



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

**CAMPUS IRAPUATO - SALAMANCA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS**

**“Desarrollo de un dispositivo generativo de
caracteres para el sistema Braille”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

PRESENTA:

PAULO CÉSAR RODRÍGUEZ CUEVAS

DIRECTOR:

DR. MARIO ALBERTO IBARRA MANZANO

CODIRECTOR:

DR. OSCAR ALMANZA CONEJO

SALAMANCA, GUANAJUATO

ABRIL 2025

Agradecimientos

A mis padres, por estar siempre, en cada paso, en cada duda, en cada logro. Por su amor incondicional, su apoyo constante y su fe en mí incluso en los momentos en que yo mismo dudaba. Gracias por enseñarme con el ejemplo, por darme raíces firmes y alas para volar. Nada de esto habría sido posible sin ustedes.

De manera muy especial, agradezco al Dr. Mario Alberto Ibarra Manzano por haberme brindado la oportunidad de trabajar bajo su dirección. Gracias por su invaluable guía académica, pero sobre todo, por haber creído en mí y por la confianza que depositó en mis capacidades a lo largo de este proyecto.

Índice general

Agradecimientos	2
1. Introducción	5
1.1. Justificación	6
1.2. Hipótesis	6
1.3. Objetivos	7
1.4. Antecedentes	8
1.4.1. Tecnologías para la conversión de texto a braille	9
1.4.2. Importancia de la accesibilidad digital	9
1.5. Estructura y reglas básicas del sistema braille	10
1.5.1. Estructura de la Matriz Generadora	10
1.5.2. Combinaciones de Puntos	11
1.5.3. Signos Diacríticos	11
1.5.4. Uso de Signos Especiales	12
1.5.5. Puntuación en Braille	14
1.5.6. Ejemplo de escritura en Braille	15
2. Estado del arte	17
2.1. Introducción	17
2.2. Panorama de los dispositivos de conversión braille	18
2.3. Tecnologías de actuadores en exhibidores refrescables braille	19
2.3.1. Actuadores piezoeléctricos	19
2.3.2. Actuadores electromagnéticos	20
2.3.3. Actuación mediante discos	21

2.3.4.	Actuación de leva y palanca	22
2.3.5.	Actuación Directa con SMA y Retorno por Resorte	22
2.3.6.	Actuador de Polímero Electroactivo con Transmisión Hidráulica	23
3.	Metodología	27
3.1.	Introducción	27
3.2.	Diseño mecánico	27
3.3.	Cálculos Geométricos	29
3.4.	Modelo Matemático del Actuador Lineal	33
3.4.1.	Modelo de la Fuerza Axial Bruta (F_{axial}) por Tornillo de Potencia	33
3.4.2.	Síntesis del Modelo y Fuerza de Salida Neta	36
3.5.	Diseño electrónico	36
3.5.1.	Selección de la Plataforma de Cómputo Central	37
3.5.2.	Estrategia de Control y Multiplexación de Actuadores	39
3.5.3.	Gestión de Alimentación y Portabilidad	39
3.5.4.	Diseño de Software	39
4.	Resultados	43
4.1.	Discusión	48
4.1.1.	Cálculo del Factor de Seguridad (FoS)	48
5.	Conclusiones	52
	Bibliografía	54

Capítulo 1

Introducción

En el mundo contemporáneo, el acceso a la información y al contenido digital permite a las personas su correcto desarrollo en el ámbito social, académico y profesional. Sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos, quienes sufren de discapacidad visual siguen enfrentando dificultades para interactuar con los entornos digitales. Esto se debe a que las herramientas actuales como dispositivos de conversión de texto digital en tiempo real son escasas o demasiado costosas para que las personas con ingresos promedio puedan adquirirlas.

El uso de estas herramientas es fundamental para que una persona con debilidad visual severa pueda leer textos y documentos de manera autónoma, ya sean impresos o electrónicos. En años recientes, la cantidad de información que se transmite a través de medios digitales incrementó de manera considerable, por lo cual es de suma importancia proponer soluciones que resuelvan problemáticas para reducir la brecha en la falta de inclusión.

En la actualidad, se han propuesto diversas soluciones que permiten a las personas con discapacidad visual acceder a contenido digital, tales como el software de accesibilidad integrado en los teléfonos inteligentes y en las computadoras, los cuales permiten leer la pantalla transformando los textos en voz. Sin embargo, esta alternativa requiere del correcto funcionamiento del hardware de audio del equipo y supone una pérdida de privacidad para el usuario es decir que en casos en los que se usa audio otras personas ajenas al usuario también tienen acceso al contenido que se está consumiendo de forma directa o indirecta.

Por otro lado, los dispositivos de hardware que permiten convertir el texto digital a Braille de forma física representan una alternativa que puede resultar costosa para una persona promedio. En el mercado existen diversos productos, tales como el *Orbit Reader 20*[33], con un precio que ronda los 14,000 MXN, y dispositivos como el *Focus 14 Blue*[22], con un precio que supera los 25,000 MXN. El costo de estos dispositivos significa una brecha en el acceso a la tecnología de las personas en el contexto latinoamericano.

1.1. Justificación

Es necesario proponer soluciones tecnológicas en los dispositivos de conversión del texto digital al braille que permitan reducir la brecha existente entre las personas, tanto en la falta al acceso en la información como en la adquisición de dispositivos de conversión asequibles, abonando de paso al cumplimiento del punto 10 de la Agenda 2030 propuesta por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) por sus siglas en inglés, el cual se centra en la reducción de las desigualdades.

En el contexto del mundo globalizado, el acceso a la información ha tomado un papel relevante en la vida cotidiana de las personas, así como también se ha convertido en un derecho universal por diversos ordenamientos internacionales como lo son: la Declaración Universal de Derechos Humanos, la Declaración Americana de Derechos y Deberes del Hombre, el Pacto Internacional de Derechos Civiles y Políticos, y la Convención Americana de Derechos Humanos, entre otros. Por lo que es de vital importancia proponer soluciones que permitan reducir la brecha que hay entre las personas, además de proponer una solución que a diferencia del uso de programas de conversión de voz permitan una integración a la cotidianidad evitando el entorpecimiento del sentido auditivo que permita el desenvolvimiento de los usuarios en espacios públicos.

1.2. Hipótesis

Es técnicamente posible desarrollar un dispositivo de conversión de texto digital a braille que sea capaz de interpretar archivos de texto y generar sus homólogos

en braille mediante la activación de actuadores lineales de índole hidráulico y que además mantenga un costo asequible.

Hipótesis específicas

- La integración de un microprocesador Cortex con módulos de almacenamiento y software de procesamiento permitirá la interpretación y segmentación del texto digital en caracteres braille.
- La utilización de actuadores lineales miniaturizados, correctamente calibrados, permitirá la representación física de los seis puntos braille.
- La elección de los materiales permitirá la construcción de un dispositivo asequible que permita una mejora en los precios de venta de dispositivos similares en el mercado.

1.3. Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un dispositivo de bajo costo y portable que permita convertir texto en formato digital al sistema de escritura braille, con la finalidad de proporcionar una herramienta asequible para personas con discapacidad visual.

Objetivos Particulares

- Desarrollar una arquitectura que permita la conversión de texto digital a braille, considerando los componentes electrónicos y/o mecánicos que permitan la representación de los caracteres en formato cecográfico.
- Implementar un algoritmo que permita la transformación de texto digital a caracteres del alfabeto Braille.
- Implementar un sistema de comunicación entre las fuentes digitales de texto y el sistema generador de caracteres Braille.

- Validar el desempeño del dispositivo comparando las características del prototipo con las características de los dispositivos similares que se encuentran en el mercado, basándonos en las cualidades conocidas de los mismos, es decir, en las especificaciones mostradas en sus sitios de venta o reveladas de forma oficial por los fabricantes.

1.4. Antecedentes

El acceso a la lectura para las personas con discapacidad visual ha sido un desafío a lo largo de la historia. Con el paso del tiempo, se han desarrollado diversas soluciones, como pueden ser letras con relieve, sistemas de escritura especiales, tecnologías de lectura de texto o pantallas refrescables, para abordar esta problemática, con el objetivo de integrar a las personas invidentes en su vida cotidiana.

Antes del desarrollo del sistema de lectoescritura Braille, los métodos de enseñanza para personas con debilidad sexual se basaban principalmente en la memorización oral. Fue hasta que Valentin Haüy planteó un método de escritura en relieve, en el que las letras del alfabeto latino se grababan sobre hojas de papel grueso, permitiendo que las personas invidentes pudieran leer mediante el tacto. Posteriormente, Charles Barbier de la Serre diseñó un sistema de escritura conocido como escritura nocturna, concebido para que los oficiales franceses pudieran escribir sin necesidad de luz. Este método, basado en un sistema de puntos en relieve escritos con un lápiz tipo buril, podía ser leído con la punta de los dedos. Años más tarde, este sistema serviría como base para la creación del método de lectoescritura Braille.

A mediados del siglo XIX, el francés Louis Braille (1809-1852) desarrolló un sistema de lectura y escritura táctil diseñado específicamente para personas invidentes, también conocido como cecografía. Inspirado en la escritura nocturna de Barbier, Braille reinventó el sistema inicial, empleando en un principio un código de ocho puntos, que luego simplificó a un sistema de seis puntos, facilitando así su aprendizaje y uso. Este método revolucionó la educación y la accesibilidad para las personas con discapacidad visual, consolidándose como el estándar de lectoescritura táctil que conocemos hoy en día.

1.4.1. Tecnologías para la conversión de texto a braille

Con el avance de la tecnología, se han desarrollado diversas soluciones para adaptar los medios digitales a las personas con discapacidad visual. Estas soluciones pueden dividirse en dos categorías principales: software y hardware.

Dentro del ámbito del software, existen adaptaciones integradas en dispositivos como computadoras y teléfonos inteligentes, las cuales permiten a los usuarios navegar mediante gestos táctiles e ingresar texto a través de un teclado en pantalla. Además, muchas de estas herramientas incluyen la capacidad de leer en voz alta el contenido mostrado, utilizando la salida de audio del dispositivo.

Asimismo, existen programas especializados como JAWS Job Access With Speech y NVDA NonVisual Desktop Access por sus siglas en inglés, que han permitido la reproducción de información digital mediante síntesis de voz y pantallas braille, facilitando así la interacción de las personas con discapacidad visual con entornos digitales.

En cuanto al hardware, destacan las pantallas braille, que permiten la visualización de caracteres en tiempo real, representando un avance significativo en la accesibilidad al contenido digital. Actualmente, en el mercado se pueden encontrar dispositivos como el Orbit Reader 20 [33], con un precio aproximado de 14,000 MXN, y el Focus 14 Blue [22], cuyo costo supera los 25,000 MXN.

Si bien estos dispositivos ofrecen una solución innovadora para mejorar la accesibilidad digital, su alto costo de adquisición sigue siendo una barrera significativa, especialmente en el contexto latinoamericano, donde el acceso a este tipo de tecnologías es aún más limitado.

1.4.2. Importancia de la accesibilidad digital

La digitalización de la información ha transformado la manera en que las personas acceden al conocimiento. Para la comunidad con discapacidad visual, la posibilidad de acceder a textos en tiempo real mediante dispositivos electrónicos representa una mejora significativa en su calidad de vida. Sin embargo, la brecha tecnológica sigue siendo una barrera para muchos usuarios, especialmente en regiones donde los dispositivos accesibles no están disponibles o son económicamente inviables.

El desarrollo de tecnologías de bajo costo y alto rendimiento para la conversión de texto digital a Braille es crucial para garantizar la inclusión de personas con discapacidad visual en la educación, el trabajo y la vida cotidiana. Dispositivos que permitan la conversión en tiempo real de texto digital a braille pueden representar una solución innovadora y accesible para cerrar esta brecha tecnológica. La necesidad de un dispositivo funcional y accesible se convierte en un punto clave en el desarrollo de tecnologías inclusivas, permitiendo una mayor autonomía e independencia para las personas con discapacidad visual.

1.5. Estructura y reglas básicas del sistema braille

El sistema Braille es un método táctil de lectura y escritura diseñado para personas con discapacidad visual. Este sistema se basa en caracteres formados por puntos en relieve, dispuestos en una matriz de 3 filas por 2 columnas conocida como *signo generador*. Este signo generador no sólo define la disposición espacial de los puntos en relieve, sino que también permite a los usuarios identificar de manera precisa cada carácter.

Dado que el Braille está diseñado para optimizar el espacio, algunos símbolos pueden resultar visualmente similares. Por ejemplo, la letra “a” y el número “1”, o la letra “a” y signos de puntuación como el punto o la coma, se distinguen únicamente por la posición de los puntos o por un marcador distintivo. Esto subraya la importancia de la ubicación precisa de los relieves dentro de la matriz generadora para garantizar la correcta interpretación del sistema.

1.5.1. Estructura de la Matriz Generadora

Los puntos en la matriz generadora como se muestra en la fig. 1.1 están enumerados según su posición: **1, 2, 3** (en la columna izquierda) y **4, 5, 6** (en la columna derecha). Esta numeración es clave para identificar la posición específica de los puntos que forman cada carácter y evitar confusiones durante la lectura.

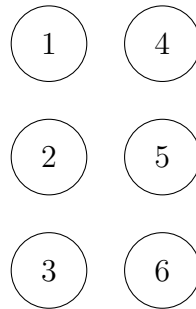


Figura 1.1: Matriz generadora

1.5.2. Combinaciones de Puntos

En el sistema braille cada carácter se forma mediante una combinación específica de puntos activados dentro de la matriz generadora. como se muestra en la tabla 1.1.

El alfabeto Braille en español incluye caracteres especiales compartidos con otros idiomas derivados de lenguas romances, como el francés, el portugués y el italiano. Además, comparte letras comunes del alfabeto latino, como en inglés, pero también incorpora caracteres propios del idioma español, como la letra “ñ” y las vocales con tilde o diéresis, cabe resaltar que las reglas del braille en español difieren a las utilizadas en otros idiomas al igual que su homólogo escrito así que de igual forma que las reglas ortográficas y sintácticas de otros idiomas pueden ser distintos en cuanto a la posición de los puntos , el sentido de la escritura o la forma en la que se escriben las palabras.

1.5.3. Signos Diacríticos

Según la Real Academia Española, los signos diacríticos son aquellos que inciden sobre un grafema para indicar un rasgo o valor distintivo. En español, los únicos signos diacríticos vigentes son la tilde y la diéresis. En Braille, se representan en el la tabla 1.2

a	b	c	d	e	f
● 1 ○ 4	● 1 ○ 4	● 1 ● 4	● 1 ● 4	● 1 ○ 4	● 1 ● 4
○ 2 ○ 5	● 2 ○ 5	○ 2 ○ 5	○ 2 ● 5	○ 2 ● 5	● 2 ○ 5
○ 3 ○ 6	○ 3 ○ 6	○ 3 ○ 6	○ 3 ○ 6	○ 3 ○ 6	○ 3 ○ 6
g	h	i	j	k	l
● 1 ● 4	● 1 ○ 4	○ 1 ● 4	○ 1 ● 4	● 1 ○ 4	● 1 ○ 4
● 2 ● 5	● 2 ● 5	● 2 ○ 5	● 2 ● 5	○ 2 ○ 5	● 2 ○ 5
○ 3 ○ 6	○ 3 ○ 6	○ 3 ○ 6	○ 3 ○ 6	● 3 ○ 6	● 3 ○ 6
m	n	ñ	o	p	q
● 1 ● 4	● 1 ● 4	● 1 ● 4	● 1 ○ 4	● 1 ● 4	● 1 ● 4
○ 2 ○ 5	○ 2 ● 5	● 2 ● 5	○ 2 ● 5	● 2 ○ 5	● 2 ● 5
● 3 ○ 6	● 3 ○ 6	○ 3 ● 6	● 3 ○ 6	● 3 ○ 6	● 3 ○ 6
r	s	t	u	v	w
● 1 ○ 4	○ 1 ● 4	○ 1 ● 4	● 1 ○ 4	● 1 ○ 4	○ 1 ● 4
● 2 ● 5	● 2 ○ 5	● 2 ● 5	○ 2 ○ 5	● 2 ○ 5	● 2 ● 5
● 3 ○ 6	● 3 ○ 6	● 3 ○ 6	● 3 ● 6	● 3 ● 6	○ 3 ● 6
x	y	z			
● 1 ● 4	● 1 ● 4	● 1 ○ 4			
○ 2 ○ 5	○ 2 ● 5	○ 2 ● 5			
● 3 ● 6	● 3 ● 6	● 3 ● 6			

Tabla 1.1: Combinaciones de letras y sus representaciones en Braille (a-z).

1.5.4. Uso de Signos Especiales

Prefijo Numeral

En Braille, se utiliza un prefijo especial como se muestra en la tabla 1.3 para indicar números. Este prefijo antecede a los caracteres correspondientes a las primeras nueve letras del alfabeto, permitiendo distinguir números de letras. Cuando se incluye este prefijo, se sobreentiende que los caracteres subsiguientes son números, hasta que

á	é	í	ó	ú	ü
● 1 ○ 4	○ 1 ● 4	○ 1 ● 4	○ 1 ● 4	○ 1 ● 4	● 1 ○ 4
● 2 ● 5	● 2 ○ 5	○ 2 ○ 5	○ 2 ○ 5	● 2 ● 5	● 2 ● 5
● 3 ● 6	● 3 ● 6	● 3 ○ 6	● 3 ● 6	● 3 ● 6	○ 3 ● 6

Tabla 1.2: Signos diacríticos y sus representaciones en Braille

se indique lo contrario es decir mientras no se interrumpa la secuencia (por un espacio, un signo de puntuación o un cambio de nivel tipográfico), entonces se interpreta todo como un número. Esto facilita la escritura de números de más de un dígito. En la tabla 1.4 se aprecian los dígitos representados en braille.

#
○ 1 ● 4
○ 2 ● 5
● 3 ● 6

Tabla 1.3: Representación en Braille del prefijo numeral.

1	2	3	4	5
○ ● ● ○	○ ● ● ○	○ ● ● ●	○ ● ● ●	○ ● ● ○
○ ● ○ ○	○ ● ● ○	○ ● ○ ○	○ ● ○ ●	○ ● ○ ●
● ● ○ ○	● ● ○ ○	● ● ○ ○	● ● ○ ○	● ● ○ ○
6	7	8	9	0
○ ● ● ●	○ ● ● ●	○ ● ● ○	○ ● ○ ●	○ ● ○ ●
○ ● ● ○	○ ● ● ●	○ ● ● ●	○ ● ● ○	○ ● ● ●
● ● ○ ○	● ● ○ ○	● ● ○ ○	● ● ○ ○	● ● ○ ○

Tabla 1.4: Números braille.

Signo de Mayúsculas

De manera similar, un prefijo especial indica el uso de mayúsculas. Este prefijo señala que el carácter siguiente será una letra en mayúscula. Cabe destacar que, en Braille, sólo la primera letra de una palabra se escribe en mayúscula, incluso en

siglas. En la tabla 1.5 se pueden observar algunos ejemplos que representan letras mayúsculas representadas en braille.

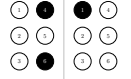
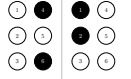
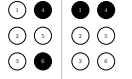
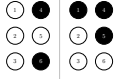
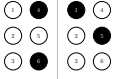
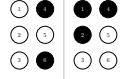
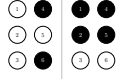
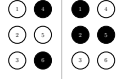
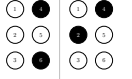
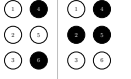
A	B	C	D	E
				
F	G	H	I	J
				

Tabla 1.5: Mayúsculas en braille

1.5.5. Puntuación en Braille

El sistema Braille en español también incluye caracteres especiales para signos de puntuación como comas, puntos, signos de exclamación e interrogación, comillas y paréntesis como se muestra en la tabla 1.6.

- En el caso de los signos dobles (comillas, signos de exclamación e interrogación), se repite el signo al inicio y al final de la frase es decir se repite el signo de apertura al final de la frase.
- Para los paréntesis, se utilizan dos signos distintos, manteniendo una similitud con sus equivalentes escritos.

En el siguiente apartado, se presentan ejemplos de cada signo. Dentro del sistema

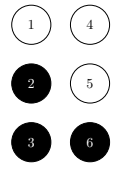
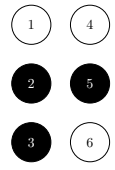
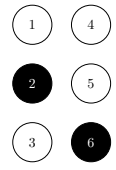
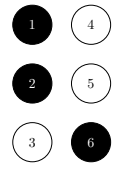
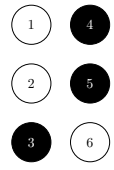
...	!?	!	()
				

Tabla 1.6: Representaciones en Braille de signos especiales

de escritura del braille también se cuentan con homólogos para los signos de guión medio, dos puntos, punto, coma y punto y coma , y sus representaciones se dan de la siguiente manera como se observa en la tabla 1.7:

:	,	-	;	.
⠠⠠	⠠⠠	⠠⠠	⠠⠠	⠠⠠
⠠⠠	⠠⠠	⠠⠠	⠠⠠	⠠⠠
⠠⠠	⠠⠠	⠠⠠	⠠⠠	⠠⠠

Tabla 1.7: Representaciones en Braille de los signos de puntuación

1.5.6. Ejemplo de escritura en Braille

A continuación, se presentan algunos ejemplos de palabras escritas en Braille.

Hola									
⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠
⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠
⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠

Tabla 1.8: Palabra: Hola

Mundo											
⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠
⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠
⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠

Tabla 1.9: Palabra: Mundo

Éxito											
⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠
⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠
⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠	⠠

Tabla 1.10: Palabra: Éxito

Braille															
1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4
2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5
3	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6

Tabla 1.11: Palabra: Braille

Aprendizaje																			
1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4
2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5
3	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6

Tabla 1.12: Palabra: Aprendizaje.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Introducción

La proliferación del contenido digital en los últimos años ha impulsado el desarrollo de dispositivos que permitan a las personas con discapacidad visual acceder a textos en formato braille de manera portátil y en tiempo real. Estos dispositivos se caracterizan por contener una pantalla actualizable y un sistema que permite la traducción de documentos al formato cecográfico desde una fuente digital, tales como computadoras, teléfonos inteligentes, documentos digitales, etc. Ofrecen una solución al problema de la accesibilidad debido a la importancia que tiene el sistema braille en la alfabetización, autonomía e integración de las personas con discapacidad visual en la sociedad.

En los últimos años se han desarrollado trabajos en diversos mecanismos novedosos enfocados en la usabilidad de los dispositivos (portabilidad, velocidad de escritura, costo de producción). En esta sección, analizaremos diversos mecanismos propuestos previamente en la literatura, tales como mecanismos electromecánicos, electromagnéticos, hidráulicos y neumáticos, a fin de establecer una comparativa entre ellos y esta propuesta.

2.2. Panorama de los dispositivos de conversión braille

La mayoría de las pantallas braille actualizables que se encuentran en el mercado constan de un display que, de manera tradicional, se compone de una fila de celdas braille que utilizan mecanismos piezoeléctricos. Además, pueden variar en la cantidad de caracteres que pueden mostrar en pantalla a la vez, dependiendo de la marca y/o modelo del mismo. También varían en funcionalidades, puesto que algunas de ellas permiten conectarse a una computadora o teléfonos para acceder al texto digital. Asimismo, el formato en el que se encuentran ubicadas las celdas presenta una limitación en cuanto a la cantidad de bloques de texto que se pueden leer, así como en la presentación de gráficos en pantalla tales como diagramas o imágenes las cuales encuentran su representación en forma de contornos. Esto afecta de manera directa la velocidad de lectura.

En las últimas décadas han surgido diversos proyectos que pretenden dar solución a las problemáticas de los dispositivos tradicionales de conversión de texto digital, tales como el precio o el límite en la cantidad de líneas que se pueden mostrar en el exhibidor. Un ejemplo claro de esto es el dispositivo desarrollado por la empresa Blitab en Austria[25], que desarrolló una tableta braille que emplea tecnología de microfluidos para mostrar hasta 14 líneas de texto braille a la vez. También es el caso del dispositivo Canute360[14], el cual fue el primer dispositivo de braille multilínea en el mercado haciendo uso de un sistema mecánico para la generación de caracteres. Dichos dispositivos aportan avances significativos en el enfoque de lectura multilínea; sin embargo, aún no solucionan el problema de asequibilidad económica para el usuario promedio.

En cuanto a los avances de portabilidad, destacan dispositivos tales como el Dot Watch[21], el cual consta de una pantalla braille de 4 celdas que se refrescan para mostrar la hora, notificaciones y otros datos provenientes de un teléfono inteligente vinculado al dispositivo. Este dispositivo hace uso de un sistema electromagnético que permite el control de cada punto. Otro ejemplo de portabilidad máxima es la patente [34], que describe un dispositivo en forma de dedal que permite no sólo la generación de relieve braille, sino también el escaneo de textos impresos gracias a la

incorporación de un sistema óptico.

A continuación, se presentan las principales tecnologías, enfocándonos en el uso del tipo de actuadores lineales, comparando sus ventajas, desventajas y estado de desarrollo, haciendo un énfasis en la accesibilidad y usabilidad de las mismas.

Para analizar de manera sistemática el estado del arte de las alternativas en los exhibidores actualizables y su posterior comparación con nuestra propuesta, es útil clasificarlas en familias tecnológicas basadas en su principio de funcionamiento fundamental. Este informe se centrará en las siguientes categorías:

- **Mecanismos Rotativos:** Dispositivos que utilizan la rotación de componentes como discos, ruedas o tambores para seleccionar y presentar patrones de puntos Braille.
- **Mecanismos de Transmisión Directa:** Sistemas que convierten el movimiento de un actuador (generalmente un motor) en un desplazamiento lineal del pin a través de componentes como levas, palancas o tornillos.
- **Actuadores Basados en Materiales Inteligentes:** Mecanismos que emplean materiales que cambian de forma en respuesta a un estímulo, principalmente Aleaciones con Memoria de Forma (SMA) por sus siglas en inglés.
- **Sistemas Basados en Fluidos:** Dispositivos que utilizan la presión de un gas (neumática) o un líquido (hidráulica) para transmitir la fuerza y actuar sobre los pines.

2.3. Tecnologías de actuadores en exhibidores refrescables braille

2.3.1. Actuadores piezoeléctricos

El actuador lineal más utilizado en el estado del arte es el actuador piezoeléctrico, el cual comúnmente está conformado por un conjunto de actuadores bimorfos dispuestos como una pila escalonada de pilas en voladizo. Estas pilas soportan un vástago o pin vertical en su extremo. Cuando se aplica un voltaje de 200 V de DC,

la deformación provoca un movimiento vertical que eleva el punto para pasar el pin a través de una abertura en la pantalla [37].

Dentro de las ventajas que tiene este sistema propuesto, es que posee tasas de actualización altas, bajo consumo de energía en contraste con las tecnologías que usan solenoides, admite el uso de baterías y provee una solución silenciosa y portable. Además, es posible añadir más puntos debido a su tamaño[30]. Dentro de las limitaciones que posee este enfoque está el costo por celda, ya que los costos pueden llegar a ser de entre 25 y 150 dólares por celda, lo que lo puede dificultar su asequibilidad para algunos usuarios. Otro problema que se presenta con los actuadores piezoeléctricos es que la presión ejercida por el dedo del usuario puede hacer que el punto disminuya su elevación, lo que podría comprometer la sensibilidad táctil de la lectura, así como también la comodidad en la misma [23].

Precisamente para solventar esta debilidad, nuestra propuesta se distingue por su actuador de naturaleza híbrida mecánica-hidráulica. Este sistema genera un enclave pasivo que anula por completo el retroceso del punto ante la presión del usuario. Dicho bloqueo se consigue gracias a la sinergia entre la fricción inherente de un mecanismo de tornillo sin fin y la resistencia que opone un fluido incompresible, actuando en conjunto como un tope físico y resolviendo de manera efectiva la problemática anteriormente descrita.

2.3.2. Actuadores electromagnéticos

El enfoque clásico de los dispositivos que utilizan este tipo de actuadores es el uso de solenoides de accionamiento directo. Bajo este principio se pueden extrapolar también otras tecnologías que hacen uso de electroimanes para generar el movimiento lineal de los vástagos para la generación de los puntos de braille.

Un ejemplo resaltable es el prototipo unicelda desarrollado por Bettelani et al [13]. El cual es un mecanismo híbrido que mezcla elementos mecánicos y electromagnéticos. Consta de un resorte que está acoplado a un pin que genera el punto braille y un solenoide que, al aplicársele una corriente eléctrica, genera un campo magnético que produce una fuerza, la cual provoca el movimiento de un émbolo que comprime el resorte y eleva el pin. Cuando se desenergiza, el solenoide regresa a su estado de reposo [13]. Dentro de las desventajas que poseen la mayoría de los

dispositivos que dependen de los actuadores lineales electromagnéticos, está el consumo constante de energía para mantener energizadas las bobinas responsables de la activación de los puntos. Este constante requerimiento de corriente se manifiesta en un consumo de energía mayor con respecto a otro tipo de soluciones como nuestra propuesta híbrida o el uso de piezoeléctricos. Además, el gasto de corriente puede traducirse también en la presencia de calentamiento en los actuadores [28].

Nuestra propuesta híbrida, en cambio, está diseñada para ser pasiva en su retención, atacando así el principal inconveniente de los sistemas electromagnéticos: el consumo constante de energía. El diseño específico de su actuador lineal utiliza la fricción de la pieza móvil y la fuerza del líquido para impedir el retroceso del pin sin necesidad de mantener un flujo de corriente. Como resultado, el gasto energético para el mantenimiento del estado activo es prácticamente nulo, aunque esta ventaja en eficiencia implica una velocidad de actualización inferior a la de las tecnologías piezoeléctrica y electromagnética.

2.3.3. Actuación mediante discos

La patente US6776619 propone un dispositivo cuyo funcionamiento consiste en una rueda o tambor que gira. Dicha rueda contiene filas de pines incrustados que pueden moverse libremente; un conjunto de actuadores configura la posición de los pines de cada fila, formando los caracteres [8]. Dentro de las ventajas que puede proveer este enfoque, se encuentra la capacidad de representar un conjunto amplio de caracteres con una cantidad reducida de actuadores, lo que podría reducir los costos de fabricación [31]. Sin embargo, consta de desventajas tales como la complejidad de sincronización de los actuadores para la generación de los caracteres, debido a que es necesario coordinar los giros de tal manera que cada rueda deba girar con precisión para formar los caracteres [17].

Para evitar esta complejidad de sincronización, nuestra propuesta híbrida adopta un enfoque radicalmente distinto: en lugar de un control grupal y coordinado, cada punto se gestiona de forma independiente. Esta arquitectura no sólo simplifica la lógica de control, sino que también confiere una mayor robustez al sistema, ya que un fallo potencial en un punto no afecta al resto de los caracteres.

2.3.4. Actuación de leva y palanca

Este modelo, basado en la patente [26], está compuesto por pequeños motores que contienen una leva montada en su centro. Dichos motores se encuentran dispuestos dentro de una carcasa que contiene topes mecánicos que limitan la rotación de la leva. Dicha disposición contribuye a que estos actuadores posean un comportamiento binario. Gracias a un seguidor de leva integrado en una palanca flexible que sigue el perfil de la leva, cuando esta gira a su posición alta, se genera un empuje que eleva el punto de braille. Cuando pasa a su posición baja, la palanca vuelve a su estado de reposo gracias a la flexibilidad del material [27]. En cuanto a su mejor cualidad, se puede decir que es un mecanismo de bajo coste de fabricación, debido a que su diseño permite integrar la palanca, el seguidor y el retorno en una única pieza impresa en 3D. Aunque consta de desventajas relacionadas con la durabilidad del material, ya que la palanca está sujeta a la fatiga mecánica y con el tiempo podría llevar a la pérdida de la fuerza de retorno. También podría resaltarse que la fuerza de elevación del pin depende mucho de la rigidez de la palanca y la fuerza de retención del motor.

En contraste con un diseño que depende de la flexibilidad y resistencia a la fatiga de un material, nuestra propuesta prioriza la rigidez estructural. La firmeza de cada punto no recae en la rigidez de una palanca, sino en un sistema de bloqueo dual que combina un tope mecánico y uno hidráulico. Si bien este enfoque no está exento de sus propios puntos de fallo, como una posible fuga del pistón, ofrece una resistencia a la presión externa y una durabilidad fundamentalmente superiores.

2.3.5. Actuación Directa con SMA y Retorno por Resorte

Un ejemplo de esta tecnología lo podemos encontrar en la patente US8770981B2 [4], la cual consta de un sistema compuesto por un alambre SMA y un resorte de compresión que actúan sobre un bloque deslizante que permite controlar el pin braille. Esto funciona gracias a que una corriente que circula por el alambre SMA calienta el material, lo que provoca que se contraiga, tirando del bloque deslizante en contra del resorte para permitir que se retraiga el pin. En cambio, para la activación se deja enfriar el material con la finalidad de que recupere su forma, empujando hacia arriba el bloque.

Dentro de las ventajas que posee esta patente destacan la simplicidad del diseño y lo compacto que resulta. Además, el bloque deslizante evita que la fuerza recaiga sobre el SMA, por lo que puede soportar la carga de la presión del dedo del usuario. Sin embargo, cuenta con la desventaja de la necesidad de mantener una corriente continua sobre el material, lo que en las matrices densas puede significar un gasto mayor de energía, así como también una poca velocidad, debido a que se requiere el enfriamiento del material para el retroceso del pin.

Frente a la doble desventaja del consumo energético para la retención y la lentitud inherente al ciclo térmico, nuestra propuesta demuestra nuevamente su ventaja. El sistema de bloqueo pasivo no sólo elimina por completo el gasto de energía en estado de retención, sino que su activación tampoco depende de un proceso de enfriamiento, abordando así las dos principales debilidades de esta tecnología [4].

2.3.6. Actuador de Polímero Electroactivo con Transmisión Hidráulica

La patente US6881063B2 [2] describe un dispositivo que se vale del uso de un polímero electroactivo (EAP) por sus siglas en inglés, el cual se encuentra inmerso en una carcasa rellena de un fluido incompresible. Al aplicársele un voltaje, el polímero se flexiona, lo que provoca el desplazamiento del líquido en su interior. Dicho desplazamiento deforma un diafragma ubicado en la parte superior de la carcasa, generando así el punto braille. De manera simultánea e ingeniosa, el mismo movimiento del EAP desplaza unos bloques de soporte mecánicos que se posicionan debajo del mecanismo del pin, enclavándolo en su estado elevado [2]. Aunque también constan de algunas desventajas; por ejemplo, el hecho de que la tecnología de polímeros electroactivos es relativamente nueva y su fabricación, compleja. La fiabilidad y durabilidad del material también representan retos de diseño. Frente a los desafíos de fiabilidad y complejidad que presentan los polímeros emergentes, nuestra propuesta opta por un enfoque más pragmático. La principal diferencia radica en el actuador primario: en lugar de depender de un EAP, utilizamos componentes electromecánicos convencionales y de probada eficacia. Esta decisión de diseño no sólo simplifica radicalmente la fabricación, sino que también garantiza una mayor fiabilidad a largo plazo y facilita enormemente las reparaciones futuras del dispositivo [2].

Tabla 2.1: Tabla Comparativa de Tecnologías de Actuación

Patente / Fuente (ID)	Principio de Actuación Primario	Mecanismo de Enclavamiento/Retención	Ventajas Clave	Desventajas Críticas	Contraste Fundamental con la Propuesta Híbrida
US20130203022A1	Rotación de Disco Poligonal	Fricción de motor/engranaje	Bajo número de permutaciones, componentes idénticos, bajo coste potencial.	Velocidad limitada por inercia, volumen físico, fiabilidad mecánica de engranajes.	Selección de patrones vs. Actuación directa de puntos. Bloqueo por fricción vs. Bloqueo positivo.
US6776619 (NIST)	Rueda Giratoria Continua	Posición de pines fijada temporalmente	Muy bajo número de actuadores por línea, lectura continua.	Alta complejidad mecánica y de sincronización, experiencia de lectura no estándar.	Eficiencia de línea dinámica vs. Robustez de carácter estático. Sistema monolítico vs. Modular.
US8770981B2	Contracción de SMA	Ninguno (retorno por resorte)	Diseño muy compacto, pocas piezas móviles.	Alto consumo de energía en retención, generación de calor, velocidad limitada por enfriamiento.	Bloqueo pasivo vs. Retención activa. Eficiencia energética fundamentalmente superior.

Continúa en la siguiente página...

Tabla 2.1: (Continuación)

Patente / Fuente (ID)	Principio de Actuación Primario	Mecanismo de Enclavamiento/Retención	Ventajas Clave	Desventajas Críticas	Contraste Fundamental con la Propuesta Híbrida
WO2015189863A2	Contracción de SMA	Pestillo (latch) mecánico explícito	Bajo consumo en retención, mitiga el calor, mejora la vida útil del SMA.	Mayor complejidad mecánica (actuador + pestillo por punto), más puntos de fallo.	Bloqueo añadido (dos sistemas) vs. Bloqueo inherente (un sistema integrado).
US3659354A	Presión Neumática	Interpositor mecánico deslizante	Bloqueo mecánico robusto, desacoplamiento de actuación y retención.	Requiere compresor/válvulas externas, riesgo de fugas, ruido.	Bloqueo separado vs. Bloqueo integrado en el actuador. Neumática centralizada vs. Hidráulica sellada por punto.
US6881063B2	Polímero Electroactivo (EAP)	Bloques de soporte mecánicos	Bajo consumo en retención, potencial de alta densidad.	Complejidad de fabricación (EAP), fiabilidad a largo plazo de polímeros y sellos.	Actuador de material inteligente vs. Actuador electromecánico convencional. Mayor robustez potencial de la propuesta.

Continúa en la siguiente página...

Tabla 2.1: (Continuación)

Patente / Fuente (ID)	Principio de Actuación Primario	Mecanismo de Enclavamiento/Retención	Ventajas Clave	Desventajas Críticas	Contraste Fundamental con la Propuesta Híbrida
Propuesta Híbrida	Motor con Tornillo Sin Fin	Inherente al tornillo sin fin (primario) + Incompresibilidad del fluido (secundario)	Bloqueo pasivo dual y robusto, componentes probados, bajo consumo en retención.	Potencialmente más lento que los sistemas piezoeléctricos, requiere control de 6 motores.	N/A

Capítulo 3

Metodología

3.1. Introducción

En este trabajo se optó por un modelo híbrido de desarrollo iterativo de prototipado, combinado con la metodología V. Esta es común para el desarrollo de sistemas mecatrónicos y consiste en un enfoque que permite una relación directa entre los cambios de diseño y su validación mediante pruebas; mientras que el desarrollo iterativo permite aplicar cambios de manera constante en la fase de construcción del prototipo. El objetivo es mejorarlo con cada iteración, basándose en los resultados obtenidos de la validación.

El diseño del prototipado abarcó el diseño de tres grandes subsistemas, los cuales dividiremos en:

- **Diseño mecánico**, que incluye el diseño, selección e implementación de los actuadores lineales.
- **Diseño electrónico**, en el cual se eligieron los componentes y se diseñó el sistema que permite el control de la parte mecánica del dispositivo.
- **Diseño de software**, responsable de la lectura de archivos digitales, así como servir como nexo que permite la conexión entre las partes electrónica y mecánica, dando pie al control e integración de todas sus partes en conjunto.

3.2. Diseño mecánico

Definición de mecanismos

Para establecer los parámetros fundamentales del sistema mecánico, se partió del análisis de las necesidades funcionales del dispositivo. Se definieron los siguientes requisitos mecánicos como

base para el diseño de los actuadores lineales y del mecanismo de despliegue:

- **Altura del punto Braille:** cada punto debe alcanzar una altura mínima de 0.5 mm para asegurar su percepción táctil por parte del usuario, conforme a lo recomendado por la comisión braille española[16].
- **Diámetro del punto:** el diámetro de cada punto debe estar entre 1.3 mm y 1.5 mm, con una tolerancia máxima de ± 0.1 mm, para cumplir con las normas de formato Braille.
- **Distancia entre puntos:** se establece una separación horizontal y vertical de 2.5 mm, en línea con las dimensiones convencionales de una celda Braille de 6 puntos.

Estos criterios sirvieron como guía para la selección de actuadores lineales, el diseño de las estructuras móviles, y la evaluación del desempeño del prototipo mecánico durante las etapas de prueba y validación.

Diseño del actuador lineal principal

Para el desarrollo de este actuador lineal se optó por elegir un sistema híbrido de tornillo sin fin en conjunto con un pistón hidráulico. El propósito principal de estos elementos en conjunto permite mantener un enclave pasivo, lo cual evita un gasto energético continuo para mantener elevado el punto.

Para establecer las características del tornillo se tomó en cuenta las normas ISO 68-1 [5], ISO 261 [1] y ISO 965 [3] para un tornillo que consta de un paso de 1 mm. Se eligió un paso fino en el tornillo para fines de mantener un control preciso en el avance del actuador lineal. Además, la decisión del uso de un paso y medidas estándar en el diseño del tornillo permite la replicabilidad del prototipo.

Para el diseño del tornillo se definieron algunos de sus parámetros, empezando por el paso, el cual se puede entender como la distancia axial que el tornillo recorre en una revolución completa. Este, como ya se mencionó anteriormente, se fijó en 1 mm. Otro parámetro importante es el diámetro mayor o nominal, el cual se define como el diámetro más grande de una rosca de tornillo, medido en la cresta de un tornillo macho o en la raíz de una tuerca hembra, esto se puede observar en la **Figura 3.1**.

En contraposición, el diámetro menor representa el diámetro más pequeño de una rosca de tornillo como se señala en **Figura 3.1**, medido en la raíz del filete. Este es el parámetro más crítico para el análisis de la resistencia a la tracción del tornillo, ya que define el área de la sección transversal que soporta la carga axial. Otro parámetro que tenemos que tener en cuenta es el ángulo incluido entre los flancos de la rosca. Como queremos que siga la norma ISO 68-1[5], el ángulo de la rosca será de 60° para mantenerla.

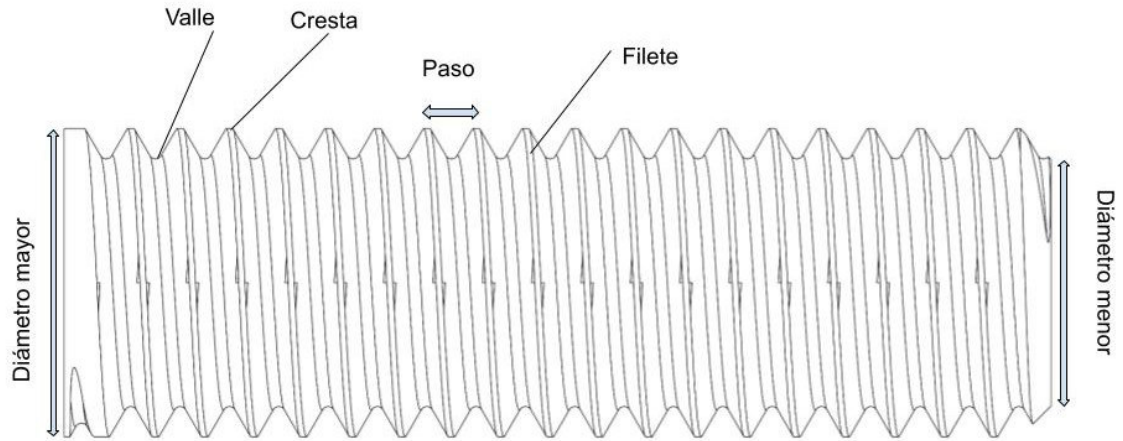


Figura 3.1: Tornillo sin fin con sus partes.

3.3. Cálculos Geométricos

Altura del Triángulo Fundamental (H)

El perfil de la rosca métrica se basa en un triángulo equilátero teórico. La altura de este triángulo, denominada H , se calcula directamente a partir del paso P .

$$H = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot P \quad (3.1)$$

Sustituyendo el valor de $P = 1$ mm:

$$H = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1 \text{ mm} \approx 0.866025 \text{ mm} \quad (3.2)$$

Profundidad Efectiva del Filete (h_3)

Para mejorar la resistencia y facilitar la fabricación, el perfil teórico se trunca. Según la norma ISO 68-1, la cresta se trunca en $\frac{1}{8}H$ y la raíz en $\frac{1}{4}H$ [29]. La profundidad total del filete, h_3 , es la altura del triángulo fundamental menos estos dos truncamientos.

$$\text{Profundidad} = H - \left(\frac{1}{8}H + \frac{1}{4}H \right) = H - \frac{3}{8}H = \frac{5}{8}H \quad (3.3)$$

$$\text{Profundidad} \equiv h_3$$

Sustituyendo el valor de H calculado en el paso anterior:

$$h_3 = \frac{5}{8} \cdot (0.866025 \text{ mm}) \approx 0.541266 \text{ mm} \quad (3.4)$$

También se puede expresar directamente en función del paso P :

$$h_3 = \frac{5}{8} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot P \right) \approx 0.541266 \cdot P \quad (3.5)$$

Diámetro de Paso (d_2)

El diámetro de paso (d_2) se define en un punto donde el ancho del filete y del surco son iguales. Geométricamente, esto corresponde a una reducción radial de $\frac{3}{8}H$ desde el diámetro mayor (d) en cada lado del eje del tornillo y toma un valor de 0.004 m para un tornillo M4 [29][11][36].

$$d_2 = d - 2 \cdot \left(\frac{3}{8}H \right) = d - \frac{3}{4}H \quad (3.6)$$

Expresando la fórmula en función del paso P :

$$d_2 = d - \frac{3}{4} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot P \right) = d - \frac{3\sqrt{3}}{8} \cdot P = d - 0.649519 \cdot P \quad (3.7)$$

Para nuestro caso de estudio con $P = 1$ mm:

$$d_2 = d - 0.6495 \text{ mm} \quad (3.8)$$

Diámetro Menor (d_3)

El diámetro menor o de raíz (d_3) se calcula restando dos veces la profundidad total del filete (h_3) del diámetro mayor (d). Sin embargo, las normas como DIN ISO 724 utilizan una fórmula más precisa que considera el radio en el fondo de la rosca para tornillos externos[11][36][10]. La fórmula estandarizada es:

$$d_3 = d - 1.226869 \cdot P \quad (3.9)$$

Esta fórmula se deriva de la geometría del perfil básico, que incluye un radio en el fondo de la rosca de $R = H/6$ [36][38]. La profundidad total desde la cresta hasta la raíz del tornillo macho es $h_3 = (d - d_3)/2$. Para nuestro caso de estudio con $P = 1$ mm:

$$d_3 = d - 1.226869 \cdot (1 \text{ mm}) = d - 1.2269 \text{ mm} \quad (3.10)$$

Una vez que se realizó el cálculo de la rosca se puede acoplar a las demás piezas y explicar su funcionamiento en conjunto, el tornillo sin fin se acopla a una unión que mantiene fijado el motor al tornillo que a su vez se encuentra acoplado a una pieza móvil que permite presionar un pistón que contiene líquido, cuando el motor se acciona se consigue un movimiento lineal que desplaza el líquido a través de una pequeña manguera conectada a otro pistón, el desplazamiento de líquido provoca el movimiento de un vástago acoplado al segundo pistón, permitiendo la activación del

punto de braille esto se aprecia en la **Figura 3.2** .

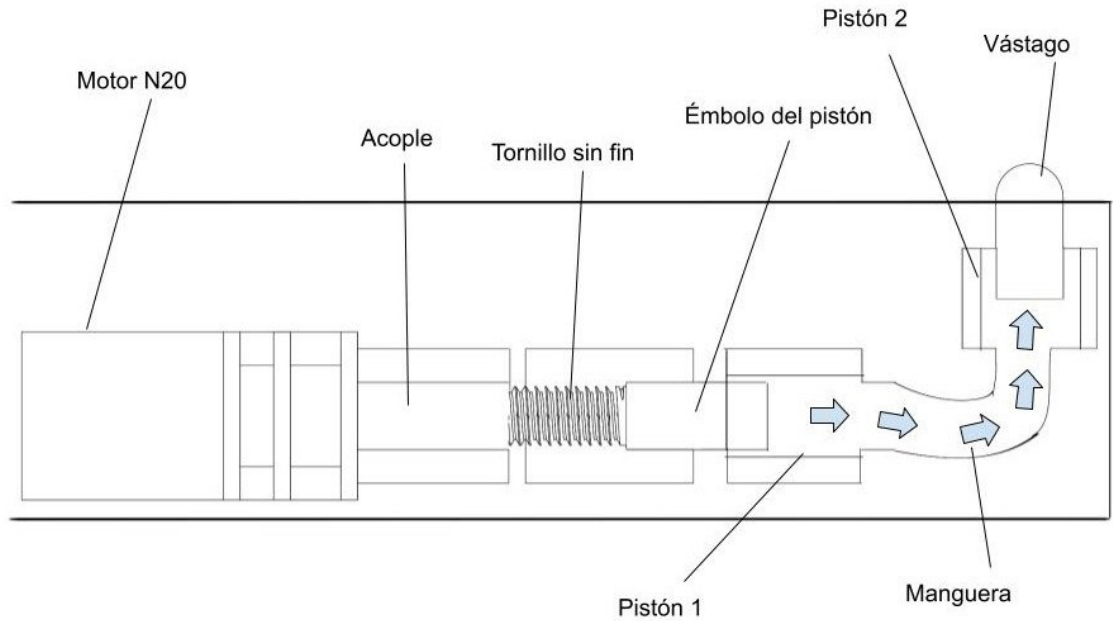


Figura 3.2: Actuador lineal diseñado.

Tabla 3.1: Parámetros y Constantes del Sistema Consolidados

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad (SI)	Fuente / Justificación
Especificaciones del Motor (GA12-N20-10)				
Voltaje Nominal	V_{nom}	6	V	
Velocidad Nominal (a 6 V)	ω_{nom}	104.72	rad/s	1000 rpm
Par Nominal	τ_{nom}	0.00588	N·m	0.06 kg·cm
Par de Calado	τ_{stall}	0.03924	N·m	0.4 kg·cm
Geometría del Tornillo de Potencia				
Tipo de Rosca	-	ISO Métrica	-	
Paso	p	0.001	m	1 mm
Avance	L	0.001	m	Rosca de una entrada ($L = p$)
Diámetro Mayor	d	0.004	m	Tornillo M4 estándar

Tabla 3.1: (Continuación)

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad (SI)	Fuente / Justificación
Diámetro Medio Calculado	d_m	0.0035	m	$d_m \approx d - 0.6495 \times p$
Ángulo de Rosca Completo	2β	60	grados	Estándar ISO
Medio Ángulo de Rosca	β	30	grados	-
Sistema Hidráulico				
Volumen Nominal del pistón	-	3	ml	
Diámetro Interno del pistón	d_s	0.00866	m	Estándar de 3 ml
Área del Émbolo	A_s	5.89×10^{-5}	m^2	$\pi d_s^2/4$
Diámetro Interno de la Manguera	d_h	0.006	m	6 mm
Área de la Manguera	A_h	2.83×10^{-5}	m^2	$\pi d_h^2/4$
Longitud de la Manguera	L_h	0.2	m	
Propiedades de Materiales y Fluidos				
Coef. Fricción Cinética (Acero-Acero)	μ_k	0.18	-	Valor conservador de fuentes
Coef. Fricción Estática (Acero-Acero)	μ_s	0.225	-	Asunción: $\mu_s \approx 1.25\mu_k$
Fuerza de Fricción del Émbolo Fluido (Agua a 20°C)	$F_{\text{friccion.em}}$	3.1	N	Valor experimental de literatura [24]
Densidad	ρ	1000	kg/m^3	Estándar
Viscosidad Cinemática	ν	1.0×10^{-6}	m^2/s	Estándar a 20°C
Constantes Físicas				
Aceleración Gravitacional	g	9.81	m/s^2	Estándar

3.4. Modelo Matemático del Actuador Lineal

Para comprender y predecir el rendimiento del actuador, es esencial desarrollar un modelo matemático que describa su funcionamiento. El objetivo de este modelo es determinar la fuerza neta (F_{neta}) que el actuador puede ejercer sobre el fluido hidráulico. Esta fuerza neta no es simplemente la fuerza generada por el motor, sino el resultado de un presupuesto de fuerzas. El modelo se basa en restar las fuerzas resistivas (pérdidas) de la fuerza bruta generada por el mecanismo de tornillo. Esta relación constituye una aplicación directa de la segunda ley de Newton sobre el conjunto móvil, expresada en la siguiente ecuación gobernante:

$$F_{\text{neta}} = F_{\text{axial}} - F_{\text{pérdidas}}. \quad (3.11)$$

Donde las pérdidas principales son la fricción estática/dinámica del émbolo ($F_{\text{fricción_em}}$) y la contrapresión generada por la resistencia hidráulica ($F_{\text{hidráulica}}$). Por lo tanto, el modelo completo a resolver es:

$$F_{\text{neta}} = F_{\text{axial}} - F_{\text{fricción_em}} - F_{\text{hidráulica}}. \quad (3.12)$$

Las siguientes subsecciones están dedicadas a modelar y calcular cada uno de estos tres componentes para, finalmente, sintetizar el resultado, las variables del sistema se pueden observar en la tabla 3.1.

3.4.1. Modelo de la Fuerza Axial Bruta (F_{axial}) por Tornillo de Potencia

El primer componente de la Ecuación 3.12, F_{axial} , es la fuerza bruta generada por el núcleo del actuador: el mecanismo de tornillo de potencia. Este mecanismo transforma el par (torque) rotacional del motor (T) en un movimiento y fuerza lineal. Para modelar esta conversión, se analiza el tornillo como un plano inclinado envuelto alrededor de un cilindro [9]. El par del motor (T) debe vencer tanto la carga axial (F) como la fricción interna de las roscas.

Cálculo de Parámetros Geométricos y de Fricción

Para construir el modelo $T \rightarrow F$, primero se deben definir las constantes geométricas y de fricción del tornillo.

Ángulo de Avance (λ): Es el ángulo del plano inclinado conceptual, que depende del avance (L) y del diámetro medio (d_m). Se calcula mediante la relación trigonométrica [9][7][19]:

$$\tan(\lambda) = \frac{L}{\pi d_m} \quad (3.13)$$

Sustituyendo los valores:

$$\tan(\lambda) = \frac{0.001 \text{ m}}{\pi \times 0.0035 \text{ m}} \approx 0.0909 \quad \Rightarrow \quad \lambda = \arctan(0.0909) \approx 5.2^\circ$$

Geometría de Rosca en V ISO 68-1[5]: La rosca métrica ISO (con medio ángulo $\beta = 30^\circ$) aumenta la fricción en comparación con una rosca cuadrada. Este efecto se modela dividiendo los términos de fricción por $\cos(\beta)$, lo que resulta en una fricción virtual mayor [20][18].

Ecuación Gobernante para la Conversión de Par a Fuerza

Con la geometría definida, la relación que modela la conversión de par (T) a fuerza axial (F) para una rosca en V se describe por [18]:

$$T = \frac{Fd_m}{2} \left[\frac{L + \pi\mu d_m \sec(\beta)}{\pi d_m - \mu L \sec(\beta)} \right]. \quad (3.14)$$

Para el modelo, se necesita despejar la fuerza axial de salida (F_{axial}) como una función del par de entrada (T):

$$F_{\text{axial}} = T \frac{2}{d_m} \left[\frac{\pi d_m - \mu L \sec(\beta)}{L + \pi\mu d_m \sec(\beta)} \right]. \quad (3.15)$$

Esta ecuación es el modelo matemático que permite calcular F_{axial} si se conoce el par motor T .

Determinación del Par de Entrada del Motor (T)

El par de entrada T es provisto por el motor. Para un análisis completo, el modelo debe considerar dos escenarios operativos clave:

Par Nominal (τ_{nom}): El par en operación continua y eficiente.

$$\tau_{nom} = 0.06 \text{ kg} \cdot \text{cm} \times 9.81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \times 0.01 \frac{\text{m}}{\text{cm}} \approx 0.00588 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3.16)$$

Par de Calado (τ_{stall}): El par máximo que el motor puede ejercer justo antes de detenerse (pico).

$$\tau_{stall} = 0.4 \text{ kg} \cdot \text{cm} \times 9.81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \times 0.01 \frac{\text{m}}{\text{cm}} \approx 0.03924 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3.17)$$

Estos dos valores de T se usarán en la Ecuación 3.15 para encontrar F_{axial} en ambos escenarios.

Resistencia por Fricción del Émbolo ($F_{\text{fricción_em}}$)

Para poder llevar los cálculos posteriores se requiere modelar los dos términos de pérdida ($F_{\text{fricción_em}}$ y $F_{\text{hidráulica}}$) de la Ecuación 3.12. Se debe tomar en cuenta en un inicio que la primera pérdida principal es la fricción entre el émbolo del pistón y la camisa del cilindro. Este es un parámetro difícil de modelar teóricamente, por lo que se recurre a datos empíricos de la literatura. Un estudio midió una fuerza de fricción de **3.1 N** para un pistón de plástico en condiciones similares [24], valor que se adoptará como la contribución $F_{\text{fricción_em}}$ en este modelo.

Análisis de la Contrapresión Hidráulica ($F_{\text{hidraulica}}$)

La segunda pérdida, $F_{\text{hidráulica}}$, es la fuerza causada por la resistencia del fluido a ser movido a través de la manguera. Para calcular esta fuerza ($F = P \times A$), primero debemos modelar la caída de presión (ΔP) en el fluido.

Cálculo de la Velocidad del Fluido (v_{fluido}): La caída de presión depende de la velocidad. La velocidad del émbolo se calcula a partir de la velocidad del motor y el avance del tornillo. La velocidad del fluido en la manguera se obtiene por la ley de continuidad.

Velocidad lineal del émbolo: $v_{\text{embolo}} = 1000 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times \frac{0.001 \text{ m}}{\text{rev}} = 0.01667 \text{ m/s}$.

$$v_{\text{fluido}} = v_{\text{embolo}} \times \left(\frac{d_s}{d_h} \right)^2 = 0.01667 \text{ m/s} \times \left(\frac{8.66 \text{ mm}}{6.0 \text{ mm}} \right)^2 \approx 0.0346 \text{ m/s} \quad (3.18)$$

Determinación del Régimen de Flujo (Número de Reynolds): El modelo de caída de presión (laminar o turbulento) depende del Número de Reynolds (Re).

$$Re = \frac{v_{\text{fluido}} d_h}{\nu} = \frac{0.0346 \text{ m/s} \times 0.006 \text{ m}}{1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} \approx 207.6 \quad (3.19)$$

Dado que $Re < 2300$, el flujo es laminar.

Cálculo de la Caída de Presión (ΔP): Para flujo laminar, la caída de presión se modela con la ecuación de Darcy-Weisbach [15][32][6]:

$$\Delta P = f_D \frac{L_h}{d_h} \frac{\rho v_{\text{fluido}}^2}{2} \quad (3.20)$$

Donde el factor de fricción f_D para flujo laminar es $f_D = 64/Re = 64/207.6 \approx 0.308$.

$$\Delta P = 0.308 \times \frac{0.2 \text{ m}}{0.006 \text{ m}} \times \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \times (0.0346 \text{ m/s})^2}{2} \approx 6.14 \text{ Pa}$$

Cálculo de la Fuerza Hidráulica ($F_{\text{hidráulica}}$): Finalmente, esta presión se convierte en la fuerza de pérdida $F_{\text{hidráulica}}$:

$$F_{\text{hidráulica}} = \Delta P \times A_s = 6.14 \text{ N/m}^2 \times (5.89 \times 10^{-5} \text{ m}^2) \approx 0.00036 \text{ N} \quad (3.21)$$

El modelo predice que la fuerza de fricción del émbolo (3.1 N) es dominante y la resistencia hidráulica es despreciable en este régimen de operación.

3.4.2. Síntesis del Modelo y Fuerza de Salida Neta

Con todos los componentes del modelo (Ecuación 3.12) calculados, ahora es posible sintetizar los resultados para encontrar la fuerza neta real del sistema.

Primero, se usa la Ecuación 3.15 para encontrar la fuerza bruta generada por el tornillo, usando los valores de par motor y los coeficientes de fricción cinético ($\mu_k = 0.18$) y estático ($\mu_s = 0.225$).

Fuerza Axial en Operación Continua ($F_{\text{axial_nom}}$):

$$F_{\text{axial_nom}} = 0.00588 \frac{2}{0.0035} \left[\frac{\pi(0.0035) - (0.18)(0.001) \sec(30^\circ)}{0.001 + \pi(0.18)(0.0035) \sec(30^\circ)} \right] \approx 11.02 \text{ N}$$

Fuerza Axial en Condición de Pico/Calado ($F_{\text{axial_stall}}$):

$$F_{\text{axial_stall}} = 0.03924 \frac{2}{0.0035} \left[\frac{\pi(0.0035) - (0.225)(0.001) \sec(30^\circ)}{0.001 + \pi(0.225)(0.0035) \sec(30^\circ)} \right] \approx 62.38 \text{ N}$$

Finalmente, se aplica el modelo completo $F_{\text{neta}} = F_{\text{axial}} - F_{\text{fricción_em}} - F_{\text{dehidráulica}}$ para obtener el rendimiento real del sistema:

- **Fuerza Neta Continua ($F_{\text{neta_nom}}$):** $11.02 \text{ N} - 3.1 \text{ N} - 0.00036 \text{ N} \approx \mathbf{7.92 \text{ N}}$
- **Fuerza Neta de Pico/Calado ($F_{\text{neta_stall}}$):** $62.38 \text{ N} - 3.1 \text{ N} \approx \mathbf{59.28 \text{ N}}$ (La resistencia hidráulica es cero en calado, $v = 0$)

Estos resultados finales del modelo se resumen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Resumen del Presupuesto de Fuerzas y Rendimiento del Sistema

Componente de Fuerza	Operación Continua	Operación de Pico
Fuerza Axial Bruta (F_{axial})	11.02 N	62.38 N
Pérdida por Fricción del Émbolo	-3.10 N	-3.10 N
Pérdida por Resistencia Hidráulica	-0.0004 N	0 N
Fuerza Neta sobre el Fluido (F_{neta})	7.92 N	59.28 N
Eficiencia General del Sistema (η_{sistema})	21.4 %	N/A

3.5. Diseño electrónico

El diseño electrónico es la arquitectura central que dota de inteligencia y operatividad al dispositivo. Su desarrollo se fundamenta en tres requisitos clave:

- **Control:** Gobernar de forma precisa y secuencial los seis actuadores lineales.

- **Conectividad:** Gestionar la comunicación inalámbrica (WiFi y Bluetooth) para recibir comandos y enviar datos de estado.
- **Portabilidad:** Mantener un factor de forma compacto y una operación autónoma basada en batería.

Las siguientes subsecciones detallan la selección de componentes y las estrategias de diseño implementadas para cumplir con estos objetivos.

3.5.1. Selección de la Plataforma de Cómputo Central

La selección del cerebro del sistema es una decisión de diseño fundamental, que impacta el software, el tamaño y la escalabilidad del proyecto. La elección requería un balance de cinco criterios clave: potencia de cómputo, conectividad inalámbrica integrada, factor de forma (tamaño), costo, y, críticamente, la madurez del ecosistema y soporte de la comunidad.

La evaluación se dividió en dos etapas: primero, decidir entre un Microcontrolador (MCU) micro controller unit por sus siglas en inglés o una Microcomputadora (SBC) computadora mono placa por sus siglas en inglés ; y segundo, seleccionar el mejor SBC para la tarea.

Etapa 1: Descarte de Microcontroladores (MCU)

Inicialmente se consideraron plataformas populares de bajo costo como el Arduino Nano y el ESP32.

- **Arduino Nano (Atmega328P):** Aunque su costo y tamaño son mínimos, su arquitectura de 8-bit y 16MHz es insuficiente para gestionar archivos de gran tamaño además de necesitar módulos de memoria externos para guardar los documentos , lo que anularía la ventaja del tamaño, aumentaría la complejidad y seguiría sin resolver la falta de potencia para un desarrollo de alto nivel.
- **ESP32:** Esta es una alternativa mucho más fuerte, ya que integra WiFi y Bluetooth y posee un potente procesador de doble núcleo (240MHz) a bajo costo. Sin embargo, su principal desventaja es ser un MCU. El desarrollo se realiza típicamente en C++ (Arduino/ESP-IDF) o MicroPython, careciendo de un sistema operativo Linux completo. Esto limita drásticamente la flexibilidad del software, complicando la instalación de librerías, la gestión de dependencias y el *multitasking* avanzado que un SO completo maneja de forma nativa.

Por lo tanto es necesario algo que nos dé una potencia suficiente para la gestión de los archivos así como permita una flexibilidad en cuanto a la programación conservando un equilibrio entre potencia y tamaño reducido por lo que la alternativa que mejor se adapta a las necesidades del proyecto es una SBC.

Etapa 2: Comparativa y Selección de computadora Compacta (SBC)

Una vez decidido el uso de un SBC, la selección se centró en placas de formato Zero (ultra-compactas) que ofrecieran conectividad inalámbrica. Los principales contendientes en este rango son la Raspberry Pi Zero 2W, la Orange Pi Zero 2 y la Banana Pi M2 Zero.

Tabla 3.3: Comparativa de plataformas SBC compactas ("Zero").

Característica	Raspberry Pi Zero 2W	Orange Pi Zero 2	Banana Pi M2 Zero
CPU	Broadcom BCM2710A1 (4x Cortex-A53 @ 1GHz)	Allwinner H616 (4x Cortex-A53 @ 1.5GHz)	Allwinner H3 (4x Cortex-A7 @ 1.2GHz)
RAM	512MB LPDDR2	512MB / 1GB DDR3	512MB DDR3
Conectividad	WiFi 4 + BLE 4.2	WiFi 5 + BLE 5.0	WiFi 4 + BLE 4.0
Factor de Forma	65x30mm	55x55mm (cuadrado)	65x30mm (clon RPi)
OS / Soporte	Excelente (Oficial, vasta)	Pobre (Comunidad, Armbian)	Pobre (Comunidad, Armbian)
Comunidad	Masiva	Limitada	Limitada
Costo	Moderado	Bajo-Moderado	Moderado

Análisis y Justificación Final Al observar la Tabla 3.3, se hace evidente un punto crítico. En términos de *hardware* puro, la **Orange Pi Zero 2** es objetivamente superior: tiene una CPU más rápida, RAM más rápida y conectividad WiFi 5 más moderna. La **Banana Pi M2 Zero** es un clon de hardware casi directo.

Sin embargo, para un proyecto de tesis o prototipado, **el soporte de software y la comunidad son más importantes que las especificaciones de hardware marginales.**

- **Desventajas de Orange/Banana Pi:** Su soporte de software es casi exclusivamente mantenido por la comunidad (ej. Armbian). Las imágenes de sistema operativo pueden ser inestables, la documentación es escasa y la solución de problemas específicos (ej. hacer funcionar el Bluetooth) puede consumir días o semanas de trabajo.
- **Ventaja Decisiva de Raspberry Pi:** La **Raspberry Pi Zero 2W** es la única placa de este grupo con un sistema operativo oficial (Raspberry Pi OS) mantenido profesionalmente. Posee la comunidad de usuarios más grande del mundo para cualquier SBC, lo que se traduce en:
 1. **Documentación exhaustiva** para cada pin y función.
 2. **Disponibilidad universal de librerías** (Python, C++, etc.).
 3. **Foros y tutoriales** que resuelven casi cualquier problema imaginable.

En conclusión, se seleccionó la **Raspberry Pi Zero 2W** porque el **riesgo de desarrollo** y el **tiempo de implementación** se reducen drásticamente gracias a su ecosistema de software maduro. La estabilidad y facilidad de desarrollo que ofrece su soporte oficial superan con creces las ventajas de hardware menores de sus competidores.

3.5.2. Estrategia de Control y Multiplexación de Actuadores

El control de los seis motores DC responsables de los puntos braille presenta un doble desafío: la necesidad de **control bidireccional** (extender y retraer) y la limitación de pines GPIO en la Raspberry Pi Zero 2W. La solución adoptada es una arquitectura de control multiplexada.

Para la etapa de potencia y el control direccional, se emplea el *driver* DRV8833. Este puente H permite invertir la polaridad del voltaje aplicado al motor, pero su uso directo para seis motores requeriría **12 señales de control**, una cantidad inviable.

Para resolver esta limitación de pines, se implementa una **estrategia de multiplexación**. Esta capa de lógica de control utiliza pines de selección para dirigir una única señal de control (como PWM) a un solo puente H a la vez. De esta forma, el software gestiona todos los motores utilizando un número de pines drásticamente reducido. Esta decisión introduce una limitación operativa consciente: **sólo se puede activar un motor a la vez**, lo cual es aceptable dado que la actualización de la celda braille es un proceso inherentemente secuencial.

3.5.3. Gestión de Alimentación y Portabilidad

Para cumplir con el requisito de portabilidad, el sistema debe ser autónomo. El diseño incorpora un módulo de gestión de energía basado en batería. Este subsistema consta de dos baterías de litio 18650 y un circuito de carga y protección (como el Sm5308), este entrega una salida estable de 5V y 2A. Esta tensión regula la alimentación tanto de la Raspberry Pi Zero 2W como de la etapa de potencia de los *drivers* DRV8833, garantizando una operación fiable sin conexión a la red eléctrica.

3.5.4. Diseño de Software

El diseño del software es un pilar fundamental del proyecto, responsable de la interfaz de usuario, la decodificación de texto y el control de los actuadores mecánicos. Para gestionar la carga computacional, la arquitectura de software se ha dividido en dos componentes principales: (1) un módulo de preprocesamiento de texto ejecutado en un PC externo y (2) el software de control y navegación embebido en el dispositivo.

Software Embebido (Dispositivo Raspberry Pi)

El núcleo del dispositivo es un computador Raspberry Pi, para el cual se tomaron las siguientes decisiones de implementación:

- **Sistema Operativo:** Se seleccionó **Raspberry Pi OS Lite**. Esta es una distribución de Linux minimalista que opera exclusivamente mediante línea de comandos (CLI), eliminando la sobrecarga de una interfaz gráfica que no es necesaria para la funcionalidad del dispositivo.

- **Lenguaje de Programación:** La aplicación principal se desarrolló íntegramente en **Python**, aprovechando su flexibilidad y la amplia disponibilidad de librerías para el control de hardware.

La aplicación principal en el dispositivo se estructura en dos subsistemas críticos:

1. Sistema de Navegación e Interfaz de Usuario. La interacción del usuario con el dispositivo se gestiona a través de una serie de botones físicos dedicados (cuyo hardware se detalla en la sección 3.2 Diseño Electrónico). El software mapea estas entradas a funciones específicas para la navegación de archivos y carpetas:

- **Controles de Cursor (Arriba/Abajo):** Permiten al usuario desplazarse verticalmente entre los elementos de una lista (nombres de archivos o carpetas).
- **Botón de Selección (Enter):** Permite abrir una carpeta para ver su contenido o seleccionar un archivo de texto para iniciar su lectura.
- **Botón de Retroceso (Back):** Permite salir de un documento en lectura o retroceder en la jerarquía de carpetas (subir al directorio padre).

Toda la retroalimentación de esta navegación (lectura de nombres de archivos/carpetas) se proporciona al usuario a través de la celda Braille.

2. Motor de Decodificación y Actuación Braille (Enfoque Unicelda). Este es el componente central del software embebido. Su función es traducir caracteres de texto en señales de control físico para el mecanismo de actuadores.

- **Lectura de Caracteres:** Dado el diseño unicelda del dispositivo, la lectura de texto se gestiona carácter por carácter. El usuario controla el flujo de lectura mediante dos botones "gatillo" dedicado, uno para avanzar al siguiente carácter y otro para retroceder al carácter anterior.
- **Codificación de Caracteres:** Se implementó una función que convierte cada carácter de texto (letras, números, puntuación) a una representación binaria personalizada de 7 bits. Los primeros 6 bits corresponden directamente a la matriz de puntos 3x2, y el séptimo bit se utiliza como un indicador (flag) para señalar mayúsculas.
- **Lógica de Control y Ciclo de Refresco:** El software implementa un ciclo de actualización que se ejecuta cada vez que el usuario presiona un gatillo para cambiar de letra:
 1. **Reinicio de Celda (Puesta a Cero):** Como primer paso, el software ejecuta una instrucción de reinicio". Esta instrucción comanda a *todos* los motores N20 a la posición de '0'(retraída), asegurando que todos los pines estén bajos. Este paso es crucial para limpiar el carácter anterior antes de formar el siguiente.

2. **Decodificación:** Inmediatamente después del reinicio, el software obtiene el nuevo carácter (el siguiente o anterior en la cadena de texto) y lo codifica a su representación binaria de 7 bits.
3. **Mapeo de Actuadores:** El código binario se usa como clave en una tabla de consulta (diccionario de Python) que contiene las secuencias de control para el mecanismo de tornillo sin fin. El software compara el estado deseado (el nuevo patrón de 7 bits) con el estado actual (que es '0000000'tras el reinicio).
4. **Ejecución del Motor:** Para cada bit con valor de 1 en el nuevo carácter, el software envía la señal correspondiente al controlador de motor para girar el motor N20 específico. Este giro (ej. horario) avanza el tornillo sin fin y eleva el pin a la posición activa. Los pines correspondientes a bits 0 permanecen retraídos.

Módulo de Preprocesamiento y Conversión (PC)

Dada la limitada capacidad de procesamiento de la Raspberry Pi y la complejidad de analizar ciertos formatos de archivo, se determinó que los documentos sean preprocesados en un PC externo. Los archivos resultantes (en texto plano) son luego transferidos al dispositivo. Este módulo incluye:

- **Conversión de Formatos:** Se utiliza una biblioteca de Python (`python-docx`, `PyMuPDF`) para extraer el contenido textual de archivos complejos como Microsoft Word (`.docx`) y PDF (`.pdf`), convirtiéndolos a formato de texto plano (`.txt`).
- **Filtrado de Caracteres:** Para la fase de prototipo, el sistema se enfoca en la lectura de textos literarios. Por lo tanto, durante la conversión, se aplica un filtro que descarta caracteres no esenciales para este fin, como símbolos matemáticos (integrales, sumatorias) o alfabetos no latinos (ej. griego). Se conservan letras, números, signos de puntuación y paréntesis.
- **Gestión de Archivos Grandes:** Para optimizar el manejo de textos extensos, los archivos PDF se procesan por lotes de páginas, extrayendo el texto en fragmentos manejables.
- **Procesamiento OCR:** Se incluyó un enfoque para manejar documentos PDF escaneados (basados en imágenes). Mediante el motor Tesseract OCR, se extrae el texto de las imágenes. Esta es una tarea computacionalmente intensiva, por lo que su uso también se limita a un número reducido de páginas a la vez.

En el siguiente diagrama de bloques se puede apreciar el funcionamiento del programa principal y cómo se integra con el hardware.

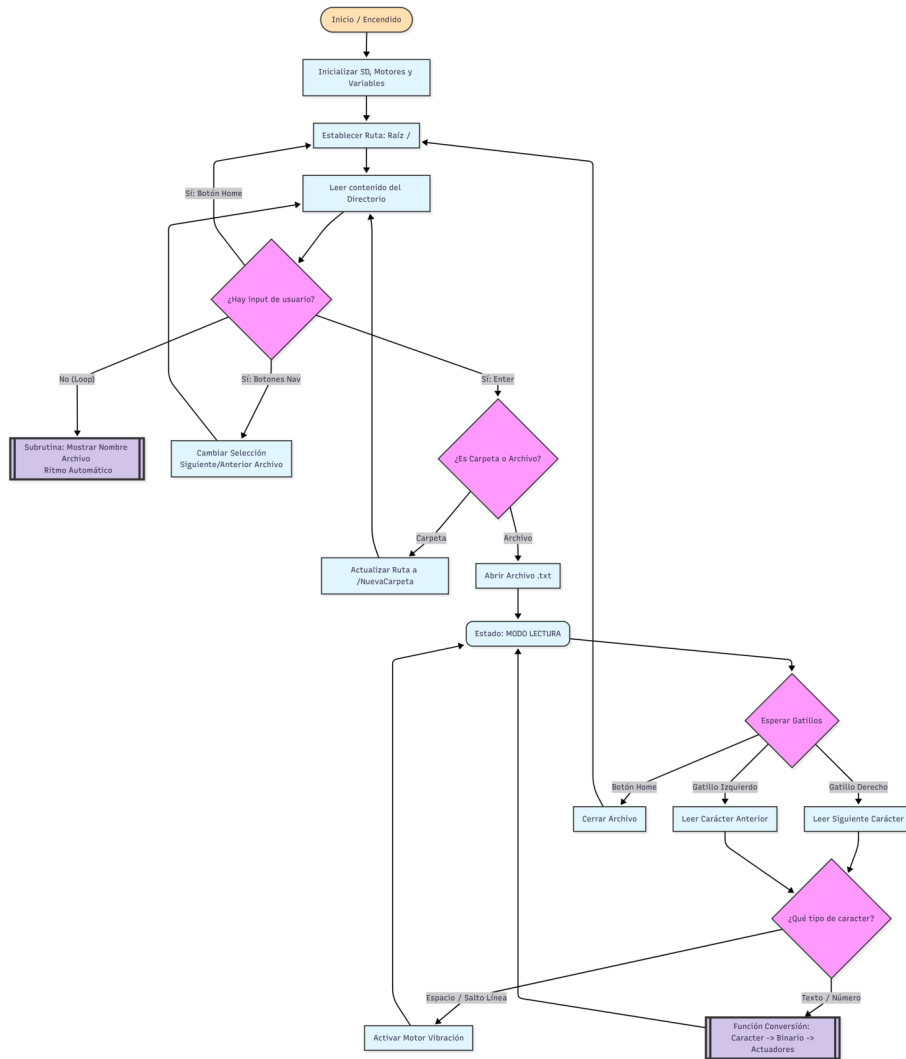


Figura 3.3: Diagrama de flujo del funcionamiento principal del dispositivo braille.

Capítulo 4

Resultados

El principal desafío de nuestra propuesta consistió en diseñar un actuador lineal capaz de elevar el punto Braille y mantenerlo en dicha posición de forma pasiva, resistiendo la presión ejercida por el usuario durante la lectura sin ceder. Para satisfacer estos requerimientos, se optó por un sistema basado en el Principio de Pascal, similar al funcionamiento de una prensa hidráulica. Este mecanismo permite la transferencia de fuerza entre dos contenedores mediante un fluido incompresible, posibilitando incluso la multiplicación de la fuerza de salida en función de la relación de áreas. Si bien esta alternativa ofrece ventajas significativas, como el mantenimiento pasivo del estado del punto (bloqueo hidráulico), también presentó retos de diseño específicos.

Para la implementación del circuito hidráulico y el encapsulamiento del fluido, se adaptaron dos jeringas de uso médico estándar interconectadas mediante un tubo flexible. Para el desplazamiento del fluido, se seleccionó un mecanismo de transmisión de tornillo de potencia (husillo), ampliamente utilizado en sistemas de movimiento lineal preciso como las impresoras 3D.

Se fabricó un acople cilíndrico de acero con un maquinado interior de rosca con paso de 1 mm, permitiendo un control fino del avance. Este cilindro aloja un tornillo M4 modificado, el cual se acopla al eje del motor para desplazar el émbolo y elevar el punto Braille, tal como se ilustra en la Figura 4.1. La sujeción de motores y actuadores a la base se realizó mediante estructuras de soporte impresas en 3D.

El encapsulamiento final del dispositivo consta de una carcasa híbrida fabricada con acrílico y componentes impresos en 3D. Para optimizar el uso de material y la precisión de las piezas, se emplearon dos tecnologías de manufactura aditiva: una impresora de resina Formlabs Form 3 para la fabricación de piezas finas y de alta resolución, y una Kingroon KP3S (filamento) para la impresión de soportes, acoples y elementos de sujeción estructural.

Los vástagos con relieve táctil se fabricaron mediante impresión SLA (resina) para garantizar un acabado superficial liso. Inicialmente, se prototiparon a una escala superior para pruebas de concepto, ajustándose posteriormente a las dimensiones estipuladas por el estándar Braille citado en el Capítulo 2. Dichos vástagos se posicionan bajo la superficie de lectura y, al activarse, emergen

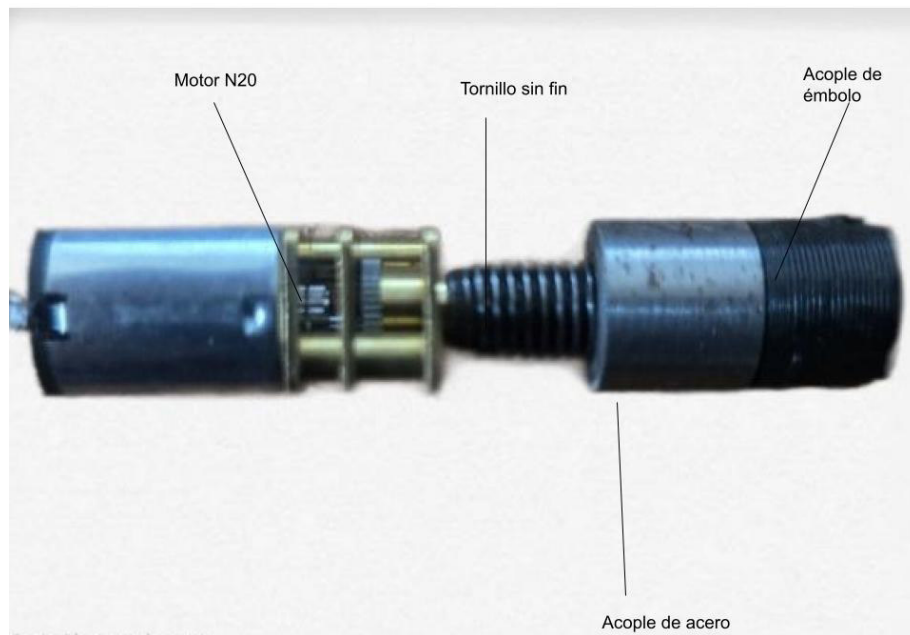


Figura 4.1: Motor y tornillo sin fin.

a través de las perforaciones de la carcasa.

Finalmente, para verificar el desempeño del sistema, se ejecutó una validación en dos vertientes:

- **Validación cuantitativa:** Enfocada en la repetibilidad del recorrido mecánico, asegurando que los puntos avancen y retrocedan consistentemente la misma distancia.
- **Validación cualitativa:** Centrada en la legibilidad, verificada mediante la interpretación de caracteres por parte del equipo de investigación, con base en los criterios de aprendizaje del curso [12].

Cabe resaltar que, en el análisis cuantitativo, se registró un avance promedio de entre 4.5 y 5 mm en un tiempo de activación de los motores de 1.4 segundos. Sin embargo, en pruebas exhaustivas, este método de control por tiempo comienza a volverse poco preciso, presentando un error de 0.2 mm.

Debido a que el motor DC no está diseñado para la precisión por sí solo, este error se vuelve acumulativo conforme se extiende el uso, lo que supone un problema de diseño no identificado anteriormente. Para resolver este problema, se propusieron alternativas que no suponen modificaciones mayores al diseño mecánico y que no interfieren en gran medida con el espacio, por lo cual la portabilidad del dispositivo no se verá comprometida significativamente:

- La primera es el uso de encoders para motores de DC esta solución permite monitorear y controlar la cantidad de giros del motor y añadiendo una condición de paro permite aumentar la precisión.

- Uso de un sensor óptico como lo son el TCRT5000 o el QRE1113, dicha implementación permite de igual forma mantener un control en la cantidad de giros de los motores y por ende generar una condición de paro.
- La última alternativa considerada se basa en el aumento de corriente que sucede cuando se incrementa la carga sobre el motor. Consiste en la hipótesis de que la carga sobre el motor aumentará cuando llegue al tope mecánico; es decir, cuando el tornillo llegue a su fin, este no podrá girar más, generando un aumento en la corriente requerida. Haciendo uso de un sensor de corriente como el INA219, se puede crear una condición de paro. Esta técnica es utilizada en algunos sistemas de ventanas motorizadas en automóviles; sin embargo, posee la desventaja de que somete a desgaste mecánico el engranaje de los motores.

Las soluciones propuestas no suponen un incremento excesivo en el costo del prototipo, por lo que cualquiera de las tres resulta viable.

Conversión de texto a Braille

Para realizar la conversión de texto a Braille desde archivos PDF, se implementaron dos métodos distintos según el origen del documento. Para documentos de texto nativo (no escaneados), se utilizó la librería PyMuPDF en Python. Se estableció un filtro de caracteres basado en la metodología del proyecto, el cual discrimina grafías de alfabetos ajenos al español, pero conserva los signos de puntuación básicos (., ? ! ; :), números y caracteres especiales del idioma como las vocales acentuadas y la letra ‘ñ’.

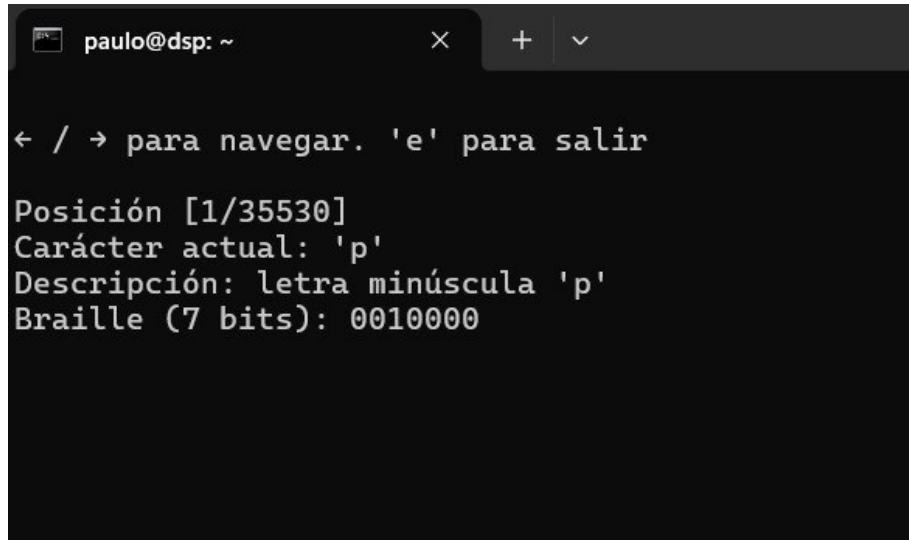
Con el objetivo de optimizar el uso de memoria y evitar la saturación en la extracción de textos extensos, el procesamiento se realizó por lotes de 10 páginas en un tiempo total de 0.2715 segundos por lote. Este parámetro es configurable y puede adaptarse según la capacidad de cómputo disponible. Cabe mencionar que las pruebas de este módulo se realizaron en un equipo portátil MSI con procesador Intel Core i7-12650H (12.^a generación) a 2.30 GHz y 16 GB de RAM.

Una vez extraído el texto plano, la información se almacena en un archivo con extensión `.txt`. Este archivo se transfiere posteriormente a una memoria SD para ser insertada en el dispositivo de lectura Braille.

Por otro lado, para la extracción de texto a partir de imágenes o documentos PDF escaneados, se emplearon las librerías `pytesseract` (con el paquete de idioma español) y `pdf2image`. Debido a la mayor demanda de recursos computacionales que implica el reconocimiento óptico de caracteres (OCR), la extracción se limitó por defecto a una imagen o página por ciclo, aunque este parámetro también es ajustable por el usuario. La precisión de este método depende directamente de la resolución y calidad de la imagen fuente. Al igual que en el método anterior, se aplicó el filtrado para conservar únicamente caracteres alfanuméricos y signos de puntuación válidos en español.

Finalmente, dentro del dispositivo de lectura, el programa principal gestiona la navegación por carpetas y la presentación del texto carácter por carácter. A pesar de utilizar *Raspberry Pi OS Lite* (sin entorno de escritorio), se desarrolló una interfaz de línea de comandos (CLI) para fines de

depuración. Como se observa en la Figura 4.2, la interfaz muestra el directorio actual, el carácter procesado y su código binario correspondiente a la celda Braille.



```
paulo@dsp: ~
← / → para navegar. 'e' para salir
Posición [1/35530]
Carácter actual: 'p'
Descripción: letra minúscula 'p'
Braille (7 bits): 0010000
```

Figura 4.2: Interfaz de depuración en consola mostrando el carácter actual y su código binario.

La integridad de la conversión de texto a partir de imágenes es evaluada cuantitativamente mediante la métrica de *Confidence Score* (Nivel de Confianza), la cual es generada intrínsecamente por el motor Tesseract. A diferencia de las métricas de comparación externa (como la Tasa de Error de Caracteres, CER), este valor es calculado sin necesidad de una transcripción de referencia (*Ground Truth*).

El puntaje de confianza (C) para cada unidad léxica es determinado durante la etapa de clasificación por la red neuronal recurrente específicamente una red neuronal de tipo LSTM (memoria de largo a corto plazo). Este valor es derivado de la probabilidad posterior de que la secuencia de caracteres reconocida corresponda a los patrones aprendidos durante el entrenamiento del modelo. Matemáticamente, el nivel de confianza de una palabra es obtenido a partir del promedio de las probabilidades de los caracteres individuales que la componen, siendo normalizado en una escala discreta de 0 a 100.

$$V_{ocr} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C(w_i) \quad (4.1)$$

El proceso de validación es estructurado de la siguiente manera:

Algoritmo 1 Algoritmo de Validación de Calidad OCR

Entrada: Imagen digital de entrada I_{in} **Salida:** Métrica de validación V_{ocr} ▷ **Paso 1: Extracción de Metadatos**1: $datos \leftarrow \text{image_to_data}(I_{in})$ 2: $suma_confianza \leftarrow 0$ 3: $N \leftarrow 0$

▷ Contador de palabras válidas

▷ **Paso 2: Filtrado de Ruido Estructural**4: **para todo** $bloque \in datos$ **do**5: $c \leftarrow \text{obtener_confianza}(bloque)$ 6: **si** $c \neq -1$ **then**

▷ Descartar si es ruido (-1)

7: $suma_confianza \leftarrow suma_confianza + c$ 8: $N \leftarrow N + 1$ 9: **end si**10: **end para**▷ **Paso 3: Cálculo del Promedio Ponderado**11: **si** $N > 0$ **then**12: $V_{ocr} \leftarrow \frac{1}{N} \sum C(w_i)$

▷ Aplicación de Ec. 4.1

13: **si no**14: $V_{ocr} \leftarrow 0$

▷ No se detectó texto válido

15: **end si**16: **retornar** V_{ocr}

De esta forma, la fiabilidad del sistema no es dejada a la apreciación subjetiva, sino que es fundamentada en la robustez estadística del clasificador del motor OCR. En el caso del OCR, se usó una forma cuantitativa para validar debido a que ya está incluida por defecto en Tesseract. Sin embargo, es un indicador meramente ilustrativo, puesto que no depende de forma directa del programa de conversión, sino de la fuente ingresada. Por lo tanto, la calidad de la conversión estará profundamente ligada a la calidad de la fuente; es decir, imágenes o PDFs adquiridos con factores externos favorables (buena iluminación, claridad en la imagen, etc.) darán mejores resultados. De igual forma, los caracteres no válidos se extraerán de la conversión. Puede ocurrir que, si la fuente no era de calidad, el dispositivo presente inconsistencias a la hora de representar el texto, debido a la posibilidad de que algunos caracteres no reconocidos correctamente se eliminen o se interpreten como otros distintos.

4.1. Discusión

4.1.1. Cálculo del Factor de Seguridad (FoS)

Para determinar la fiabilidad del mecanismo de actuación bajo condiciones de operación continua, se realizó un análisis del Factor de Seguridad (FoS). De acuerdo con los cálculos teóricos detallados en la metodología, se determinó que la fuerza continua máxima producida por el actuador lineal es de $F_{act} = 7.92$ N. Este valor se contrastó con los requerimientos de fuerza reportados en el estado del arte para interfaces hápticas. La literatura indica [39] que la fuerza promedio ejercida por el dedo humano durante la exploración táctil (lectura activa) oscila entre 0.5 N y 1.0 N. Sin embargo, para garantizar la legibilidad sin que el punto Braille colapse, se establece una fuerza de retención mínima crítica de aproximadamente 15 g-f (0.147 N). Considerando este último valor como la carga de diseño crítica (F_{req}) para asegurar la estabilidad del carácter, el factor de seguridad se calcula de la siguiente manera:

$$FoS = \frac{F_{act}}{F_{req}} = \frac{7.92 \text{ N}}{0.147 \text{ N}} \approx 53.87 \quad (4.2)$$

Un FoS resultante de 53.87 indica que el actuador opera a una fracción mínima ($< 2\%$) de su capacidad nominal. Desde la perspectiva de la mecánica de fatiga, operar en esta zona de bajo estrés reduce drásticamente el calentamiento por efecto Joule y el desgaste mecánico. Esto sugiere teóricamente que la vida útil del sistema se extiende significativamente más allá de los ciclos nominales especificados por el fabricante, validando la robustez del prototipo para soportar incluso presiones excesivas involuntarias por parte del usuario (hasta ≈ 800 g-f) sin sufrir daños estructurales ni pérdida de información táctil. Para evaluar la duración de la batería, se probó el dispositivo registrando la hora de inicio y utilizándolo hasta consumir en su totalidad la carga para registrar la hora de finalización. Esto demostró una autonomía promedio de aproximadamente 3 horas continuas de uso moderado, por lo que aún existe margen de mejora en este rubro. La comparativa entre carga y descarga se observa en la figura 4.3.

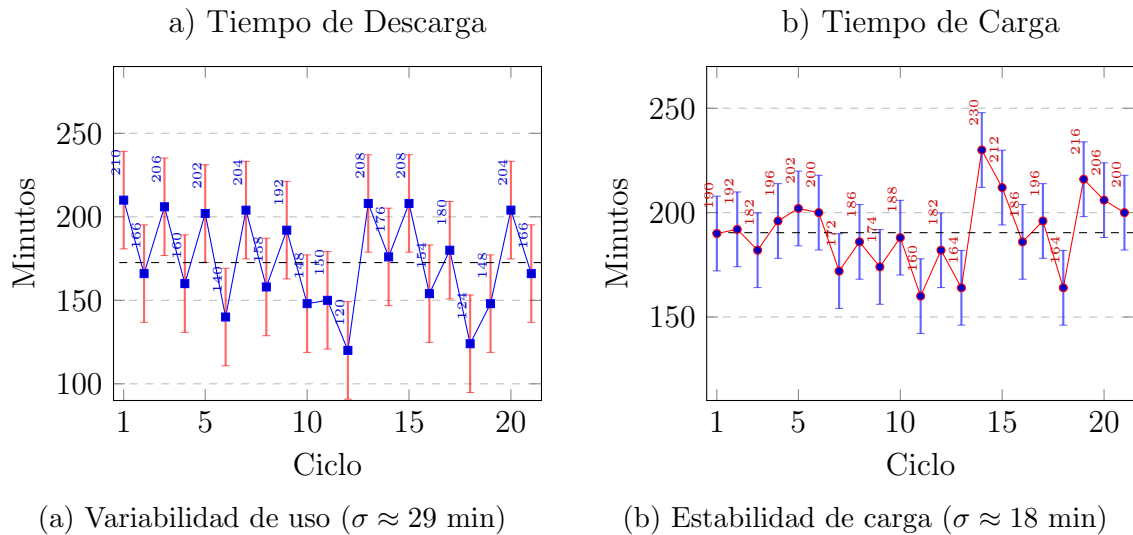


Figura 4.3: Comparativa de ciclos de energía.

La actualización de los caracteres se estableció en un segundo de avance por cada punto. Debido a las limitaciones del diseño del multiplexor, sólo se permite la activación punto por punto. Si bien esto puede ser considerado lento comparado con las alternativas del mercado, se puede considerar una opción aceptable enfocada a personas que comienzan a aprender Braille, posicionándose como un dispositivo de gama de entrada.

Finalmente, el dispositivo terminó con dimensiones de 18 cm de largo, 6 cm de alto y 8 cm de ancho. El diseño del prototipo se muestra en la Figura 4.4. No se descarta que en versiones posteriores se optimice el espacio para reducir su tamaño y, por ende, aumentar la portabilidad.

En cuanto al costo, se realizó el presupuesto para los materiales y componentes utilizados en el prototipo inicial. Cabe resaltar que estos costos podrían modificarse en versiones posteriores o reediciones, por lo que esta cotización no es fija; además, el tipo de cambio también puede causar variaciones a futuro. Para el prototipo inicial, se cotizó al tipo de cambio de 20.50 pesos por dólar, como se detalla en la Tabla 4.1.

El prototipo presenta una ventaja competitiva significativa en el costo, siendo más económico que su competidor más cercano (Orbit Reader 20)[33]. Si bien existen compromisos técnicos en cuanto a la altura del dispositivo (6 cm frente a los 3.5 cm del estándar) y la velocidad de actuación, estas características son aceptables considerando que el dispositivo está orientado a la accesibilidad en entornos educativos y de bajos recursos, donde el precio es la principal barrera de entrada.

En la Tabla 4.2 se comparan las características técnicas del prototipo contra los principales competidores del mercado.

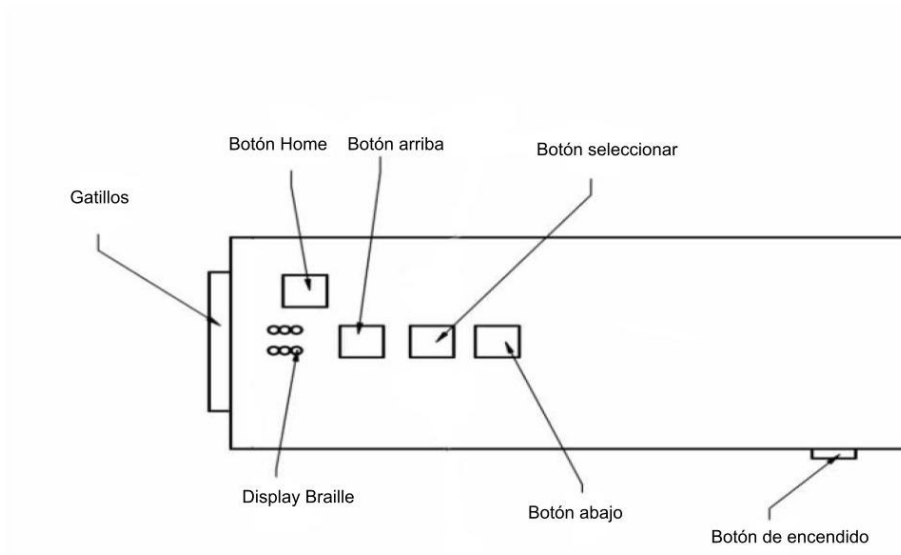


Figura 4.4: Prototipo visto desde arriba.

Tabla 4.1: Presupuesto Maestro de Manufactura (Lote: 1,000 Unidades)

Categoría	Material / Componente	Cant.	P. Unit (USD)	Costo/Disp.	Total Lote	Fuente Ideal
Cerebro	Raspberry Pi Zero 2W (Placa)	1	\$15.000	\$15.00	\$15,000	Official B2B
Motores	Motor DC N20 (Metal Gear)	6	\$0.650	\$3.90	\$3,900	Alibaba (Fábrica)
Energía	Batería 18650 (2500mAh Real)	1	\$1.850	\$1.85	\$1,850	Alibaba (EVE)
Circuitos	Driver DRV8833 (Chip IC)	3	\$0.280	\$0.84	\$840	Mouser / LCSC
Circuitos	Multiplexor 74HC4067 (Chip)	1	\$0.180	\$0.18	\$180	Mouser / LCSC
Circuitos	PCB Fabricada (SMT)	1	\$0.500	\$0.50	\$500	JLPCPB
Circuitos	Resistencias 10k (SMD 0805)	6	\$0.001	\$0.01	\$6	LCSC
Sensores	Switch Final de Carrera	2	\$0.040	\$0.08	\$80	Alibaba
Interfaz	Push Button (SMD)	4	\$0.005	\$0.02	\$20	LCSC
Mecánica	Jeringas 3ml (Industrial)	12	\$0.025	\$0.30	\$300	Alibaba (Med)
Mecánica	Manguera Silicón (20cm)	0.2 m	\$0.40/m	\$0.08	\$80	Alibaba
Fijación	Tornillos M4 (10mm)	6	\$0.003	\$0.02	\$18	Alibaba
Fijación	Tuercas M4 (Hexagonal)	6	\$0.002	\$0.01	\$12	Alibaba
Carcasa	Plástico Inyectado (ABS)	1	\$1.500	\$1.50	\$1,500	Inyectora
Empaque	Caja Cartón + Espuma	1	\$0.400	\$0.40	\$400	Local
SUBTOTAL	COSTO VARIABLE MATERIALES			\$24.69	\$24,686	
Inversión	Molde de Inyección (Amortizado)	1	\$3,500 tot	\$3.50	\$3,500	Tool Maker
TOTAL	COSTO UNITARIO REAL			\$28.19	\$28,186	

Tabla 4.2: Comparativa técnica del prototipo propuesto frente a dispositivos comerciales.

Característica	Prototipo (Propuesto)	Orbit Reader 20 (Bajo Costo)	Focus 14 Blue (Gama Alta)
Costo Estimado (MXN)	\$3,000	≈ \$14,000	≈ \$30,000
Dimensiones (cm)	18 × 8 × 6	16.8 × 10.9 × 3.5	19.5 × 7.8 × 1.9
Autonomía	≈3 horas	≈ 3 días	≈ 20 horas
Velocidad de Refresco	≈ 1.0 s por punto	< 0.5 s	Instantánea
Tecnología	Electromecánica	Signage Tech	Piezoeléctrica

Capítulo 5

Conclusiones

La presente investigación culminó con el desarrollo y construcción de un prototipo funcional capaz de convertir texto digital a lenguaje Braille, validando la viabilidad técnica de la propuesta. No obstante, el análisis del desempeño del dispositivo revela desafíos de diseño críticos, centrados principalmente en la arquitectura del sistema hidráulico y la integración electromecánica[35].

En términos de diseño mecánico y portabilidad, se identificó que la optimización dimensional es imperativa. Si bien el enfoque de fácil manufactura fue exitoso, la reducción del volumen total del dispositivo requiere una reingeniería de los actuadores lineales. Específicamente, es necesario reducir la longitud de los pistones para disminuir la altura final del chasis. Asimismo, se propone una modificación en la transmisión de potencia mediante el rediseño del tornillo sin fin; al aumentar el paso de la rosca (lead), se logrará un mayor desplazamiento lineal por revolución, lo que no sólo mejorará la velocidad de respuesta, sino que permitirá acortar la longitud del tornillo, optimizando así el espacio horizontal del sistema.

Respecto al control y velocidad de actualización, el uso actual de un multiplexor presenta limitaciones en la tasa de refresco de los caracteres. Para superar esta barrera, se plantea una arquitectura de control alternativa que permita la activación simultánea de los actuadores, eliminando la latencia inherente a la multiplexación secuencial. Esta mejora en la velocidad de escritura no sólo refinará la experiencia de lectura estándar, sino que ampliará la versatilidad del dispositivo hacia una representación multilenguaje. Esto abriría la puerta a la visualización de idiomas con sistemas de escritura complejos, como el japonés o el chino, los cuales requieren la concatenación rápida de caracteres o el uso de celdas dobles para su correcta interpretación.

En cuestión a la autonomía del dispositivo cabe resaltar que aún admite mejoras debido a que las pruebas demostraron un tiempo más largo de carga que el de descarga. Se sugiere ampliar la capacidad de la batería o reemplazar el módulo de carga por alguna opción que permita una disminución en los tiempos de carga.

Finalmente, en cuanto al procesamiento de datos, se contempla la transición hacia un microprocesador de mayor potencia que faculte el procesamiento de texto de forma embebida, reduciendo la

dependencia de software externo. Sin embargo, esta mejora tecnológica debe ponderarse cuidadosamente frente al objetivo fundacional del proyecto: mantener un bajo costo de fabricación. El reto futuro reside, por tanto, en equilibrar el incremento en la capacidad de cómputo con la accesibilidad económica, asegurando que el dispositivo se mantenga como una solución competitiva y asequible para el usuario final.

Bibliografía

- [1] Iso general purpose metric screw threads – general plan. 1998. Define las combinaciones de diámetro y paso (ej. M4 x 0.7). Aunque es una norma antigua, sigue siendo la referencia principal citada por las normas más nuevas.
- [2] Electroactive polymer actuator braille cell and display. 2005. URL <https://patents.google.com/patent/US6881063B2/en>. Acceso: 7 de octubre de 2025.
- [3] Iso general purpose metric screw threads – tolerances – part 1: Principles and basic data. 2013. Define las tolerancias de la rosca (ej. 6g). Existe una enmienda de 2021 (Amd 1:2021).
- [4] Actuation mechanism for braille displays. 2014. URL <https://patents.google.com/patent/US8770981B2/en>. Acceso: 7 de octubre de 2025.
- [5] Iso general purpose screw threads – basic and design profiles – part 1: Metric screw threads. 2023. Define el perfil de la rosca métrica (forma de V a 60°).
- [6] Darcy–weisbach equation. https://en.wikipedia.org/wiki/Darcy%E2%80%93Weisbach_equation, 2025. Acceso: octubre 21, 2025.
- [7] Fórmulas y tablas tornillos de potencia 211018. <https://es.scribd.com/document/479917262/Formulas-y-Tablas-Tornillos-de-Potencia-211018>, 2025. Acceso: octubre 21, 2025.
- [8] Tactile reading aid (e.g., braille, etc.) patents and patent applications (class 434/113). <https://patents.justia.com/patents-by-us-classification/434/113?page=3>, 2025. Acceso: 7 de octubre de 2025.
- [9] Tornillo de potencia. <https://www.eumed.net/libros-gratis/ciencia/2013/14/tornillo-ponencia.html>, 2025. Acceso: octubre 21, 2025.
- [10] Unidad 2 diseño mecánico. <https://es.scribd.com/document/717846897/Unidad-2-Diseno-Mecanico>, 2025. Acceso: octubre 20, 2025.

-
- [11] Unidad 8 - tornillos shigley elementos-2.pdf. <https://es.slideshare.net/slideshow/unidad-8-tornillos-shigley-elementos-2-pdf/270029157>, 2025. Acceso: octubre 20, 2025.
- [12] Oliver Almaraz. Braille: signografía básica del español. Udeemy, 2024.
- [13] Gemma Carolina Bettelani, Giuseppe Averta, Manuel Giuseppe Catalano, Barbara Leporini, y Matteo Bianchi. Design and validation of the readable device: a single-cell electromagnetic refreshable braille display. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2):2656–2663, 2020. doi: 10.1109/LRA.2020.2975536.
- [14] Bristol Braille Technology. About canute 360. <https://bristolbraille.org/about-canute/>, s.f. Consultado el 14 de agosto de 2025.
- [15] BYJU'S. Darcy weisbach equation derivation. <https://byjus.com/physics/darcy-weisbach-equation-derivation/>, 2025. Acceso: octubre 21, 2025.
- [16] Comisión Braille Española. Documentos técnicos relacionados con el braille. Web de la ONCE, 2025. URL <https://www.once.es/servicios-sociales/braille/comision-braille-espanola/documentos-tecnicos/documentos-tecnicos-relacionados-con-el-braille>. Página web que recopila los estándares técnicos vigentes de la CBE.
- [17] Desconocido. Experimental evaluation of a braille-reading-inspired finger motion adaptive algorithm. *PMC*, 2016. Acceso: 7 de octubre de 2025.
- [18] dr. mohamed seif. Power screws and threaded fasteners. <https://www.dr-seif.com/content/ME425-H05.pdf>, 2025. Acceso: octubre 21, 2025.
- [19] Engineering Statics. 9.4 screw threads. https://engineeringstatics.org/Chapter_09-screw-friction.html, 2025. Acceso: octubre 21, 2025.
- [20] Engineers Edge. Power screws design equation and calculator. https://www.engineersedge.com/mechanics_machines/power_screws_design_13982.htm, 2025. Acceso: octubre 21, 2025.
- [21] Experimenta. Dot watch, el reloj de pulsera inteligente para personas con discapacidad visual. <https://experimenta.es/noticias/producto-diseno/dot-watch-reloj-pulsera-inteligente-personas-discapacidad-visual/>, 2017.
- [22] Freedom Scientific. Focus 14 blue 5th gen – ultra-portable braille display. <https://www.freedomscientific.com/Products/Blindness/Focus14BrailleDisplay/>, s.f. Consultado el 14 de agosto de 2025.

- [23] Rong-Fong Fung y Shih-Ching Huang. Touching force response of the piezoelectric braille cell. En *2007 IEEE International Conference on Mechatronics*, págs. 1–6. 2007.
- [24] Carlos García Torres y Ma. Sabina Ruiz Chavarría. La ley de boyle, el análisis de dos experimentos. *Latin-American Journal of Physics Education*, 4(Extra 1):957–962, 2010. ISSN 1870-9095. URL <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3700377.pdf>.
- [25] Blitab Technology GmbH. Blitab – the world’s first tactile tablet for blind and visually impaired people. <https://blitab.com/>.
- [26] Hackaday. Refreshable braille display and braille keyboard. <https://hackaday.com/2016/04/28/refreshable-braille-display-and-braille-keyboard/>, 2016. Acceso: 7 de octubre de 2025.
- [27] Hackaday.io. Refreshable braille display. <https://hackaday.io/project/10849-refreshable-braille-display>, 2025. Acceso: 7 de octubre de 2025.
- [28] Jakub Kaczorowski et al. Analysis of stability and functionality of coil and piezoelectric braille modules under varying temperature conditions. *Micromachines*, 16(10):1112, 2025. Prospective publication date based on snippet.
- [29] Liceo Industrial de Angol. Pernos, roscas, tornillos, dureza. <https://industrialangol.cl/wp-content/uploads/recursos/Sujeciones%20apernadas.pdf>, 2025. Acceso: octubre 20, 2025.
- [30] E. Matheson. Current developments in refreshable braille display technology. *RESNA*, 2009. URL <https://www.resna.org/sites/default/files/legacy/conference/proceedings/2009/TechnologyCognitiveSensory/Matheson.html>. Acceso: 6 de octubre de 2025.
- [31] E. Matheson. Current developments in refreshable braille display technology. En *RESNA 2009 Annual Conference Proceedings*. RESNA, 2009. Acceso: 7 de octubre de 2025.
- [32] Omnicalculator. Darcy weisbach calculator. <https://www.omnicalculator.com/physics/darcy-weisbach>, 2025. Acceso: octubre 21, 2025.
- [33] Orbit Research. Orbit reader 20 – braille display, book reader and note-taker. <https://www.orbitresearch.com/product/orbit-reader-20/>, s.f. Consultado el 14 de agosto de 2025.
- [34] Raoul Parienti. Dispositivo portátil de lectura para ciegos. 2004. URL <https://patents.google.com/patent/ES2202570T3/en>. Spanish Patent.
- [35] Paulo César Rodríguez Cuevas. Dispositivo de conversión braille. <https://github.com/Paulo2244/Dispositivo-de-conversi-n-braille>, 2026. Consultado: 2026-02-08.

-
- [36] Sandvik Coromant. Fórmulas y definiciones de roscado. <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/machining-formulas-definitions/threading-formulas-definitions>, 2025. Acceso: octubre 20, 2025.
- [37] A. S. Shibghatullah, S. R. M. Ayub, M. F. M. Fesol, y N. A. M. Jamlus. Development of piezoelectric braille cell control for blind person. En *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, tomo 9, págs. 40–49. 2010. ISSN 1109-2734. URL <https://www.wseas.us/e-library/transactions/circuits/2010/89-677.pdf>. Acceso: 6 de octubre de 2025.
- [38] TopsBest Precision. Lo que todo ingeniero necesita saber sobre el diseño de roscas de tornillos mecánicos. <https://topsbest-precision.com/es/blog/machine-screw-thread-design/>, 2025. Acceso: octubre 20, 2025.
- [39] Ramiro Velázquez. Wearable assistive devices for the blind: A state-of-the-art survey. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 40(6):611–618, 2010. Ver sección III. Braille Displays Requirements.