

## Tabla de contenido

RESUMEN.....	2
CAPÍTULO 1. Introducción.....	3
CAPÍTULO 2. Marco teórico.....	9
CAPITULO 3. Desarrollo .....	18
CAPÍTULO 4. Resultados.....	26
CAPÍTULO 5. Conclusiones.....	30
REFERENCIAS .....	33
LISTA DE FIGURAS .....	35
LISTA DE TABLAS .....	36
ANEXO 1 .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
ANEXO 2 .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## RESUMEN

El presente trabajo describe el desarrollo de un sistema automatizado de traducción de voz a Braille, implementado mediante la reutilización de los mecanismos mecánicos y ópticos de una impresora de inyección de tinta convencional. El sistema integra reconocimiento automático de voz, traducción a código Braille, generación de coordenadas de posicionamiento y un sistema de control de movimiento en lazo cerrado basado en encoders ópticos originales de la impresora. El hardware de control consiste en un microcontrolador Arduino Uno, un puente H L298N, los motores DC originales del equipo y una fuente de alimentación de 15 V. El control de posición implementa un algoritmo proporcional-derivativo (PD) que incorpora estrategias de posicionamiento FAST/FINE, compensación de backlash, zona muerta (deadband) y limitador de velocidad (soft-stop), con el objetivo de reducir oscilaciones y mejorar la repetibilidad del posicionamiento. Las pruebas de desplazamiento lineal evidenciaron que 30 pulsos del encoder del cabezal equivalen a aproximadamente 2.5 mm y que 100 pulsos del encoder del sistema de engranajes equivalen a la misma distancia, lo que permitió establecer relaciones lineales de conversión de pulsos a milímetros. El error de posicionamiento obtenido experimentalmente es de  $\pm 3$  pulsos del encoder. Al momento de la redacción del presente documento, el sistema se encuentra en fase de optimización e integración del módulo de embossing Braille. Los resultados preliminares demuestran la viabilidad técnica del enfoque de reutilización de hardware como estrategia de reducción de costos y de impacto ambiental en el desarrollo de dispositivos de asistencia para personas con discapacidad visual.

**Palabras clave:** Braille, control PD, encoder óptico, impresora reutilizada, posicionamiento en lazo cerrado, reconocimiento de voz, sistemas embebidos, tecnología de asistencia.

## **Capítulo 1. Introducción**

El siguiente esquema pretende apoyar al estudiante en la redacción de su trabajo de titulación para obtener el título de ingeniería o maestría de la Escuela de Ingeniería de la Universidad Modelo. Cada uno de los capítulos deberá empezar con una breve introducción de lo que se refiere el contenido del mismo y en una hoja aparte, dejar dos espacios a partir del margen superior para indicar el inicio del nuevo capítulo.

### **1.1 Antecedentes**

El sistema Braille, creado por Louis Braille en 1824, constituye hasta la actualidad el principal método de comunicación escrita táctil para personas con discapacidad visual (Mackenzie, 1954). La celda Braille se compone de seis puntos en relieve distribuidos en una matriz de dos columnas y tres filas, cuyas 64 combinaciones posibles permiten representar el alfabeto, los dígitos, signos de puntuación y símbolos especiales. A pesar de su relevancia histórica y pedagógica, se estima que menos del 10% de las personas con discapacidad visual en el mundo saben leer Braille (Martiniello et al., 2020), lo que evidencia barreras considerables en el acceso a la enseñanza de este sistema.

En México, el censo de población y vivienda de 2020 registró 7 millones de personas con algún tipo de discapacidad, de las cuales 466,178 presentan discapacidad visual o auditiva combinada (INEGI, 2020). En la ciudad de Mérida, Yucatán, se estima una población de aproximadamente 23,900 personas con discapacidad visual, lo que representa una demanda significativa de soluciones de comunicación y aprendizaje accesibles. El alto costo de los

embossers Braille comerciales que puede superar varios miles de dólares limita severamente el acceso individual a estos dispositivos y, por consecuencia, restringe la autonomía comunicativa de esta población (Hoskin et al., 2022).

En el ámbito de la tecnología de asistencia, diversos trabajos académicos han explorado alternativas de bajo costo para la traducción automática de texto y voz a Braille. Herrera, Carreras y Nava (2024) presentaron un sistema de traducción de voz a Braille basado en la reutilización de una impresora convencional, empleando un Arduino Uno como unidad de control central y reconocimiento automático de voz mediante Python, con el que obtuvieron una precisión de transcripción del 100% en ambientes silenciosos. Villavicencio-López (2022) desarrolló un dispositivo electrónico de aprendizaje del alfabeto con traducción de voz a Braille, mientras que trabajos con plataformas Raspberry Pi han explorado sistemas de conversión bidireccional entre Braille y texto hablado (Grenze International Journal of Engineering and Technology [GIJET], 2024). En el ámbito de los sistemas embebidos de mayor capacidad de procesamiento, se han implementado sistemas de libro Braille en tiempo real que integran procesamiento de señales de voz y retroalimentación táctil (Journal of Advances in Information Technology [JAIT], 2023). Sin embargo, la mayoría de estas propuestas no incorporan sistemas de control de posicionamiento en lazo cerrado con retroalimentación por encoder, lo que limita la precisión y repetibilidad del posicionamiento del cabezal de embossing sobre la matriz Braille.

## **1.2 Planteamiento del problema**

La enseñanza del sistema Braille requiere de material didáctico generado en tiempo real, con dimensiones precisas y reproducibles que cumplan los estándares establecidos por la Braille Authority of North America (BANA, 2009) y la norma ISO 17049. El costo prohibitivo de las impresoras Braille comerciales impide su adquisición individual o institucional en contextos de recursos limitados, mientras que los dispositivos de bajo costo basados en motores paso a paso, aunque más accesibles, presentan limitaciones en la gestión del backlash mecánico, las vibraciones y la estabilidad de posicionamiento a velocidades operativas aceptables.

Por otro lado, la reutilización de hardware de impresión convencional representa una oportunidad para aprovechar la infraestructura mecánica y óptica ya incorporada en estos equipos incluyendo encoders ópticos de alta resolución, rieles de guía, motores DC y sistemas de arrastre de papel como plataforma para el desarrollo de sistemas de posicionamiento de bajo costo con retroalimentación de posición. El reto técnico consiste en diseñar e implementar una arquitectura de control que, sobre este hardware reutilizado, logre la precisión de posicionamiento necesaria para la impresión de la matriz Braille, que exige una resolución del orden de los 2.5 mm entre puntos adyacentes dentro de una celda.

En consecuencia, el problema central que este trabajo aborda es: ¿Es posible desarrollar un sistema automatizado de posicionamiento en lazo cerrado, basado en encoders ópticos reutilizados y un controlador PD implementado en Arduino Uno, que permita alcanzar la precisión de desplazamiento requerida para la generación de caracteres Braille sobre papel, integrando además una cadena de procesamiento de voz a texto y de texto a coordenadas Braille?

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo general***

Desarrollar un prototipo automatizado de traducción de voz a Braille que apoye el aprendizaje inicial del sistema Braille, mediante la conversión de mensajes orales en representaciones táctiles sobre papel utilizando una impresora convencional reutilizada.

### ***1.3.2 Objetivos específicos***

Adaptar y reutilizar los mecanismos de desplazamiento y arrastre de una impresora convencional para permitir la generación de patrones correspondientes al sistema Braille.

Implementar un sistema de control de posicionamiento para coordinar el movimiento del cabezal y el avance de la hoja durante la representación de caracteres Braille.

Desarrollar el proceso de conversión de voz a texto y de texto a Braille para generar patrones físicos que funcionen como apoyo al aprendizaje del sistema Braille.

## **1.4 Justificación**

La propuesta presentada en este trabajo responde a tres ejes de justificación. En primer lugar, desde la perspectiva de la inclusión educativa, el desarrollo de herramientas tecnológicas accesibles para la producción de material Braille contribuye directamente a reducir las barreras de comunicación que enfrentan las personas con discapacidad visual, cuya prevalencia en Mérida supera las 23,900 personas. La autonomía comunicativa y educativa de este sector de la población constituye una prioridad de salud pública y de derechos humanos.

En segundo lugar, desde la perspectiva tecnológica, la reutilización del hardware de impresión convencional permite aprovechar la infraestructura mecánica y óptica de precisión incorporada en estos equipos que de otro modo serían desechados reduciendo significativamente los costos de desarrollo respecto a una solución construida desde cero. El costo total de los componentes electrónicos nuevos añadidos en el prototipo descrito por Herrera et al. (2024) fue de \$783 MXN, frente a los varios miles de dólares que puede costar un embosser Braille comercial.

En tercer lugar, desde la perspectiva de la ingeniería de control, la implementación de un sistema de posicionamiento en lazo cerrado con encoders ópticos sobre un hardware de

bajo costo no diseñado originalmente para este fin representa un aporte metodológico relevante, que puede ser replicado y extendido a otros contextos de automatización con recursos limitados. La caracterización experimental de la relación pulsos/mm y el diseño del controlador PD con estrategias de suavizado de movimiento constituyen contribuciones técnicas documentadas en este trabajo.

### **1.5 Método**

La metodología adoptada en este proyecto es de tipo aplicada y experimental, orientada al desarrollo de un prototipo funcional. El proceso se estructuró en las siguientes fases: (1) investigación bibliográfica y análisis del sistema Braille, incluyendo sus estándares dimensionales y métodos de embossing; (2) desarmado de una impresora de inyección de tinta de medio uso e identificación de los componentes mecánicos y ópticos reutilizables; (3) caracterización experimental de los encoders ópticos para establecer la relación pulsos/mm en cada eje; (4) diseño e implementación del algoritmo de control PD sobre Arduino Uno con puente H L298N; (5) desarrollo del software de conversión de voz a texto y de texto a coordenadas Braille; y (6) evaluación del desempeño del sistema de posicionamiento mediante pruebas de desplazamiento lineal repetitivo. Cada fase fue sujeta a ajustes iterativos a partir de los resultados obtenidos en las pruebas experimentales.

### **1.6 Esquema general**

El Capítulo 2 presenta el marco teórico que fundamenta el sistema desarrollado, abarcando los principios del sistema Braille, los estándares dimensionales de la celda Braille, los encoders ópticos incrementales, el control PD, el PWM, los puentes H, el Arduino Uno, el reconocimiento automático de voz y los fenómenos mecánicos relevantes como el backlash y la zona muerta.

El Capítulo 3 describe en detalle el proceso de desarrollo del prototipo, desde el desarmado de la impresora y la identificación de componentes reutilizables, hasta la integración electrónica, la arquitectura del software de control, la implementación del algoritmo PD y las estrategias de posicionamiento adoptadas.

El Capítulo 4 presenta y analiza los resultados obtenidos en las pruebas de desplazamiento lineal, incluyendo la relación pulsos/mm determinada experimentalmente, el

error de posicionamiento registrado y las observaciones sobre el comportamiento del controlador PD.

El Capítulo 5 concentra las conclusiones derivadas del trabajo, la discusión comparativa con la literatura existente y los trabajos futuros identificados para la continuación y optimización del sistema.

## Capítulo 2.

### MARCO TEÓRICO

Este capítulo presenta los fundamentos teóricos que sustentan el sistema desarrollado. Se abordan en secuencia el sistema Braille y sus estándares dimensionales, los mecanismos de embossing, los encoders ópticos, el control en lazo cerrado, el algoritmo PD, el PWM, los puentes H, la plataforma Arduino Uno, el reconocimiento automático de voz y los fenómenos mecánicos de backlash y zona muerta.

#### 2.1 El sistema Braille

El sistema Braille fue concebido por el educador francés Louis Braille en 1824 como un código táctil para facilitar la lectura y escritura de personas con discapacidad visual (Mackenzie, 1954; Simón et al., 1995). El sistema se basa en una celda de seis puntos dispuestos en dos columnas y tres filas, numerados del 1 al 6: los puntos 1, 2 y 3 ocupan la columna izquierda de arriba hacia abajo, y los puntos 4, 5 y 6 ocupan la columna derecha en el mismo orden. Las 64 combinaciones posibles de presencia o ausencia de punto en cada posición incluyendo la celda vacía permiten representar las letras del alfabeto, los dígitos mediante un indicador numérico previo, los signos de puntuación y una amplia variedad de símbolos especiales (ONCE, s.f.).

Para el español, la Organización Nacional de Ciegos Españoles (ONCE) y la Unión Mundial de Ciegos han estandarizado las tablas de correspondencia entre el alfabeto latino y las celdas Braille, incluyendo vocales acentuadas (á, é, í, ó, ú), la letra ñ y la diéresis. El sistema implementado en el presente proyecto emplea el Braille de Grado I, en el que existe una correspondencia biunívoca entre cada carácter del texto fuente y su celda Braille, sin contracciones ni abreviaciones; esta decisión facilita la verificación de la traducción y resulta adecuada para el contexto de aprendizaje inicial del sistema (ONCE, s.f.).

Una característica fundamental que el software debe contemplar es la diferencia entre la orientación de escritura y de lectura en Braille. Cuando se escribe mecánicamente sobre el anverso del papel, los puntos se producen en relieve hacia arriba; sin embargo, la lectura táctil se realiza sobre el reverso de la hoja, donde los puntos sobresalen hacia el lector. En la Figura 1 se muestra esta diferencia entre la orientación de escritura y la de lectura. Esto implica que la imagen de cada celda debe ser invertida especularmente en el eje horizontal antes de ser producida sobre el papel, de modo que al voltear la hoja el patrón de puntos corresponda correctamente al carácter deseado.

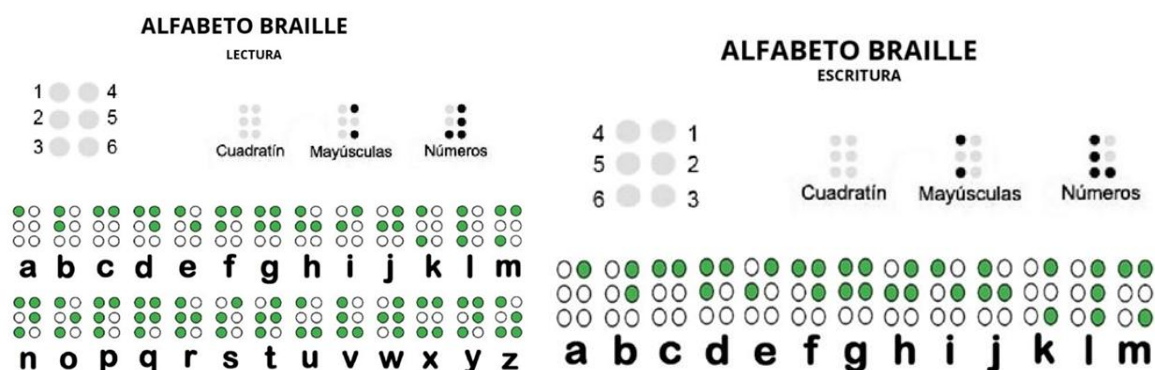


Figura 1. Representación del alfabeto Braille (lectura de izquierda a derecha) y su equivalente en escritura, que debe invertirse especularmente al producirse en el anverso del papel.

## 2.2 Estándares dimensionales del Braille

La legibilidad táctil del Braille depende del cumplimiento riguroso de las dimensiones de la celda. La Braille Authority of North America (BANA, 2009) establece los siguientes parámetros nominales: diámetro de base de punto entre 1.5 y 1.6 mm; distancia entre centros de puntos adyacentes dentro de la misma celda entre 2.3 y 2.5 mm; distancia entre el punto 1 de una celda y el punto 1 de la celda adyacente en la misma línea entre 6.1 y 7.6 mm; altura mínima del punto en relieve de 0.6 mm; y distancia entre líneas Braille consecutivas de 10.0 a 10.2 mm (BANA, 2009).

La norma ISO 17049 referenciada en contextos internacionales y en los estándares de accesibilidad de la Americans with Disabilities Act (ADA) especifica parámetros similares: distancia entre centros de puntos adyacentes dentro de la misma celda de 2.5 mm; distancia entre celdas consecutivas en la misma línea de 6.0 mm; interlineado de 10.0 mm; y altura

mínima del punto en relieve de 0.3 mm para garantizar su percepción táctil. En la Figura 2 se observan las dimensiones normalizadas de la celda Braille. Estas dimensiones constituyeron los parámetros de diseño del sistema de posicionamiento desarrollado y los criterios de evaluación en las pruebas de calidad de impresión.

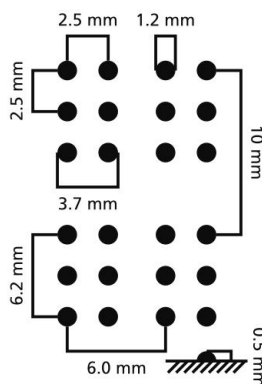


Figura 2. Dimensiones estándar de la celda Braille según norma ISO 17049: distancia entre puntos (2.5 mm), entre celdas (6.0 mm) y entre líneas (10.0 mm).

La precisión de posicionamiento requerida implica que el sistema de control debe ser capaz de desplazar el cabezal y el papel con una resolución mínima del orden de 0.5 mm o menor, de modo que los errores de posicionamiento acumulados no excedan los márgenes tolerados por los estándares. Esta exigencia motivó la adopción de un sistema de retroalimentación por encoder óptico y un algoritmo de control en lazo cerrado.

### 2.3 Embossing Braille

El proceso de embossing Braille consiste en la deformación plástica localizada del papel mediante la aplicación de una fuerza puntual que produce un punto en relieve con las dimensiones especificadas por los estándares. En las impresoras Braille comerciales, este proceso se realiza mediante pines metálicos accionados por solenoides o por mecanismos electromagnéticos de alta velocidad (Herrera et al., 2024; Duarte-Barón et al., 2016). La calidad del punto embossed depende de la fuerza aplicada, el perfil del pin de embossing, el gramaje del papel y la velocidad de accionamiento del solenoide.

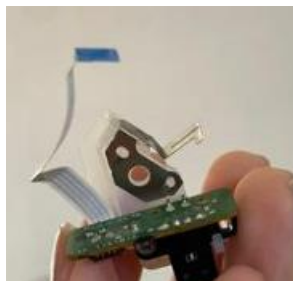
En el contexto del presente proyecto, el mecanismo de embossing se diseña como un solenoide montado sobre el carro del cabezal de la impresora reutilizada. El solenoide debe

proporcionar la fuerza suficiente para deformar el papel a la altura mínima especificada, sin dañar la estructura del mecanismo de arrastre. La integración del solenoide con el sistema de posicionamiento requiere una sincronización precisa: el cabezal debe detenerse completamente en la posición objetivo antes de que el solenoide sea accionado, a fin de evitar la deformación fuera de posición que reduciría la legibilidad del carácter Braille.

## 2.4 Encoders ópticos incrementales

Un encoder óptico incremental es un transductor de posición que convierte el movimiento lineal o rotacional en una secuencia de pulsos eléctricos digitales. Su principio de funcionamiento se basa en la interrupción periódica de un haz de luz infrarroja por un elemento codificador que puede ser un disco ranurado, una rueda dentada o una banda lineal con marcas impresas interposicionado entre un emisor óptico y un fototransistor receptor. Cada interrupción del haz genera un flanco de subida o de bajada en la señal de salida, que es contado por el microcontrolador para determinar el desplazamiento relativo desde la posición de referencia (Braille Refreshable Display, 2023).

En el sistema desarrollado se reutilizan los dos encoders ópticos originales de la impresora. El encoder del sistema de engranajes emplea un disco transparente ranurado montado sobre el eje del motor de arrastre de papel; sus pulsos permiten controlar el avance de la hoja en el eje Y. En la Figura 3 se muestra el principio de funcionamiento del encoder óptico de disco ranurado. El encoder del cabezal emplea una banda lineal óptica con marcas periódicas adherida al riel; un sensor óptico fijo en el carro del cabezal lee las marcas a medida que el cabezal se desplaza sobre el eje X. La resolución de cada encoder, expresada en pulsos por milímetro, se determinó experimentalmente mediante pruebas de desplazamiento lineal medido con calibrador, obteniéndose que 30 pulsos del encoder del cabezal equivalen a 2.5 mm y que 100 pulsos del encoder del sistema de engranajes equivalen a la misma distancia.



*Figura 3. Encoder óptico de disco ranurado reutilizado del sistema de engranajes, utilizado para la retroalimentación de posición en el eje Y.*

La señal de salida de estos encoders es de tipo digital, compatible con los pines de interrupción del Arduino Uno. Las interrupciones hardware del microcontrolador se emplean para la lectura de pulsos, garantizando que ningún flanco sea ignorado incluso a velocidades de desplazamiento elevadas. Las variables de posición se actualizan en la rutina de servicio de interrupción (ISR), declaradas como volátiles para asegurar la consistencia de los datos entre el contexto de interrupción y el bucle principal del programa.

## **2.5 Sistemas de control en lazo cerrado**

Un sistema de control en lazo cerrado es aquel en el que la señal de salida en este caso, la posición del cabezal o del papel es medida y comparada con la referencia deseada para generar una señal de corrección que actúa sobre la planta a través del actuador. El error de posición  $e(t)$  se define como la diferencia entre la posición de referencia  $r(t)$  y la posición medida  $y(t)$ :  $e(t) = r(t) - y(t)$ . La retroalimentación de posición permite que el sistema corrija desviaciones causadas por perturbaciones mecánicas, variaciones de carga o imprecisiones del modelo de la planta (Herrera et al., 2024; GIJET, 2024).

En contraste con los sistemas en lazo abierto en los que el número de pasos o pulsos de comando se calcula a priori sin verificación de la posición real, el lazo cerrado con encoder garantiza que el actuador continúe operando hasta que la posición medida converja a la referencia dentro de una tolerancia definida. Esta propiedad es especialmente relevante cuando el sistema presenta backlash mecánico, variaciones de fricción o cambios de carga, todos ellos presentes en los mecanismos de transmisión de las impresoras convencionales reutilizadas.

## **2.6 Control proporcional-derivativo (PD)**

El controlador proporcional-derivativo (PD) genera una señal de acción de control  $u(t)$  compuesta por dos términos: el término proporcional, proporcional al error actual  $e(t)$ , y el término derivativo, proporcional a la tasa de cambio del error  $de/dt$ . La expresión general del controlador PD en tiempo continuo es:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_d \cdot (de/dt)$$

donde  $K_p$  es la ganancia proporcional y  $K_d$  es la ganancia derivativa. El término proporcional proporciona una acción de control rápida en función del error instantáneo, mientras que el término derivativo actúa como un amortiguador predictivo que reduce la velocidad de respuesta cuando el error disminuye rápidamente, previniendo el sobreimpulso y las oscilaciones en torno a la referencia (Herrera et al., 2024; JAIT, 2023).

La ausencia del término integral en este diseño es una decisión deliberada. Dado que el sistema de posicionamiento opera en ciclos discretos de movimiento hacia posiciones definidas y no en seguimiento continuo de una referencia variable el error estacionario puede ser manejado mediante la compensación de backlash y la zona muerta, sin necesidad de un integrador que podría introducir wind-up e inestabilidad en el contexto de un microcontrolador de 8 bits con capacidad computacional limitada. Esta elección ha sido reportada en sistemas similares de control de posición con encoders ópticos en plataformas de bajo costo.

En la implementación digital sobre Arduino Uno, el controlador PD se discretiza con un período de muestreo  $T$  definido por el ciclo del bucle de control. El término derivativo se aproxima por diferencias hacia atrás:  $K_d \cdot (e[k] - e[k-1]) / T$ , donde  $e[k]$  y  $e[k-1]$  son el error en el ciclo actual y en el ciclo anterior, respectivamente. La salida del controlador se mapea a un valor de ciclo de trabajo del PWM, limitado por el limitador de velocidad implementado en software.

## **2.7 Modulación por ancho de pulso (PWM)**

La modulación por ancho de pulso (PWM) es una técnica de control de potencia en la que la frecuencia de una señal cuadrada se mantiene constante mientras que el ancho del pulso activo y por tanto el ciclo de trabajo  $D = t_{on} / T$  varía en proporción a la señal de referencia. En el control de motores DC, el valor medio de tensión entregada al motor es proporcional al ciclo de trabajo:  $V_{media} = D \cdot V_{alimentación}$ . De este modo, variando  $D$  entre 0 y 1 es posible controlar la velocidad del motor de forma continua sin la disipación de potencia asociada al control lineal por resistencia variable.

En el Arduino Uno, las salidas PWM se generan por hardware mediante los timers internos del microcontrolador ATmega328P, con una resolución de 8 bits (256 niveles de ciclo de trabajo) y una frecuencia nominal de 490 Hz en los pines 3, 9, 10 y 11, y de 980 Hz en los pines 5 y 6. La función `analogWrite(pin, valor)` de la biblioteca estándar de Arduino permite

escribir directamente el valor de ciclo de trabajo en el rango 0–255. El puente H L298N recibe la señal PWM y la señal de dirección del Arduino para controlar la velocidad y el sentido de giro de cada motor DC.

## **2.8 Puente H L298N**

El puente H es un circuito de potencia que permite controlar el sentido de la corriente que circula por una carga inductiva en este caso, un motor DC mediante cuatro interruptores de estado sólido organizados en una configuración en H. Al cerrar los interruptores de la diagonal principal, la corriente fluye en un sentido; al cerrar los de la diagonal opuesta, la corriente se invierte, lo que invierte el sentido de giro del motor. La señal PWM aplicada al pin de habilitación del puente H controla el ciclo de trabajo de la corriente, y por tanto la velocidad media del motor.

El módulo L298N incorpora dos puentes H completos capaces de controlar dos motores DC de forma independiente, con una corriente continua máxima de 2 A por canal y una tensión de alimentación de la etapa de potencia de hasta 46 V. La caída de tensión interna del L298N en las juntas de los transistores bipolares que lo componen es de aproximadamente 1.5–2 V, lo que reduce la tensión efectiva entregada al motor respecto a la tensión de alimentación. Esta característica motivó la selección de una fuente de alimentación de 15 V en lugar de los 12 V nominales de los motores originales de la impresora, con el objeto de compensar dicha caída y garantizar un par suficiente en todo el rango de velocidades.

## **2.9 Arduino Uno**

El Arduino Uno es una plataforma de prototipado electrónico de código abierto basada en el microcontrolador ATmega328P, que opera a 5 V y a una frecuencia de reloj de 16 MHz. Dispone de 14 pines digitales de entrada/salida de los cuales 6 admiten salida PWM, 6 entradas analógicas, 32 KB de memoria Flash para el programa, 2 KB de SRAM y 1 KB de EEPROM. Su interfaz de comunicación USB facilita la programación y la comunicación serial con la computadora host que ejecuta el software de reconocimiento de voz y traducción Braille.

El ATmega328P dispone de dos interrupciones hardware externas (INT0 e INT1) en los pines 2 y 3, y de interrupciones de cambio de estado de pin (PCINT) en todos los pines

digitales. En el sistema desarrollado, las señales de los encoders ópticos se conectan a los pines de interrupción para garantizar la captura de todos los flancos a alta velocidad, sin depender del ciclo del bucle principal, cuyo tiempo de ejecución es variable en función de la carga computacional del algoritmo de control.

## **2.10 Reconocimiento automático de voz**

El reconocimiento automático de voz (ASR, Automatic Speech Recognition) es el proceso computacional mediante el cual una señal de audio que contiene habla es convertida en su representación textual equivalente. Los sistemas ASR modernos emplean modelos acústicos y de lenguaje basados en redes neuronales profundas, entrenados sobre grandes corpus de habla etiquetada, para estimar la secuencia de palabras más probable dado el audio de entrada (Researchgate, 2021; GIJET, 2024).

En el contexto del presente proyecto, el reconocimiento de voz se implementa en una computadora host mediante la biblioteca SpeechRecognition de Python, que proporciona una interfaz unificada a múltiples motores ASR, incluyendo el motor en línea de Google. La voz del usuario es capturada por el micrófono del sistema operativo, procesada por la biblioteca ASR y convertida en una cadena de texto. Esta cadena es posteriormente procesada por el módulo de traducción Braille, que asigna a cada carácter su celda Braille correspondiente y genera la secuencia de coordenadas de posicionamiento que se transmite al Arduino Uno por puerto serial.

La precisión del sistema ASR está condicionada por el nivel de ruido ambiental, la calidad del micrófono y el acento del hablante. Herrera et al. (2024) reportaron una eficiencia de transcripción del 100% en entornos silenciosos y del 36% en entornos con ruido elevado, lo que indica que las condiciones acústicas del entorno de uso son un factor determinante para el desempeño del sistema completo.

## **2.11 Backlash mecánico y zona muerta**

El backlash, también denominado holgura o juego mecánico, es la pérdida de movimiento que ocurre cuando la dirección de desplazamiento de un mecanismo de transmisión se invierte. En sistemas de engranajes y correas dentadas, el backlash se origina en el espacio libre entre los flancos de los dientes en contacto; cuando el sentido de movimiento

se invierte, el elemento conductor debe desplazarse la distancia correspondiente al backlash antes de que el par se transmita efectivamente al elemento conducido. Esta región de movimiento sin transmisión de par constituye una no linealidad que deteriora la precisión de posicionamiento en sistemas de lazo cerrado, ya que el encoder puede registrar un desplazamiento del motor que no se traduce en un desplazamiento equivalente del elemento final (Herrera et al., 2024; Design of a Braille Printer, 2025).

La zona muerta (deadband) es una región de error en torno a la posición objetivo dentro de la cual el controlador no genera acción de control. Su función es evitar que el actuador permanezca en movimiento continuo de pequeña amplitud hunting o ciclado cuando el error residual es pequeño pero no nulo debido al backlash, la fricción estática o la cuantización del encoder. En el sistema desarrollado, la zona muerta se implementa como un umbral de error en pulsos del encoder: si  $|e[k]| \leq \text{umbral\_deadband}$ , la señal de control se fija en cero y el motor se detiene.

La estrategia FAST/FINE combina dos modos de posicionamiento: el modo FAST, en el que el motor opera a velocidad máxima hasta que el error supera un umbral de transición; y el modo FINE, en el que la velocidad se reduce progresivamente conforme el cabezal se aproxima a la posición objetivo. Esta estrategia reduce el tiempo total de posicionamiento manteniendo la precisión en la fase final de aproximación, y es análoga a los perfiles de velocidad trapezoidal empleados en sistemas de control de movimiento industriales.

## **Capítulo 3.**

### **DESARROLLO**

Este capítulo presentará el desarrollo de la solución propuesta para resolver el problema central del trabajo de titulación. El enfoque de este capítulo varía si el trabajo es para tesis, proyecto tecnológico o proyecto de inversión.

#### **3.1 Análisis y desarmado de la impresora**

La impresora seleccionada para el proyecto es una unidad de inyección de tinta de tipo doméstico de medio uso. Previo al desarmado, se realizó un análisis visual y funcional del equipo para identificar los mecanismos internos, los motores, los encoders y los sensores de posición presentes. El proceso de desarmado se documentó fotográficamente en cada etapa, registrando la ubicación de cada componente, sus conexiones eléctricas y sus especificaciones nominales cuando fue posible obtenerlas.

Durante el desarmado se identificaron y retiraron los componentes propios del proceso de impresión por inyección de tinta que no serían reutilizados en el nuevo sistema: los cartuchos de tinta, las almohadillas de tinta, el cable plano (flex) de señal original del cabezal, la placa electrónica de control original y el ensamblaje superior que contiene el escáner en modelos multifunción. En la Figura 4 se observan las piezas desechadas durante este proceso. Estos componentes fueron separados para eventual reciclaje, en coherencia con el enfoque de sostenibilidad del proyecto.



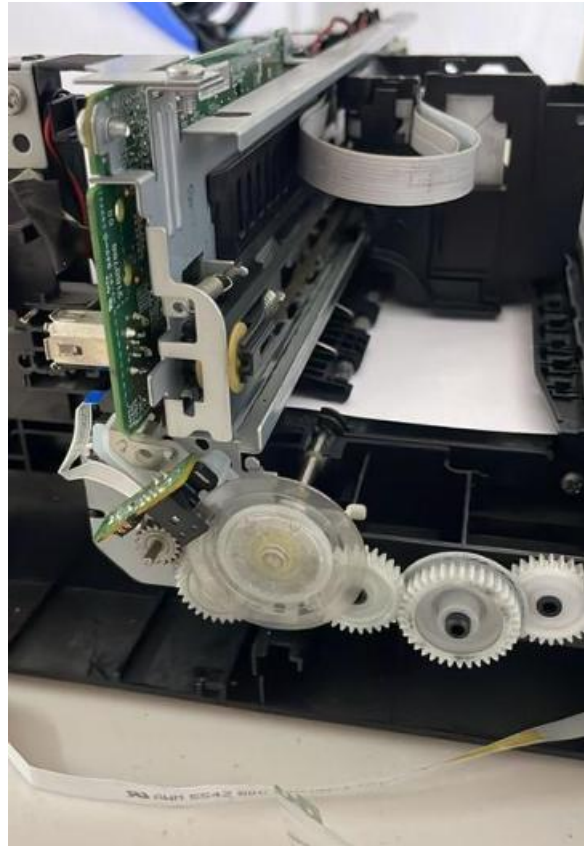
*Figura 4. Componentes identificados para retirar durante el desarmado de la impresora convencional: placa electrónica original, cables planos (flex), engranajes y sensores no reutilizables.*

Los componentes identificados como reutilizables incluyen: el chasis de la impresora, el riel metálico de guía del cabezal (eje X), el carro del cabezal, el motor DC del cabezal, la correa dentada de transmisión del cabezal, el encoder óptico de banda lineal del eje X, el motor DC del sistema de arrastre de papel, el tren de engranajes del eje Y, el encoder óptico de disco ranurado del eje Y, el sistema de rodillos de arrastre de papel y el soporte de hoja. Esta selección aprovecha la infraestructura mecánica y óptica de precisión incorporada en el diseño original de la impresora, que ha sido optimizada por el fabricante para garantizar el posicionamiento repetible del cabezal en el proceso de impresión.

### **3.2 Arquitectura mecánica**

El sistema de posicionamiento opera sobre dos ejes ortogonales. El eje X controla el desplazamiento horizontal del cabezal a lo largo del riel de guía, lo que determina la posición del mecanismo de embossing sobre la columna correspondiente de la celda Braille. El eje Y controla el avance del papel a través del sistema de rodillos y engranajes, lo que determina la

fila de la matriz Braille sobre la que se produce el punto. En la Figura 5 se aprecia el tren de engranajes reutilizado para el eje Y.



*Figura 5. Tren de engranajes del eje Y reutilizado de la impresora, encargado del arrastre de papel mediante rodillos.*

El encoder del eje X (cabezal) es de tipo lineal óptico: un sensor óptico fijo en el carro del cabezal lee las marcas periódicas de una banda lineal transparente con impresión de alta resolución adherida al riel. En la Figura 6 se observa el carro del cabezal y la barra de guía lineal del eje X. Cada interrupción del haz genera un pulso contado por el Arduino. El encoder del eje Y (sistema de engranajes) es de tipo rotatorio: un disco transparente ranurado montado sobre el eje del motor o de uno de los engranajes del tren de transmisión es leído por un sensor óptico de horquilla. Cada ranura que pasa frente al sensor genera un pulso. La diferencia en el número de pulsos por milímetro entre ambos encoders refleja las distintas relaciones de transmisión y resoluciones de los elementos codificadores originales.



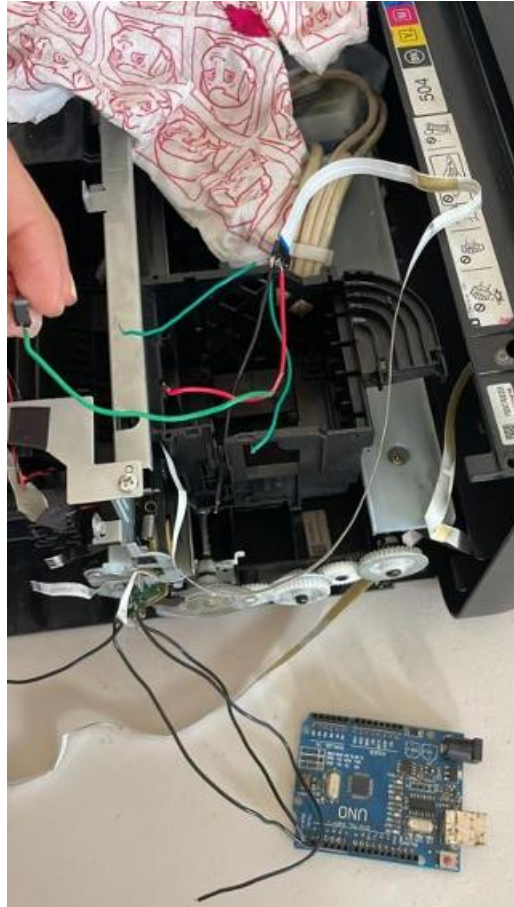
*Figura 6. Carro del cabezal y barra de guía lineal del eje X, reutilizados para el desplazamiento horizontal del mecanismo de embossing.*

### **3.3 Arquitectura electrónica**

La arquitectura electrónica del prototipo se encuentra basada en un microcontrolador Arduino Uno, encargado de coordinar el funcionamiento general del sistema. El movimiento del cabezal y el mecanismo de arrastre de papel se realiza mediante motores de corriente directa controlados a través de un puente H, permitiendo regular tanto la dirección como la velocidad de desplazamiento de cada eje.

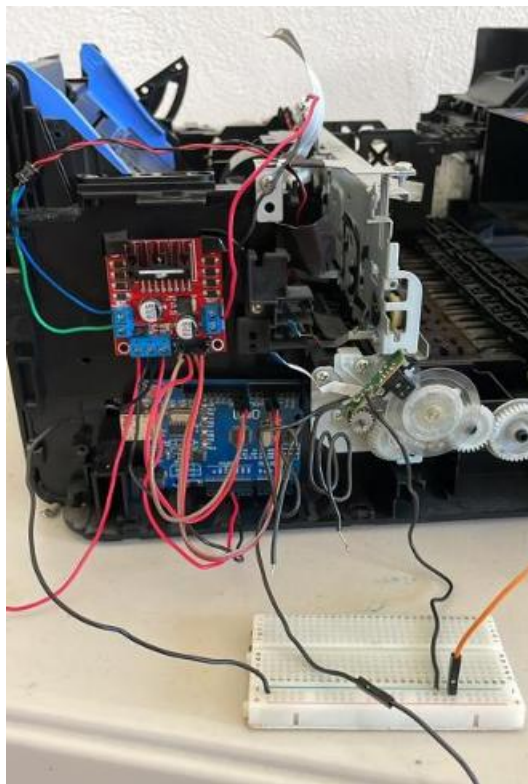
Para el monitoreo de posición se emplean encoders ópticos reutilizados de la impresora convencional, los cuales proporcionan retroalimentación continua del desplazamiento del

cabezal y del avance de la hoja. En la Figura 7 se observa la conexión física entre el Arduino Uno y los encoders ópticos reutilizados. La lectura de estas señales permite implementar un sistema de control en lazo cerrado, utilizado para mejorar la precisión y estabilidad del posicionamiento durante la generación de caracteres Braille.



*Figura 7. Conexión física del Arduino Uno con los encoders ópticos reutilizados de la impresora, para la lectura de señales digitales de posición.*

El movimiento del cabezal y el mecanismo de arrastre de papel se realiza mediante motores de corriente directa controlados a través de un puente H L298N. En la Figura 8 se aprecia el montaje electrónico completo con el Arduino, el puente H y los motores. La alimentación del sistema se realiza mediante una fuente externa de mayor voltaje destinada a compensar las pérdidas internas del módulo de potencia y asegurar el suministro adecuado de energía a los motores durante condiciones normales de operación.



*Figura 8. Esquema de conexión del módulo puente H L298N entre el Arduino Uno y los motores DC de la impresora, regulando dirección y velocidad.*

### **3.4 Software de conversión de voz a texto y texto a Braille**

El software de la capa superior del sistema se implementa en Python sobre la computadora host. La cadena de procesamiento comprende tres módulos secuenciales: (1) el módulo de captura y reconocimiento de voz, (2) el módulo de traducción de texto a código Braille, y (3) el módulo de serialización de coordenadas.

El módulo de reconocimiento de voz emplea la biblioteca SpeechRecognition de Python con el motor de reconocimiento en línea de Google (o un motor alternativo en modo offline para entornos sin conectividad). La voz del usuario se captura con el micrófono del sistema, se pre-procesa para reducción de ruido si el módulo lo soporta y se envía al motor ASR, que retorna la transcripción textual.

El módulo de traducción de texto a Braille implementa una tabla de correspondencia entre los caracteres del alfabeto latino (incluyendo los caracteres específicos del español) y sus celdas Braille de Grado I equivalentes. Cada carácter del texto transcrito es buscado en la tabla y reemplazado por una representación de seis bits o su equivalente en dos dígitos hexadecimales que indica cuáles de los seis puntos de la celda están presentes (1) o ausentes (0). Esta representación aplica automáticamente la inversión especular horizontal requerida para la escritura desde el reverso del papel.

El módulo de serialización de coordenadas convierte la secuencia de celdas Braille en una lista de coordenadas absolutas (X, Y) expresadas en pulsos del encoder, calculadas a partir de las relaciones de conversión determinadas experimentalmente. Esta lista se transmite al Arduino Uno por comunicación serial (UART a 9600 bps) como una secuencia de tramas de datos que incluyen la coordenada destino, el eje de movimiento y el estado del solenoide de embossing para cada punto de la celda.

### **3.5 Algoritmo de control PD con estrategias de posicionamiento**

El algoritmo de control implementado en el Arduino Uno opera en un bucle de control que ejecuta los siguientes pasos en cada iteración: (1) lectura de la posición actual en pulsos del encoder; (2) cálculo del error de posición respecto a la referencia actual; (3) evaluación de la zona muerta; (4) selección del modo de operación (FAST o FINE) según el umbral de transición; (5) cálculo de la acción de control PD; (6) aplicación del limitador de velocidad; (7) escritura de la señal PWM en el puente H; y (8) verificación de la condición de llegada (soft-stop).

La compensación de backlash se activa cada vez que el sentido de movimiento se invierte respecto al último movimiento registrado. Cuando se detecta un cambio de dirección, el sistema añade a la referencia de posición un offset de compensación equivalente a la holgura estimada del mecanismo, expresada en pulsos del encoder. Este offset fue

determinado experimentalmente mediante el registro de la diferencia entre el número de pulsos comandados y los pulsos reales medidos en desplazamientos de ida y vuelta de igual longitud nominal.

El soft-stop es una condición de parada suave implementada como un umbral de velocidad y de error. Cuando el error de posición es menor que el umbral de la zona muerta y la velocidad estimada del motor (derivada discreta de la posición) es inferior a un mínimo, el algoritmo reduce progresivamente el ciclo de trabajo hasta cero y detiene el motor. Esta estrategia evita la detención abrupta que podría generar oscilaciones mecánicas de rebote en el cabezal sobre el riel.

### **3.6 Calibración y relación pulsos/milímetro**

La calibración del sistema de posicionamiento se realizó mediante pruebas de desplazamiento lineal controlado. Para el eje X (cabezal), se ordenó al sistema desplazarse un número determinado de pulsos del encoder, se midió el desplazamiento real con un calibrador digital de resolución 0.01 mm y se calculó la relación de conversión. El procedimiento se repitió para diferentes distancias de desplazamiento y en ambas direcciones de movimiento para evaluar la consistencia de la relación. Los resultados experimentales indicaron que 30 pulsos del encoder del cabezal equivalen a aproximadamente 2.5 mm, lo que corresponde a una resolución de 0.083 mm/pulso o 12 pulsos/mm.

Para el eje Y (sistema de engranajes), el mismo procedimiento arrojó que 100 pulsos del encoder equivalen a aproximadamente 2.5 mm, lo que corresponde a una resolución de 0.025 mm/pulso o 40 pulsos/mm. La diferencia en la resolución entre ambos ejes refleja las distintas densidades de marcas de los encoders originales y las relaciones de transmisión mecánica de cada eje. Estas relaciones de conversión se utilizan para calcular el número de pulsos correspondiente a cada coordenada de la matriz Braille en unidades de milímetros, conforme a los estándares dimensionales de la celda.

## Capítulo 4.

### RESULTADOS

En este capítulo se deberán presentar los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología de desarrollo descrita en el capítulo anterior. Estos están relacionados con los objetivos específicos definidos en el capítulo 1.

#### 4.1 Caracterización de los encoders ópticos

**Tabla 1. Relaciones de conversión pulsos/mm determinadas experimentalmente para cada eje del sistema**

Eje / Encoder	Pulsos	Desplaz. real (mm)	Resolución (mm/pulso)
X – Cabezal (banda lineal)	30	≈ 2.5	≈ 0.083
Y – Sistema de engranajes (disco ranurado)	100	≈ 2.5	≈ 0.025

*Tabla 1. Los valores son aproximados y representan el promedio de múltiples mediciones.*

La relación de conversión obtenida para el eje X implica que, para producir un desplazamiento de 2.5 mm entre puntos adyacentes de la celda Braille valor nominal del estándar ISO 17049 , el sistema debe desplazar el cabezal exactamente 30 pulsos del encoder. De manera análoga, para producir un avance de papel de 10.0 mm entre líneas Braille consecutivas, el sistema debe avanzar 400 pulsos del encoder del eje Y. Estas relaciones constituyen los parámetros de conversión empleados por el módulo de serialización de coordenadas del software de Python para traducir las posiciones de la celda Braille en unidades de pulsos de encoder.

## 4.2 Error de posicionamiento

Las pruebas de posicionamiento consistieron en comandar al sistema una serie de desplazamientos hacia posiciones objetivo definidas en pulsos del encoder y registrar el error residual diferencia entre la posición comandada y la posición medida al final del movimiento una vez que el algoritmo declaró la condición de llegada. Los resultados obtenidos evidencian que el error de posicionamiento del sistema es de  $\pm 3$  pulsos del encoder en ambos ejes.

**Tabla 2. Error de posicionamiento obtenido en pruebas de desplazamiento lineal**

Parámetro	Eje X (cabezal)	Eje Y (papel)
Error máximo observado (pulsos)	$\pm 3$	$\pm 3$
Error máximo en mm (Eje X: 0.083 mm/pulso)	$\pm 0.25$ mm	
Error máximo en mm (Eje Y: 0.025 mm/pulso)		$\pm 0.075$ mm

*Tabla 2. Los valores representan el desempeño actual del prototipo.*

El error de  $\pm 3$  pulsos en el eje X corresponde a un error máximo de  $\pm 0.25$  mm en términos de desplazamiento real, considerando la resolución de 0.083 mm/pulso. Este valor es inferior al margen de tolerancia de  $\pm 0.5$  mm que puede considerarse admisible para la separación entre puntos de la celda Braille cuya dimensión nominal es de 2.5 mm sin comprometer la legibilidad táctil. Para el eje Y, el error de  $\pm 3$  pulsos equivale a  $\pm 0.075$  mm, un valor considerablemente menor al margen dimensional admisible para el avance de papel, dado que el interlineado nominal de 10.0 mm toleraría una desviación de este orden sin afectar la discriminación entre líneas Braille consecutivas.

Cabe señalar que estos resultados se obtuvieron durante pruebas de posicionamiento del sistema mecánico y de control en la fase actual de desarrollo, y que el sistema de embossing Braille aún no se encontraba integrado al prototipo en el momento de las pruebas. La integración del solenoide de embossing puede introducir perturbaciones mecánicas adicionales que afecten el error de posicionamiento, lo que será evaluado en la fase siguiente del proyecto.

### **4.3 Comportamiento del controlador PD y estrategias de posicionamiento**

El controlador PD implementado demostró ser eficaz para reducir las oscilaciones observadas en pruebas preliminares realizadas únicamente con control proporcional. Con solo el término proporcional activo, el sistema presentaba sobreimpulso y oscilaciones amortiguadas en torno a la posición objetivo antes de estabilizarse, particularmente en desplazamientos cortos donde la velocidad de llegada era elevada. La adición del término derivativo redujo visiblemente estas oscilaciones, mejorando la estabilidad y la velocidad de convergencia al estado estacionario.

La estrategia FAST/FINE demostró reducir el tiempo total de posicionamiento en comparación con un perfil de velocidad constante reducida. En el modo FAST, el motor opera a un ciclo de trabajo elevado hasta que el error supera el umbral de transición; en el modo FINE, el ciclo de trabajo se reduce proporcionalmente conforme el cabezal se aproxima a la posición objetivo, lo que suaviza la llegada y minimiza el sobreimpulso residual. La zona muerta (deadband) evita el ciclado del motor en torno a la posición objetivo cuando el error residual es menor que la holgura del sistema.

La compensación de backlash contribuyó a mejorar la precisión en los cambios de dirección del cabezal, que son frecuentes en la secuencia de posicionamiento de los puntos de la celda Braille. Sin la compensación, se observó que los primeros pulsos comandados tras un cambio de dirección no producían desplazamiento real equivalente, lo que acumulaba error de posición. Con la compensación activa, este efecto se redujo de manera significativa, aunque la estimación del backlash deberá refinarse en la fase de integración completa del prototipo.

### **4.4 Limitaciones actuales del prototipo**

Al momento de la redacción de este documento, el sistema presenta las siguientes limitaciones que deberán ser abordadas en las fases subsecuentes del proyecto. En primer lugar, el módulo de embossing Braille el solenoide y su montaje sobre el carro del cabezal no ha sido completamente integrado al prototipo; las pruebas reportadas corresponden al sistema de posicionamiento de forma aislada. En segundo lugar, el sistema de reconocimiento de voz no ha sido conectado en tiempo real con el módulo de control del Arduino en el prototipo físico; esta integración se encuentra en desarrollo. En tercer lugar, la estimación del backlash se realizó de forma empírica y puede requerir ajuste en función de las condiciones de carga del

mecanismo durante el embossing. Finalmente, la alimentación actual del prototipo a través de fuente de banco limita su portabilidad, aspecto que deberá considerarse en versiones futuras del sistema.

## Capítulo 5.

# CONCLUSIONES

### 5.1 Conclusiones

El trabajo presentado demuestra la viabilidad técnica de reutilizar los componentes mecánicos y ópticos de una impresora de inyección de tinta convencional como plataforma para el desarrollo de un sistema de posicionamiento de bajo costo para la producción de caracteres Braille. La caracterización experimental de los encoders ópticos originales de la impresora permitió establecer relaciones de conversión pulsos/mm precisas y lineales en ambos ejes, lo que constituye la base para la traducción de coordenadas Braille a comandos de posición del controlador.

El algoritmo de control PD implementado sobre Arduino Uno, complementado con las estrategias FAST/FINE, compensación de backlash, zona muerta y soft-stop, demostró ser eficaz para reducir las oscilaciones y mejorar la estabilidad del posicionamiento en comparación con un control puramente proporcional. El error de posicionamiento obtenido experimentalmente  $\pm 3$  pulsos del encoder, equivalentes a  $\pm 0.25$  mm en el eje X y  $\pm 0.075$  mm en el eje Y se encuentra dentro de los márgenes tolerados por los estándares dimensionales del Braille para garantizar la legibilidad táctil del carácter impreso.

La decisión de prescindir del término integral en el controlador, complementando su función mediante la compensación de backlash y la zona muerta, resultó adecuada para el contexto de un microcontrolador de 8 bits con capacidad computacional limitada y un sistema de posicionamiento con movimientos discretos hacia posiciones fijas. Esta elección evita la problemática del wind-up integral y simplifica el ajuste de parámetros del controlador.

La selección de una fuente de alimentación de 15 V para compensar la caída de tensión del módulo L298N se validó como una solución funcional para garantizar el par suficiente en los motores DC originales de la impresora a lo largo de todo el rango de velocidades operativas. Esta consideración es relevante para otros proyectos que reutilicen motores DC de impresora con puentes H de transistores bipolares.

## 5.2 Trabajos futuros

Los trabajos futuros identificados para la continuación del proyecto incluyen los siguientes aspectos. En el corto plazo, la integración completa del módulo de embossing mediante el solenoide y su montaje definitivo sobre el carro del cabezal, así como la evaluación del error de posicionamiento con el solenoide activo durante el proceso de embossing. Asimismo, se deberá desarrollar la interfaz en tiempo real entre el software de Python y el Arduino para la transmisión de coordenadas Braille, y realizar pruebas de impresión completa de caracteres y palabras en papel para evaluar la calidad táctil de los puntos producidos conforme a los estándares de la BANA (2009) y la norma ISO 17049.

En el mediano plazo, se propone la exploración de estrategias de control más avanzadas como el control por modos deslizantes o el control predictivo basado en modelo para mejorar la robustez del posicionamiento ante variaciones de carga durante el embossing. También se contempla la optimización del perfil de velocidad del movimiento mediante la implementación de trayectorias de tipo S-curve, que reducen las aceleraciones pico y minimizan las vibraciones mecánicas. La evaluación con usuarios con discapacidad visual para determinar la legibilidad táctil real de los puntos producidos por el prototipo constituye una etapa fundamental para la validación del sistema desde la perspectiva del usuario final.

En el largo plazo, se vislumbra el desarrollo de una versión portátil del sistema con fuente de alimentación integrada y carcasa diseñada ergonómicamente, así como la exploración de mecanismos de embossing alternativos como pines de acero inoxidable con geometría optimizada que permitan producir puntos con las dimensiones estándar de manera más consistente. La extensión del sistema para soportar Braille de Grado II (con contracciones y abreviaciones) ampliaría significativamente la utilidad del dispositivo para usuarios con mayor nivel de alfabetización Braille.

## 5.3 Discusión

Los resultados obtenidos en el presente trabajo se comparan favorablemente con los reportados por Herrera et al. (2024) en su sistema predecesor sobre la misma plataforma de hardware. La incorporación del control en lazo cerrado con encoders ópticos representa un avance significativo respecto a ese trabajo, que no implementó retroalimentación de posición y presentó desviaciones dimensionales como una separación entre puntos de 4 mm frente al

estándar de 2.5 mm atribuibles precisamente a la falta de control de posición. El error de posicionamiento de  $\pm 0.25$  mm en el eje X reportado en el presente trabajo es considerablemente menor a la desviación de 1.5 mm registrada en ese sistema previo.

En comparación con sistemas basados en motores paso a paso como el descrito por el *Design of a Braille Printer Based on ESP32 Microcontroller (2025)*, el enfoque de motores DC con retroalimentación de encoder presenta ventajas en términos de velocidad de respuesta y de capacidad para manejar perturbaciones de carga, aunque requiere mayor complejidad en el algoritmo de control. Los sistemas con motor paso a paso son inherentemente más simples en su control, pero son más susceptibles a la pérdida de pasos ante perturbaciones mecánicas y generalmente operan a velocidades inferiores.

El sistema desarrollado contribuye al campo de la tecnología de asistencia de bajo costo al demostrar que es posible implementar un sistema de posicionamiento con prestaciones aceptables para la producción de Braille sobre hardware reutilizado, con un costo de componentes electrónicos nuevos reducido. Esta aproximación tiene el potencial de democratizar el acceso a la tecnología de producción de Braille en contextos de recursos limitados, en coherencia con los principios de la ingeniería sostenible y la inclusión tecnológica.

## EFERENCIAS

- Braille Authority of North America (BANA). (2009). Size and spacing of braille characters. Recuperado de: <https://brailleauthority.org/size-and-spacing-braille-characters>
- Design of a Braille Printer Based on ESP32 Microcontroller. (2025). GISA Journal. Recuperado de: <https://tecnoscientifica.com/journal/gisa/article/download/592/287>
- Duarte-Barón, K., Pabón, J. X., Claros, R., y Gil, J. J. (2016). Design and construction of a device to facilitate learning of the braille reading and writing system. *Engineering and Competitiveness*, 18(1), 77–90.
- Grenze International Journal of Engineering and Technology (GIJET). (2024). Voice to Braille, Braille to Voice using Raspberry Pi, 10(2). Recuperado de: [https://thegrenze.com/pages/servej.php?association=GRENZE&fn=36\\_1.pdf&id=3022](https://thegrenze.com/pages/servej.php?association=GRENZE&fn=36_1.pdf&id=3022)
- Herrera, I., Carreras, J. J., y Nava, R. (2024). Voice-to-Braille translation system for promoting Braille learning. *International Journal of Engineering and Technology*, 16(1), 52–56. <https://doi.org/10.7763/IJET.2024.V16.1254>
- Hoskin, E. R., Coyne, M. K., Dobri, S. C. D., White, M. J., Davies, T. C., y Pinder, S. D. (2022). Effectiveness of technology for braille literacy for children: A systematic review. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. Ciudad de México: INEGI.
- Journal of Advances in Information Technology (JAIT). (2023). Advanced real time embedded book Braille system, 14(3), 510. Recuperado de: <https://www.jait.us/uploadfile/2023/JAIT-V14N3-510.pdf>
- Mackenzie, S. C. (1954). *Braille writing in the world*. París: UNESCO.
- Martiniello, N., Haririsaniati, L., y Wittich, W. (2020). Enablers and barriers encountered by working-age and older adults with vision impairment who pursue braille training. *Disability and Rehabilitation*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/09638288.2020.1833253>
- Organización Nacional de Ciegos Españoles (ONCE). (s.f.). Sistema Braille. Recuperado de: <https://www.once.es/servicios-sociales/braille>
- Researchgate. (2021). Braille refreshable display using Arduino for visually challenged people. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/369647030>
- Researchgate. (2021). Text and voice to Braille translator for blind people. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/354458139>
- Researchgate. (2021). Voice activated portable Braille with audio feedback. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/348362891>
- Simón, C., Ochaíta, E., y Huertas, J. A. (1995). El sistema Braille: Bases para la enseñanza y el aprendizaje. *Comunicación, Lenguaje y Educación*, 28, 91–102.

Villavicencio-López, P. D. (2022). Dispositivo electrónico de aprendizaje del alfabeto:  
Traductor de voz a Braille (Tesis de grado). Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Diagrama general del sistema de traducción de voz a Braille [p. 10]
- Figura 2 – Componentes reutilizables identificados en el interior de la impresora [p. 11]
- Figura 3 – Sistema de engranajes y encoder óptico del eje Y (arrastre de papel) [p. 12]
- Figura 4 – Carro del cabezal y encoder óptico de banda lineal del eje X [p. 19]
- Figura 5 – Arquitectura electrónica: conexión Arduino Uno – L298N – motores DC – encoders [p. 20]
- Figura 6 – Fragmento de código: definición de pines, variables de posición y rutinas ISR [p. 21]
- Figura 7 – Diagrama de flujo del algoritmo de control PD con estrategias FAST/FINE [p. 22]
- Figura 8 – Diagrama de bloques del lazo de control de posición en lazo cerrado [p. 23]

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1 – Relaciones de conversión pulsos/mm determinadas para cada eje [p.26]

TABLA 2 – Valores representan el desempeño actual del prototipo. [p. 27]