	23	23	Personalizada	04:20
16	17	17	Principiante	04:51
17	23	23	Intermedio	04:15
18	23	23	Avanzada	02:33
19	23	23	Personalizada	07:16
20	23	23	Avanzada	02:34
Promedio	20.15	19.8		

TABLA 7. PRUEBAS DE FIABILIDAD (MANUSCRITO).

No. de Prueba	Palabras Reconocidas	Palabras Traducidas	Velocidad	Tiempo total
1	10	10	Principiante	2.24
2	10	10	Intermedio	01:48
3	10	10	Avanzado	01:14
4	9	9	Personalizada	03:26
5	9	9	Avanzado	01:15
6	10	10	Intermedio	01:50
7	10	10	Principiante	02:46
8	10	10	Principiante	02:27
9	10	10	Intermedio	01:56
10	10	10	Intermedio	01:52
11	9	9	Intermedio	02:02
12	10	10	Avanzado	01:18
13	10	10	Avanzado	01:25
14	10	10	Avanzado	01:14
15	10	10	Intermedio	01:52
16	10	10	Principiante	02:30
17	11	11	Personalizada	01:38
18	10	10	Personalizada	01:33
19	9	9	Personalizada	01:48
20	7	7	Avanzado	01:09
Promedio	9.7000	9.7000		

VI. CONCLUSIONES

Al evaluar el desarrollo y ejecución del sistema se destaca que se han alcanzado de manera exitosa los objetivos propuestos al inicio del documento. La planificación y la ejecución de cada fase del proyecto han culminado en un sistema que funciona de acuerdo con las expectativas planteadas, brindando soluciones efectivas y accesibles para la comunidad de personas con discapacidad visual y a la comunidad educativa buscando enseñar el lenguaje Braille.

Cabe destacar que gracias a la evaluación de los resultados y su posterior análisis es posible destacar algunas recomendaciones de uso que facilitan el uso del sistema de traducción Braille, esto con el propósito de mejorar la experiencia de usuario final y hacer una experiencia más amena al momento de usar el prototipo, entre las recomendaciones se encuentran las siguientes:

- Evitar el uso de papeles reflectores de luz como la opalina.
- No usar letras impresas de menor tamaño de Arial 13.
- Si se quiere usar letra manuscrita que sea legible y de un tamaño superior al que se encontrarla con un tamaño 16.
- Se recomienda usar palabras completas en lugar de letras solas.
- Usar la iluminación incluida solo en espacios con poca visibilidad.
- Evitar el uso de imágenes.
- Evitar el uso de letras seguidas de números.
- Evitar el uso de acentos y diéresis.
- Evitar el uso de hojas dañadas o arrugadas.
- Esperar un aproximado de 5 segundos luego de iniciar la imagen de la cámara para esperar a que enfoque adecuadamente.

A. Trabajo a futuro

- Colaborar con expertos en Braille y en tecnologías de traducción para mejorar y perfeccionar los métodos de traducción de textos impresos a Braille.
- Desarrollar una plataforma en línea fácil de usar que permita a los usuarios cargar sus textos y recibir versiones Braille de manera rápida y precisa.
- Integrar tecnologías avanzadas, como inteligencia artificial y aprendizaje automático, para mejorar la precisión y velocidad de la traducción.
- Ofrecer el servicio de traducción a escuelas y universidades como parte de un programa de responsabilidad social corporativa.
- Asegurarse de que la plataforma pueda manejar diferentes formatos de entrada, como documentos de texto, archivos PDF, imágenes escaneadas, etc.
- Garantizar que la plataforma sea accesible para personas con discapacidades visuales y otras discapacidades, utilizando tecnologías compatibles con lectores de pantalla y otras ayudas.
- Implementar un sistema de retroalimentación para que los usuarios proporcionen comentarios sobre la calidad de las traducciones.
- Utilizar la retroalimentación para realizar mejoras continuas en la plataforma y en los algoritmos de traducción.
- Implementar un subsistema de botones físicos amigables con las personas con problemas visuales que permitan manipular la interfaz de usuario.
- Implementación de caracteres especiales en español como el uso de la ñ.
- Inclusión de los números en la creación de los símbolos Braille.
- Inclusión de sistema de aislamiento entre niveles.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Contribuciones de los autores: Conceptualización: **UHG, FMD**; Metodología: **JDP, JLP**; Software: **JDP, JLP, RCL**; Investigación: **JDP, JLP**; Redacción y preparación del borrador original: **UHG, FMD, RCL**; Redacción, revisión y edición: **UHG, FMD, RCL**; Supervisión: **UHG, FMD**; Análisis formal: **UHG, FMD**; Administración del proyecto: **UHG, FMD**; Adquisición de fondos: **UHG, FMD**.

Financiamiento: Los autores declaran que parte del proyecto se financió gracias a los proyectos SIP 20232077, 20231856 y 20232747.

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos se encuentran en el artículo.

Agradecimientos: Los autores agradecen al IPN y SIP por los apoyos otorgados

Conflicto de interés: Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] N. A. B. Alemán, L. M. Cordero, C. A. F. Salinas, Enseñanza-aprendizaje del sistema braille en el estado de Hidalgo, *Huella de la Palabra*, no. 1, 2006. <https://doi.org/10.37646/huella.vi1.462>
- [2] J. H. Carvajal Rojas, et al., "Diseño mecatrónico y desarrollo de prototipo de máquina reprogramable y flexible para dibujo en 2D," *ITECKNE*, vol. 7, no. 2, 2010. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v7i2.2718>
- [3] J. H. Carvajal Rojas, C. M. Vega Arévalo, J. P. Téllez Garay, "Diseño mecatrónico de robot móvil para transporte de carga en superficies irregulares," *ITECKNE*, 2010. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v7i1.2705>
- [4] Cámara de Diputados/ LXV Legislatura, "Declaran el 15 de octubre día nacional de las personas ciegas y con otras discapacidades visuales," *Boletín núm. 4254*, 2020.
- [5] M. S. Dutra, J. F. Archila, O. Lengerke, "Diseño Mecatrónico De Un robot tipo agv 'autonated guided vehicle'," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 7, no. 1, 2008. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/395>
- [6] J. S. Espinoza, W. C. Zaragocín, M. E. León, "Aprendizaje del sistema de lectura y escritura braille basado en las TIC," *CEDAMAZ*, vol. 12, no. 1, 2022. <https://doi.org/10.54753/cedamaz.v12i1.1268>
- [7] S. R. Ramos Gallegos, "Diseño conceptual de un desgranador y clasificador de granos de maíz amiláceo por calibre y estado de conservación," Tesis, Ingeniería Mecatrónica, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería Diseño, 2021. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/19332>
- [8] M. A. Guerrero, R. C. Esquivel, "Producción de materiales didácticos en el tema de sintaxis del español para personas con retinosis pigmentaria y ceguera total," *Revista Ensayos Pedagógicos*, vol. 8, no. 2, 2013. <https://doi.org/10.15359/rep.8-2.7>
- [9] M. E. Leyes Sánchez, H. W. Peñuela Meneses, "Diseño mecatrónico para una planta de tratamiento de aguas residuales en entornos de industrias textiles con énfasis en tintorerías," 2021: Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2021, 21-24 septiembre, Cartagena de Indias, Colombia, 2021. <https://doi.org/10.26507/ponencia.1745>
- [10] M. Ortiz Domínguez, I. Morgado González, A. Cruz Avilés, M. A. Paredes Rueda, J. A. García Macedo, R. Velázquez-Mancilla, M. A. Flores Rentería, J. Zuno Silva, J. M. Farfán García, "Diseño Mecatrónico de un Robot de Tres Grados de Libertad Aplicando la Metodología de Nigel Cross," *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, vol. 6, no. 12, 2019. <https://doi.org/10.29057/escs.v6i12.4007>
- [11] C. F. Pérez Rivera, "Prototipo de una calculadora braille para personas con discapacidad visual en la universidad técnica de ambato," B.S. thesis, Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería en Sistemas, 2016. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/24019>
- [12] A. C. González Saucedo, F. J. García Heredia, R. Ramírez Martínez, "Discapacidad visual," *Cultura Científica y Tecnológica*, no. 51, 2016. <https://revistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/954>