

ACTUADOR ELECTROMAGNÉTICO PARA UN DESPLIEGUE  
TÁCTIL 2.5D BAJO EL PRINCIPIO DE FRENADO DE PINES.



Universidad  
del Cauca

Franklin Stiven Pérez Perafán  
Cruz Dilmer Mancilla

Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Programa de Ingeniería en Automática Industrial  
Popayán, Cauca  
2023

# ACTUADOR ELECTROMAGNÉTICO PARA UN DESPLIEGUE TÁCTIL 2.5D BAJO EL PRINCIPIO DE FRENADO DE PINES.



## Universidad del Cauca

Monografía presentada como requisito parcial para optar por el título de  
ingeniero en Automática Industrial.

Franklin Stiven Pérez Perafán  
Cruz Dilmer Mancilla

Director: Carlos Alberto Gaviria López.

Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Programa de Ingeniería en Automática Industrial  
Popayán, Cauca  
2023

# Agradecimientos.

En primera instancia queremos agradecer a nuestras familias por su gran sacrificio, esfuerzo, amor y apoyo que nos han brindado a lo largo de nuestra vida, lo que nos ha permitido crecer profesionalmente. Agradecemos a nuestro tutor Dr. Carlos Alberto Gaviria López por guiarnos en la realización de este trabajo de grado.

Agradecemos a nuestros amigos por su constante apoyo y aliento a lo largo de nuestra trayectoria académica, especialmente a Mónica Alejandra Quisobony. Su inquebrantable apoyo nos ha permitido desarrollar este importante hito en nuestra vida. No habría sido posible sin su inverosímil ayuda.

Nuestro agradecimiento también va dirigido a la Universidad del Cauca por brindarnos todos los recursos y conocimientos necesarios en nuestra formación de pregrado que se ven reflejados en este trabajo de grado.

Muchas gracias a todos.

# Índice general

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Conceptos generales.</b>	<b>2</b>
2.1	Interfaces táctiles . . . . .	2
2.1.1	Interfaces táctiles para personas con discapacidad visual . . . . .	2
2.2	Pantallas Braille actualizables . . . . .	3
2.3	Pantallas gráficas táctiles . . . . .	3
2.4	Principios físicos de actuación para la activación de pines . . . . .	4
2.4.1	Hidráulico-Neumático . . . . .	4
2.4.2	Electromagnético . . . . .	4
2.4.3	Piezoeléctrico . . . . .	4
2.4.4	Aleaciones con memoria de forma . . . . .	5
2.5	Interfaces táctiles actuadas por principios electromagnéticos . . . . .	5
2.6	Interfaces 2.5D . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>8</b>
3.1	Objetivo General . . . . .	8
3.2	Objetivo Especifico . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Materiales y métodos.</b>	<b>9</b>
4.1	Principio de frenado electromagnético . . . . .	9
4.2	Propuestas de mecanismos de actuación . . . . .	10
4.2.1	Prototipo A . . . . .	10
4.2.2	Prototipo B . . . . .	18
4.2.3	Prototipo C . . . . .	24
4.2.4	Prototipo D . . . . .	31
4.3	Evaluación funcional de los prototipos propuestos . . . . .	36
4.3.1	Atributos a evaluar . . . . .	36
4.3.2	Ponderación de atributos . . . . .	37
4.3.3	Juicios de valor de los atributos . . . . .	38
4.3.4	Juicio global . . . . .	45
4.4	Fabricación del prototipo B . . . . .	45
4.5	Fabricación del prototipo D . . . . .	59
4.5.1	Diseño de la plataforma . . . . .	63
4.6	Circuito para el control del despliegue táctil . . . . .	73
4.7	Aplicación para verificación de la interfaz . . . . .	75
4.7.1	Interfaz de Usuario . . . . .	75

<b>5</b>	<b>Resultados.</b>	<b>78</b>
5.1	Consumo de Potencia . . . . .	78
5.2	Velocidad de refresco . . . . .	79
5.3	Fuerza de frenado lograda. . . . .	80
5.4	Comparación con otras interfaces táctiles . . . . .	81
<b>6</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>83</b>
6.1	Conclusiones. . . . .	83
6.2	Trabajos futuros. . . . .	84
<b>7</b>	<b>Anexos</b>	<b>85</b>

# Índice de figuras

4.1	Modelo del prototipo A con sus partes.Fuente: Elaboración Propia. . . .	11
4.2	Ensamble prototipo A. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	11
4.3	Interacción entre imán de neodimio y electroimán. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	12
4.4	Función de la pieza separador. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	12
4.5	Descripción de la pieza Arandela. Permite mantener al imán de neodimio en la posición de reposo (izquierda) sin acción eléctrica. Al aplicarse corriente al electroimán, se vence la fuerza de atracción a la arandela (derecha). Fuente: Elaboración Propia. . . . .	13
4.6	Movimiento de la pieza Sistema. Izquierda: posición de desbloqueo, pieza Sistema fuera de la abertura cónica. Derecha: posición de bloqueo, pieza Sistema ocupando la abertura cónica. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	14
4.7	Derecha: desbloqueo del pin externo, los balines se ubican en el espacio entre el vástago y la abertura cónica, retrayéndose lo suficiente como para desbloquear al pin externo. Izquierda: los balines son desalojados de la abertura cónica y forzados hacia afuera del pin interno, lo suficiente como para bloquear al pin externo. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	15
4.8	Funcionamiento de desbloqueo a través de una representación del diagrama causalidad del prototipo A. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	16
4.9	Funcionamiento de bloqueo a través de una representación del diagrama causalidad del prototipo A. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	17
4.10	Modelo del prototipo B con sus partes. Fuente: Elaboración Propia. . . .	18
4.11	Ensamble prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	19
4.12	Interacción entre imán de neodimio y electroimán. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	19
4.13	Función de la pieza separador. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	20
4.14	Descripción de la pieza Sistema. Permite mantener al balón en la posición de reposo (derecha) sin acción eléctrica. Al aplicarse corriente al electroimán, el conjunto imán y sistema expulsa el balón y bloquea el mecanismo (izquierda). Fuente: Elaboración Propia. . . . .	20
4.15	Movimiento de la pieza Sistema. Izquierda: posición de bloqueo, pieza Balón fuera de la abertura circular. Derecha: posición de desbloqueo, pieza Sistema ocupando la abertura circular. Fuente: Elaboración Propia. . . .	21
4.16	Funcionamiento del prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	22
4.17	Funcionamiento de desbloqueo, a través de una representación del diagrama causalidad del prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	22
4.18	Funcionamiento de bloqueo, a través de una representación del diagrama causalidad del prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	23

4.19	Modelo del prototipo C con sus partes. Fuente: Elaboración Propia. . . .	24
4.20	Interacción entre imán de neodimio y electroimán. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	25
4.21	Función de la pieza separador. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	26
4.22	Descripción de la pieza Sistema. Permite mantener al mecanismo en la posición de reposo (izquierda) sin acción eléctrica. Al aplicarse corriente al electroimán, se vence la fuerza estática del sistema (derecha). Fuente: Elaboración Propia. . . . .	26
4.23	Movimiento de la pieza Sistema. Izquierda: posición de desbloqueo, aspas de la pieza Sistema fuera de la abertura. Derecha: posición de bloqueo, pieza Sistema ocupando la abertura. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	27
4.24	Derecha: bloqueo del pin externo, las aspas del sistema se retraen lo suficiente como para bloquear al pin externo. Izquierda: las aspas del sistema son desalojados de la abertura y forzadas hacia afuera del pin interno, lo suficiente como para desbloquear al pin externo. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	28
4.25	Funcionamiento de desbloqueo del prototipo C, a través de una representación del diagrama causalidad. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	29
4.26	Funcionamiento de bloqueo del prototipo C, a través de una representación del diagrama causalidad. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	30
4.27	Modelo prototipo D. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	31
4.28	Mecanismo del prototipo D. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	32
4.29	Interacción entre el elemento metálico y electroimán. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	32
4.30	Función de la pieza sistema. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	33
4.31	Mecanismo del prototipo D. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	33
4.32	Funcionamiento del pin interno del prototipo D. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	34
4.33	Funcionamiento de desbloqueo, a través de una representación del diagrama causalidad del prototipo D. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	34
4.34	Funcionamiento de bloqueo, a través de una representación del diagrama causalidad del prototipo D. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	35
4.35	Masa de agua. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	40
4.36	Medición masa de agua. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	40
4.37	Dimensiones prototipos propuestos. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	42
4.38	Dimensiones sistema prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	46
4.39	Alineación sistema prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	47
4.40	Medida cavidad circular sistema prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	47
4.41	Sistema impreso prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	48
4.42	Dimensiones Balín prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	48
4.43	Balín prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	49
4.44	Dimensiones Separador prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	49
4.45	Separador impreso prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	50
4.46	Dimensiones bobina prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	50
4.47	Núcleo electroimán prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	51
4.48	Construcción Bobina prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	52
4.49	Motor con caja reductora. . . . .	52
4.50	Módulo puente H. . . . .	52
4.51	Modulo encoder HC-020K Sensor de Velocidad B83609. . . . .	53

4.52	Montaje para la construcción de electroimanes. Fuente: Elaboración Propia.	54
4.53	Resultado embobinado electroimán. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	54
4.54	Electroimán construido prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	54
4.55	Dimensiones Pin Interno prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	55
4.56	Pin Interno impreso prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	56
4.57	Dimensiones Pin externo prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	57
4.58	Medidas para el desplazamiento Pin externo prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	58
4.59	Margen de error pin externo prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	58
4.60	Pin externo impreso prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	59
4.61	Demostración Bloqueo y Desbloqueo del mecanismo prototipo B. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	60
4.62	Bobina impresa en 3D. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	60
4.63	Electroimán construido prototipo D. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	61
4.64	Elemento metálico prototipo D. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	62
4.65	Arandela prototipo D. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	62
4.66	Sistema prototipo D. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	63
4.67	Pin interno prototipo D. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	64
4.68	Ensamble inicial prototipo D. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	64
4.69	Ensamble prototipo D desbloqueado. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	65
4.70	Ensamble prototipo D bloqueado. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	65
4.71	Prototipo D bloqueado. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	66
4.72	Actuador lineal. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	67
4.73	Mesa de soporte. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	67
4.74	Bandeja de soporte. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	68
4.75	Plataforma ensamblada. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	68
4.76	Dimensiones base para los pines. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	69
4.77	Matriz de pines construida. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	70
4.78	Modelo Prototipo Final 3D ensamblado. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	71
4.79	Prototipo Matriz de Pines. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	72
4.80	Conexiones de los elementos usados en el circuito. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	74
4.81	Interfaz aplicación. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	75
4.82	Selección de pines a bloquear. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	76
4.83	Selección de polaridad. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	76
4.84	Selección de nivel. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	76
4.85	Acciones de la aplicación. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	76
4.86	Diagrama de flujo del uso de la aplicación. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	77
5.1	Masa soportada por un pin. . . . .	80
5.2	Medición de la masa soportada por un pin. . . . .	80
7.1	Código QR para acceder a la información relacionada al proyecto. . . . .	86



# Índice de tablas

2.1	Parámetros de diseño para pantallas Braille. . . . .	3
2.2	Ventajas y desventajas de los principios de actuación para la activación de pines. Fuente: elaboración propia. . . . .	5
4.1	Porcentaje global cantidad de piezas. . . . .	38
4.2	Porcentaje global complejidad. . . . .	39
4.3	Piezas atraídas y repelidas prototipo A. . . . .	41
4.4	Piezas atraídas y repelidas prototipo B. . . . .	41
4.5	Piezas atraídas y repelidas prototipo C. . . . .	41
4.6	Piezas atraídas y repelidas prototipo D. . . . .	42
4.7	Porcentaje global prototipo A . . . . .	43
4.8	Porcentaje global prototipo B . . . . .	43
4.9	Porcentaje global prototipo C . . . . .	44
4.10	Porcentaje global prototipo D . . . . .	44
4.11	Porcentaje global tipo de frenado . . . . .	44
4.12	Viabilidad prototipos propuestos . . . . .	45
5.1	Calculo teórico de potencia consumida de cada electroimán usado por pin. . . . .	78
5.2	Consumo de potencia de los elementos del actuador. . . . .	79
5.3	Velocidad de refresco de la plataforma. . . . .	79
5.4	Comparación con otras interfaces táctiles propuestas en la literatura. . . . .	81



# Capítulo 1

## Introducción

La OMS considera ciego a aquel individuo que no logra obtener en sus dos ojos, ni con aparatos ópticos una corrección en su agudeza visual según la escala de Wecker menor a 0.1. Debido a esto, el individuo con discapacidad visual recibe información limitada o nula acerca de las cosas y las personas que lo rodean; esta situación antepone barreras en edades más tempranas y trae como consecuencia el atraso escolar en edades más avanzadas [1]. Por esta razón es necesario que las personas con este tipo de discapacidad gocen de sus derechos y participen como miembros activos de la sociedad, así mismo que participen en espacios sociales básicos tales como los de educación, salud y trabajo. Según la CIF, la participación social de las personas con discapacidad depende de su accesibilidad al entorno [2]. Por esto los gobiernos, incluido el colombiano han acogido políticas de inclusión para asistir con calidad, propiedad y equidad a las necesidades que presenta la población con discapacidad visual [3]. Considerando que en Colombia en datos estadísticos calculados por el DANE para el 2018, de un total de 3.134.036 personas con discapacidad, 1.948.332 tienen discapacidad visual (no necesariamente ceguera), lo que equivalente al 62.17% de esta población y al 7.1% de la población total colombiana [4]. Por lo tanto, es una población relativamente grande la cual requiere gran atención y a la que se debe facilitar su inclusión en la sociedad. En el ámbito tecnológico se han propuesto diversos dispositivos para asistencia a población con discapacidad visual. Estos dispositivos buscan proveer soluciones a diversas problemáticas entre las que se encuentran la orientación, el acceso a información, o la movilidad. En particular, las ayudas para acceso a información a su vez se pueden clasificar en hápticas, táctiles, acústicas o mixtas. A su vez las interfaces táctiles para personas con discapacidad visual se pueden clasificar en pantallas gráficas táctiles y pantallas Braille, siendo estas últimas las más populares debido a su fácil creación. Este proyecto aborda el problema de la asistencia para el acceso a información gráfica (no lingüística) por medio de dispositivos hápticos, entendiendo que un dispositivo de asistencia háptico es aquel que permite substituir el sentido de la vista con el sentido del tacto para recolectar información acerca del mundo exterior a través de movimientos activos de las manos [5]. Teniendo como objetivo desarrollar un actuador electromagnético que en conjunto con una plataforma móvil permita controlar la posición de los pines para tener así un despliegue táctil 2.5D.

# Capítulo 2

## Conceptos generales.

En la siguiente sección se presentarán los conceptos fundamentales necesarios para comprender el trabajo realizado en esta investigación. Estos conceptos son esenciales para el desarrollo del contenido y permitirán al lector tener una visión clara y completa de la temática.

### 2.1 Interfaces táctiles

Una interfaz táctil o interfaz háptica, es un tipo de tecnología que permite a los usuarios recibir retroalimentación o sensaciones táctiles a través del sentido del tacto [2]; estos dispositivos están diseñados para crear una sensación de tacto o forzar retroalimentación en entornos virtuales o remotos, mejorando la experiencia general del usuario y la interacción con contenido digital o sistemas remotos, estas interacciones hápticas pueden ir acompañadas o no de la estimulación de otras modalidades sensoriales, como la visión y la audición [3]. Las interfaces hápticas se utilizan en diversas aplicaciones, incluidas reconocimiento de objetos, experiencias de realidad virtual y aumentada, teleoperación y simulación, educación o entretenimiento [4, 5, 6, 7, 8], entre otras.

#### 2.1.1 Interfaces táctiles para personas con discapacidad visual

Una interfaz táctil se puede utilizar como dispositivo de asistencia destinado a enriquecer la calidad de vida de individuos con discapacidad visual [9]. Estas interfaces tienen la capacidad de presentar información en forma táctil, abarcando desde gráficos, mapas, símbolos hasta caracteres alfanuméricos.

Actualmente gran parte de la información se presenta de forma gráfica, con lo que las personas con discapacidad visual se encuentran en desventaja al no poder acceder a este tipo de contenido visual. En su lugar, dependen de ilustraciones táctiles, que incluyen elementos tales como líneas en relieve, texturas y gráficos en relieve que se perciben a través del tacto. Estas representaciones táctiles en relieve se elaboran con materiales convencionales como el papel, por lo cual son estáticos [8].

Los documentos tradicionales en papel con Braille y gráficos tangibles son inadecuados para difundir información a personas con discapacidad visual. La accesibilidad a la información es un desafío crucial para ellos. Para superar estas limitaciones, se requieren pantallas táctiles accesibles que proporcionen información en tiempo real a través de gráficos y caracteres Braille digitales, utilizando elementos táctiles llamados taxeles

(término acuñado de la unión entre los conceptos de pin táctil y el de pixel en una imagen digital) [10].

Las interfaces táctiles para personas con discapacidad visual se pueden clasificar en pantallas gráficas táctiles [11] y pantallas Braille actualizables [12] que generan dinámicamente gráficos tangibles o caracteres Braille.

## 2.2 Pantallas Braille actualizables

Las pantallas Braille actualizables brindan a las personas ciegas la capacidad de leer documentos digitales mediante la generación dinámica de caracteres Braille, el cual es un tipo de texto especialmente adaptado para las personas con discapacidad visual [10]. Estas pantallas están compuestas por una fila de celdas Braille que poseen pines móviles actualizables que adoptan dos posibles posiciones, arriba o abajo, para representar los caracteres mostrados en cada celda [13]; de este modo, los usuarios pueden leer el contenido mediante el tacto.

Las pantallas Braille actualizables comerciales son caras y voluminosas, principalmente debido a la compleja tecnología utilizada para crear los puntos en relieve, aunque estos dispositivos deberían ser accesibles a una gama más amplia de personas con discapacidad visual, la mayoría de estas personas no pueden permitírselo [14, 13, 13, 10]. se han propuesto muchas soluciones, algunas de las cuales reducen los costos [15].

Los parámetros de diseño para una pantalla Braille actualizable se detallan en la tabla 2.1, además de estos parámetros se busca que una pantalla braille actualizable sea portátil, ligera y silenciosa

Parámetro de diseño	Valor de referencia
Diámetro del pin	1,0~1,6 mm
Desplazamiento del pin	0,2~0,5 mm
Paso de pin	2,2~2,8 mm
Fuerza táctil del pin	>100 mN
Frecuencia de actualización	>10 Hz para una sola línea, >1 Hz para varias líneas
Tensión de funcionamiento	<12 V

**Tabla 2.1:** Parámetros de diseño para pantallas Braille.

Tomado: [10].

## 2.3 Pantallas gráficas táctiles

Las Pantallas gráficas táctiles también llamadas pantallas de formas táctiles 2.5D son una clase específica de dispositivo háptico que representan la forma, el tamaño y la posición de una superficie mediante el desplazamiento vertical de una serie de taxeles, creando una superficie que el usuario puede explorar con sus manos [16]. Esto significa que tiene la capacidad de generar diferentes tipos de texturas y formas para transmitir una experiencia táctil más rica y variada.

Las pantallas Braille actualizables, tienen parámetros de diseño bien definidos, sin embargo, el diseño de las pantallas gráficas táctiles aún no está claramente definido. Según la encuesta llevada a cabo por [10], en la que se consideraron las experiencias

de usuarios con discapacidad visual, una pantalla gráfica táctil ideal debe cumplir con ciertos requisitos como: ser confiable, segura, duradera y portátil, ser asequible, tener un consumo de energía reducido y ofrecer una alta frecuencia de actualización.

## 2.4 Principios físicos de actuación para la activación de pines

Se han explorado diferentes mecanismos de actuación para crear visualizaciones táctiles a través de la activación de pines. La siguiente revisión se centra en los principios físicos más usados en actuadores para la activación de pines en pantallas táctiles.

### 2.4.1 Hidráulico-Neumático

Los actuadores impulsados por fluidos utilizan un fluido de trabajo para transferir energía desde la fuente al dispositivo, mediante la aplicación de presión o cambio de volumen. La elección del fluido depende de las necesidades de la aplicación. Los fluidos compresibles, como el aire, son livianos y poco viscosos. Sin embargo, pueden tardar en responder y pueden requerir una buena detección y control para compensar la dinámica y las pérdidas. Los fluidos incompresibles, como el agua o el aceite, pueden producir grandes fuerzas y actuar a altas velocidades. Sin embargo, los fluidos incompresibles tienen mayor viscosidad y son más pesados [17]. En [12] se utiliza este principio y se muestra que el diseño del dispositivo cumple con las especificaciones de fuerza, espaciado y deflexión para braille mientras funciona con una presión de suministro de 100 kPag. Sin embargo, cada punto táctil requiere una válvula de control externa dedicada, lo que limita gravemente la portabilidad y escalabilidad del diseño.

### 2.4.2 Electromagnético

Estos actuadores utilizan fuerzas electromagnéticas para realizar trabajos mecánicos donde cada pin está asociado a un electroimán, para activar o desactivar los pines y crear patrones táctiles; el principio de funcionamiento consiste en un campo magnético estático, generalmente generado por un imán permanente, que interactúa con un campo magnético variable, producido por la corriente eléctrica que fluye por una o más bobinas. La fuerza que ejerce la bobina sobre el imán se puede regular modulando la corriente [18].

### 2.4.3 Piezoeléctrico

El efecto piezoeléctrico es un fenómeno en el que tipos específicos de materiales (por ejemplo, cuarzo, topacio, etc.) producen una carga eléctrica proporcional a la tensión mecánica que se les aplica. Además, la deformación geométrica de estos materiales es proporcional a los cambios en el campo eléctrico aplicado [19]. Los actuadores piezoeléctricos pueden impulsar de manera eficiente los pines para crear patrones táctiles. El actuador piezoeléctrico tiene una alta frecuencia de actualización de pines, una fuerza táctil de pines y un desplazamiento de pines adecuada [20]. Actualmente, la mayoría de las pantallas Braille actualizables comerciales están diseñados en base a actuadores piezoeléctricos.

### 2.4.4 Aleaciones con memoria de forma

Las aleaciones con memoria de forma son una clase única de aleaciones que pueden recordar y recuperar su forma original después de ser deformadas. El Nitinol, una aleación de níquel y titanio, es uno de los materiales más utilizados en esta categoría debido a sus excelentes propiedades mecánicas y eléctricas. Esta aleación puede alcanzar hasta un 5% de tensión y un estrés de recuperación de 50,000 psi. Sin embargo, el uso de aleaciones con memoria de forma está limitado por la velocidad de enfriamiento, que requiere niveles de potencia más altos para mejorar [21].

Principio de actuación	Ventajas	Desventajas
Hidráulico-Neumático	Fuerza y potencia, respuesta rápida durabilidad	Tamaño y complejidad, alto consumo de energía, costo fabricación, ruido y vibraciones.
Electromagnético	Fuerza y potencia, respuesta rápida, durabilidad, robustez	Consumo de energía, generación de calor, necesidad de componentes externos, interferencia electromagnética
Piezoeléctrico	Alta precisión, respuesta rápida, bajo consumo de energía, tamaño compacto	Recorrido limitado, fragilidad relativa, rango de fuerza limitado
Aleación con memoria de forma	Respuesta rápida, bajo consumo de energía, tamaño compacto, no requiere componentes externos	Control de temperatura, velocidad limitada, complejidad en el diseño, sensible a la temperatura, fuerza limitada

**Tabla 2.2:** Ventajas y desventajas de los principios de actuación para la activación de pines. Fuente: elaboración propia.

## 2.5 Interfaces táctiles actuadas por principios electromagnéticos

En este trabajo se eligió desde el comienzo el principio de actuación electromagnético como mecanismo de actuación. En esta sección se presentan algunos trabajos presentes en la literatura que muestran el desarrollo de una interfaz táctil haciendo uso de actuadores que funcionan con principios electromagnéticos.

[22] propone un mecanismo capaz únicamente de alternar los pines en dos estados: activo y no activo. Esta solución tiene como objetivo principal la representación de información en braille. Esto se consiguió con un pestillo abatible insertado con un imán de forma excéntrica que es accionado y volteado por la bobina móvil que sobresale y empuja el pin braille. Luego actúa como un pestillo para bloquear y mantener el saliente del pasador sin consumo de energía adicional. Desarrollaron módulos de visualización braille con un total de 192 pines (16 columnas y 12 filas). El espaciado entre cada pin

se estableció en 2,5 mm, mientras que el grosor de la pantalla fue de aproximadamente 5,5 mm. Cada uno de estos pines es capaz de cambiar de estado en un tiempo de funcionamiento de 5 ms, requiriendo una potencia de 1 W para su operación.

[23] Cada actuador consta de un imán permanente móvil colocado en una cavidad cuadrada y cuatro imanes permanentes fijos ubicados alrededor para mantener magnéticamente el imán permanente móvil en una de las cuatro posiciones discretas, incluso en caso de disturbios. Debajo de la cavidad se colocan dos cables portadores de corriente independientes y ortogonales para realizar la conmutación, el electroimán es el encargado de desplazar el imán permanente en la posición requerida.

[24] describe una pantalla Braille innovadora que ofrece rendimiento estable, larga vida útil y bajo costo. Utiliza un mecanismo electromagnético para los puntos Braille, permitiendo una disposición densa y proporcionando suficiente fuerza de soporte. Un resorte de compresión en forma de T asegura que los puntos Braille puedan retroceder instantáneamente, lo que facilita la lectura rápida del Braille. Los resultados experimentales muestran que funciona bien a 6 V, con una fuerza de soporte superior a 150 mN, una frecuencia de actualización máxima de 50 Hz y una temperatura de funcionamiento por debajo de 32 °C.

[18] emplea un solenoide junto con una barra ferromagnética y un resorte circundante para crear un dispositivo que cumple con los estándares de diseño Braille. Se organizan seis elementos en una matriz 3x2 utilizando adaptadores para la distancia adecuada entre las clavijas Braille. La operación se controla mediante un microcontrolador Arduino-Micro, que utiliza relés para activar la corriente en los solenoides. La configuración hacia abajo requiere 4.30 V y 240 mA para vencer la resistencia del resorte, consumiendo 1W de energía, mientras que la configuración hacia arriba no necesita voltaje ya que es sostenida por el resorte.

[25] desarrollo MagTics, una interfaz háptica portátil y flexible basada en taxeles bidireccionales accionados magnéticamente. Esta interfaz presenta un diseño delgado y flexible que permite una retroalimentación háptica de alta calidad en entornos móviles enfrentando al problema de la escasez de atención visual. MagTics utiliza un mecanismo de actuación con un enganche electromagnético bistable que combina alta velocidad de actualización, fuerza de retención y bajo consumo de energía, todo ello en un factor de forma suave y flexible.

## 2.6 Interfaces 2.5D

A diferencia de las pantallas Braille, en éstas interfaces los pines no adoptan solo dos posiciones, sino que pueden desplazarse en el eje Z en un espacio de tres dimensiones. El propósito de estas interfaces es permitir al usuario explorar con sus manos no solo información de contornos, sino también de la superficie de un objeto para obtener una sensación espacial producto del desplazamiento vertical de una serie de taxeles de una matriz 2D de pines.

Se ha demostrado que explorar con las manos, en lugar de solo explorar contornos con



la yema de los dedos, facilita al invidente la comprensión de una escena, permitiéndole por ejemplo, hacer diseños CAD y explorar el resultado de su diseño [3,4,5,6,7].

No obstante, el desarrollo de interfaces 2.5D aún es un campo incipiente, y no existen prototipos comerciales disponibles en el mercado. Se han desarrollado prototipos de laboratorio, a baja escala y densidad de pines, siendo a la fecha un desafío importante la construcción de un mecanismo de actuación que permita el desplazamiento vertical de los pines de manera que se ocupe poco espacio entre pines, que no impliquen diseños de gran tamaño, que su consumo de potencia eléctrica sea eficiente y que no produzcan ruido (el sentido del oído es fundamental para las personas con discapacidad visual y por lo tanto el ruido produce una sensación distractora insatisfactoria para este tipo de personas).

# Capitulo 3

## Objetivos

### 3.1 Objetivo General

Proponer un mecanismo de actuación para el frenado controlado de la caída de pines de un prototipo de despliegue táctil 2.5D que se explore con las manos, usando el principio de frenado electromagnético.

### 3.2 Objetivo Especifico

1. Construir un prototipo de despliegue táctil de baja densidad de pines, útil para la representación 2.5D de patrones gráficos.
2. Diseñar un mecanismo de actuación para el refresco de los pines en posiciones controladas utilizando el principio de frenado electromagnético.
3. Evaluar parámetros de desempeño del mecanismo propuesto en cuanto a consumo de potencia, velocidad de refresco y fuerza de frenado logrados.

# Capítulo 4

## Materiales y métodos.

Como se describió en la sección 2.6, a la fecha la construcción de mecanismos de actuación eficaces para una interfaz 2.5D continúa siendo un campo desafiante, por lo que no se han logrado desarrollar interfaces 2.5D comerciales. Este trabajo de investigación es exploratorio y busca proponer soluciones al problema de la actuación mediante el principio electromagnético, en búsqueda de una propuesta innovadora en este campo.

La base para la propuesta de un mecanismo de actuación es un diseño CAD que permita evaluar la viabilidad de los diseños, los cuales deben tener como principal característica, la de ocupar un espacio razonablemente pequeño para exploración con las manos de una superficie. En este trabajo se proponen cuatro posibles diseños de actuadores bajo el principio de frenado electromagnético, en búsqueda del cumplimiento óptimo los desafíos planteados.

El capítulo presenta inicialmente el principio general de funcionamiento denominado frenado electromagnético. Posteriormente se realiza un análisis detallado de las cuatro propuestas de actuadores desarrolladas bajo este principio, presentando su composición y funcionamiento. Posteriormente se presenta una evaluación de las características funcionales de cada propuesta para determinar cuál de ellas es la mejor opción para su implementación.

### 4.1 Principio de frenado electromagnético

Una opción para la actuación de pines en interfaces 2.5D es usar un motor por cada pin, permitiendo el desplazamiento vertical de cada pin en un rango continuo de posiciones. De hecho, el prototipo en [26] hace uso de este principio de actuación.

Esta solución posee ventajas y desventajas. Su principal ventaja es la simplicidad del mecanismo ya que los actuadores lineales están disponibles de manera comercial con mecanismos de control de posición precisos. Entre sus principales desventajas está que no es posible lograr una gran densidad de pines (número de pines por unidad de volumen) por el volumen ocupado por un actuador lineal. Aparte, la velocidad de refresco no es buena debido a el lento posicionamiento del actuador lineal, y el dispositivo genera mucho ruido acústico si la densidad de pines es grande. El consumo de potencia también puede llegar a ser poco eficiente debido a la gran cantidad de motores necesarios para lograr densidades de pines que permitan al usuario percibir una superficie detallada.

Por las anteriores razones, en este proyecto de investigación se explora la idea del frenado de pines en lugar de la actuación del movimiento. Este principio busca reducir drásticamente la cantidad de motores necesarios mediante el uso de una plataforma móvil

que empuje hacia arriba todo un grupo de pines, para que en una fase posterior de descenso de la plataforma, se frenen o bloqueen los pines que se desea que queden fijos en una posición. La forma de hacer este frenado es el tema de investigación en este proyecto ya que solo hay un referente en la literatura propuesto por la universidad Stanford [16] pero que por los limitantes tecnológicos en nuestro entorno no podría realizarse ya que implica la fabricación en técnica de película delgada de una serie de bobinas con materiales de alta conductividad.

Se propusieron cuatro prototipos de frenado de pines en este contexto (sección 4.2). Tras una evaluación exhaustiva (sección 4.3), se seleccionó un prototipo específico. A partir de esta elección, se llevó a cabo el diseño detallado de la plataforma móvil, utilizando como base el prototipo seleccionado.

## 4.2 Propuestas de mecanismos de actuación

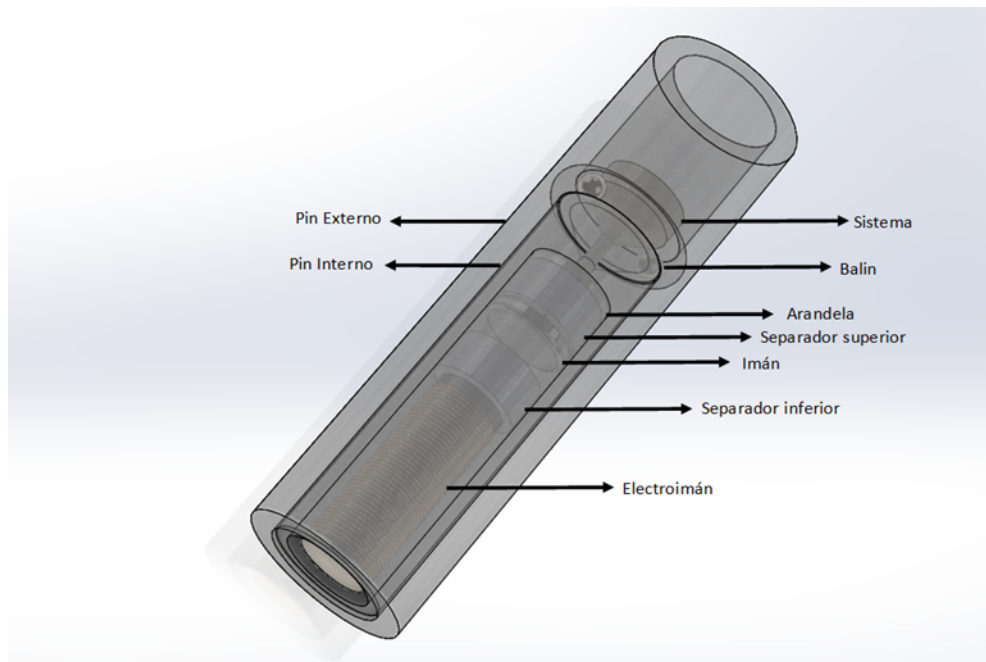
En este trabajo se exploraron 4 mecanismos de frenado electromagnético. En esta sección se describe la composición y principio de funcionamiento de cada propuesta.

### 4.2.1 Prototipo A

El prototipo A permite el bloqueo de un pin móvil externo en pasos discretos mediante obstrucción física usando balines.

#### Ensamble

A continuación se presenta el modelo del mecanismo de bloqueo en la propuesta A. La figura 4.1 muestra los componentes externos del mecanismo. El pin externo tiene forma cilíndrica con orificios laterales, siendo este pin móvil, el que puede ser empujado hacia arriba por la plataforma móvil descrita en la sección 4.1, o caer por su propio peso. El pin interno en cambio está fijo y no puede ser movido por la plataforma, su función es contener el mecanismo de frenado el cual bloquea al pin externo cuando unos balines son empujados para calzar en los orificios del pin externo, o liberar al pin externo cuando los balines son retraídos por el mecanismo de actuación. El funcionamiento detallado y las partes constitutivas del mecanismo se presentan en las siguientes subsecciones.



**Figura 4.1:** Modelo del prototipo A con sus partes. Fuente: Elaboración Propia.

La figura 4.2 muestra una vista frontal, una vista frontal al interior del pin externo, y una vista frontal al interior del pin interno respectivamente del prototipo A.



**Figura 4.2:** Ensamble prototipo A. Fuente: Elaboración Propia.

### Funcionamiento

La figura 4.3 muestra el electroimán y el imán de neodimio. Cuando se hace pasar una corriente por el electroimán, se crea una fuerza magnética con una polaridad que puede provocar, a conveniencia, o bien la repulsión del imán de neodimio o bien la atracción del imán de neodimio si se invierte el sentido de la corriente del electroimán. Para evitar que el imán se adhiriera al metal del electroimán y la fuerza de atracción prevenga el movimiento de repulsión se utiliza la pieza Separador, construido con material plástico no magnético y que va adherido al electroimán, el cual siempre está fijo. En la Figura 4.4 se muestra la función de la pieza Separador.



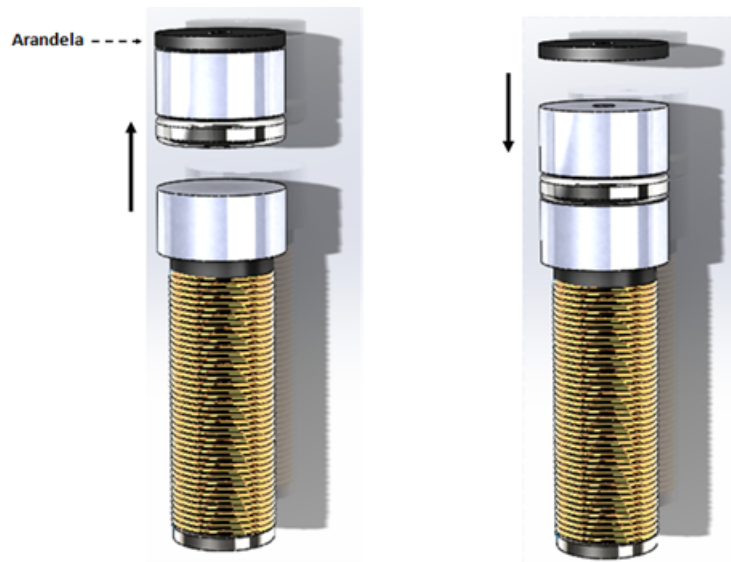
**Figura 4.3:** Interacción entre imán de neodimio y electroimán. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 4.4:** Función de la pieza separador. Fuente: Elaboración Propia.

En esta propuesta de actuador se desea que hayan dos posiciones, una de desbloqueo del pin externo, que es la posición de reposo que no requiere corriente aplicada en el electroimán; y una posición de bloqueo del pin externo, en la cual se debe aplicar corriente al electroimán. Para lograr que el mecanismo permanezca en posición de desbloqueo sin acción de corriente, se utiliza la pieza Arandela, una pieza metálica que está adherida al pin interno y que permanece inmóvil. Sin corriente aplicada la pieza Arandela atrae al imán de neodimio y lo hace permanecer en esa posición, como se ilustra en la figura de la izquierda en la Figura 4.5. Con corriente aplicada, la fuerza del electroimán vence la atracción de la arandela y se produce el movimiento hacia abajo del imán de neodimio como se observa en la figura de la derecha de la Figura 4.5. Nuevamente, para evitar que el imán de neodimio se adhiriera fuertemente a la arandela y que no sea posible desprenderlo de esa posición, se debe utilizar otra pieza separadora de plástico, que ahora va adherida al imán en la cara opuesta al electroimán de modo que imán y pieza separadora se mueven conjuntamente.

Continuando con la descripción del mecanismo de frenado, refiérase a la Figura 4.5.



**Figura 4.5:** Descripción de la pieza Arandela. Permite mantener al imán de neodimio en la posición de reposo (izquierda) sin acción eléctrica. Al aplicarse corriente al electroimán, se vence la fuerza de atracción a la arandela (derecha). Fuente: Elaboración Propia.

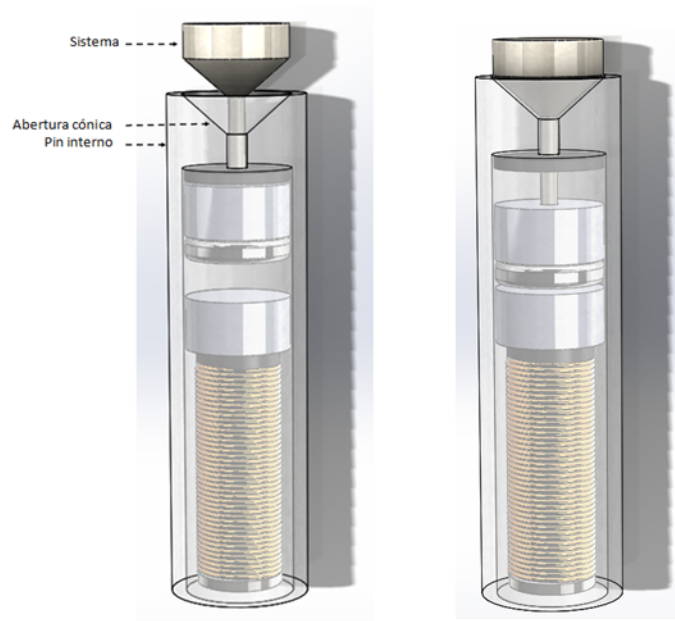
El pin interno, es una pieza fija que no puede moverse con la plataforma y que contiene a todo el mecanismo de bloqueo. Esta pieza cilíndrica en su extremo superior posee una Abertura cónica diseñada para que en ella calce la pieza denominada Sistema, una especie de vástago cónico cuya función es forzar a los balines (no ilustrados en la figura pero cuyo funcionamiento se explicará mas adelante) a la posición de desbloqueo en estado de reposo del actuador.

En la condición de reposo del actuador (sin corriente aplicada al electroimán), la pieza arandela atrae al imán de neodimio. En esta posición, el vástago es empujado hacia afuera por este conjunto de imán de neodimio y separador por la parte inferior del vástago que pasa por el orificio de la arandela metálica, como se ilustra en la parte izquierda de la Figura 4.5, lo que producirá la liberación del bloqueo del pin externo por la caída de los balines, como se explicará en el siguiente párrafo. Cuando se aplica la polaridad adecuada para que el electroimán atraiga al imán de neodimio, el peso del vástago hace que éste caiga hacia la abertura cónica, con lo que los balines serán forzados al bloqueo del pin externo como se describirá en el siguiente párrafo. Esta situación se ilustra en la parte derecha de la Figura 4.5.

Cuando la pieza Sistema ingresa en la abertura cónica del pin interno, provoca el desplazamiento del balón hacia el exterior. Este balón luego ingresa en la abertura correspondiente del pin exterior, obstaculizando así el movimiento del pin exterior y bloqueando el mecanismo. Al salir el sistema de la abertura cónica del pin interno, el balón vuelve a su posición original, como se muestra en la figura 4.7, desbloqueando el mecanismo en ese proceso.

Para ilustrar de mejor manera la secuencia de acciones que ocurren en el bloqueo y desbloqueo del pin externo, la figura 4.8 presenta un diagrama de causalidad para el caso de desbloqueo del pin externo.

la figura 4.9 presenta un diagrama de causalidad para el caso de bloqueo del pin externo.

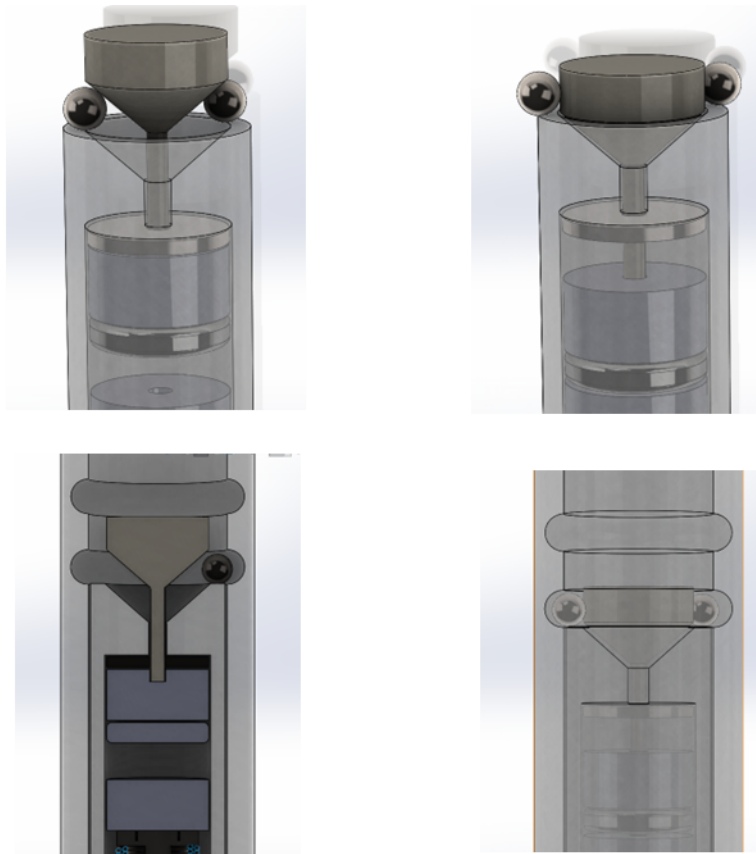


**Figura 4.6:** Movimiento de la pieza Sistema. Izquierda: posición de desbloqueo, pieza Sistema fuera de la abertura cónica. Derecha: posición de bloqueo, pieza Sistema ocupando la abertura cónica. Fuente: Elaboración Propia.

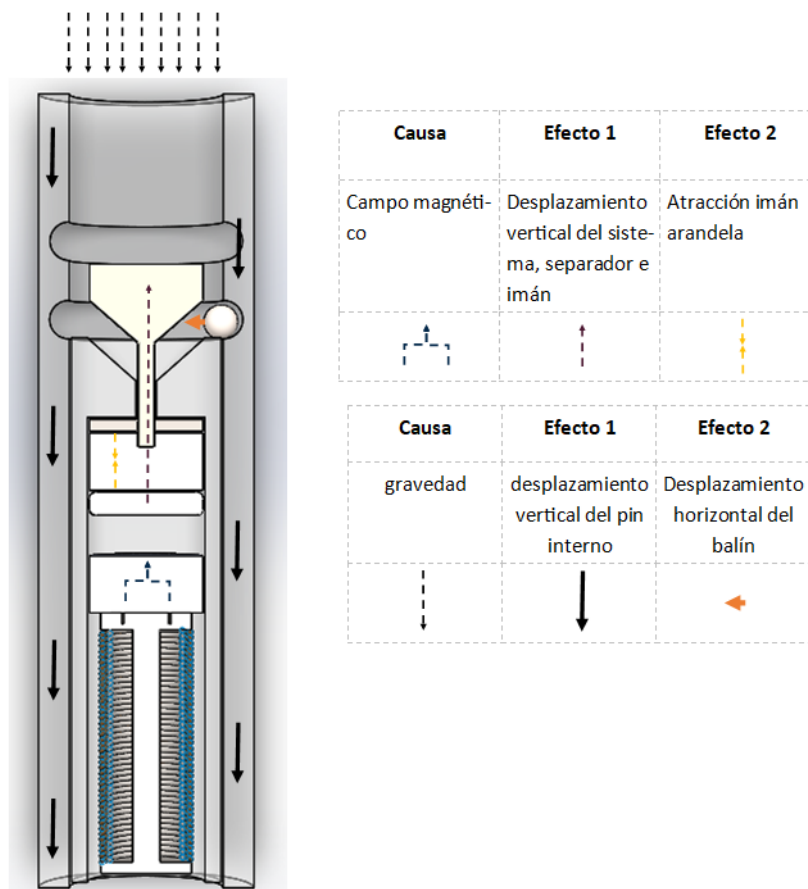
### Resumen de componentes

La propuesta de actuador A se compone de un total de 9 piezas: Pin interno, Pin externo, Imán de neodimio, Electroimán, Arandela, Separador superior, Separador inferior, Sistema vástago, Balines. El detalle del diseño de cada pieza se puede consultar en el link disponible en la sección 7.

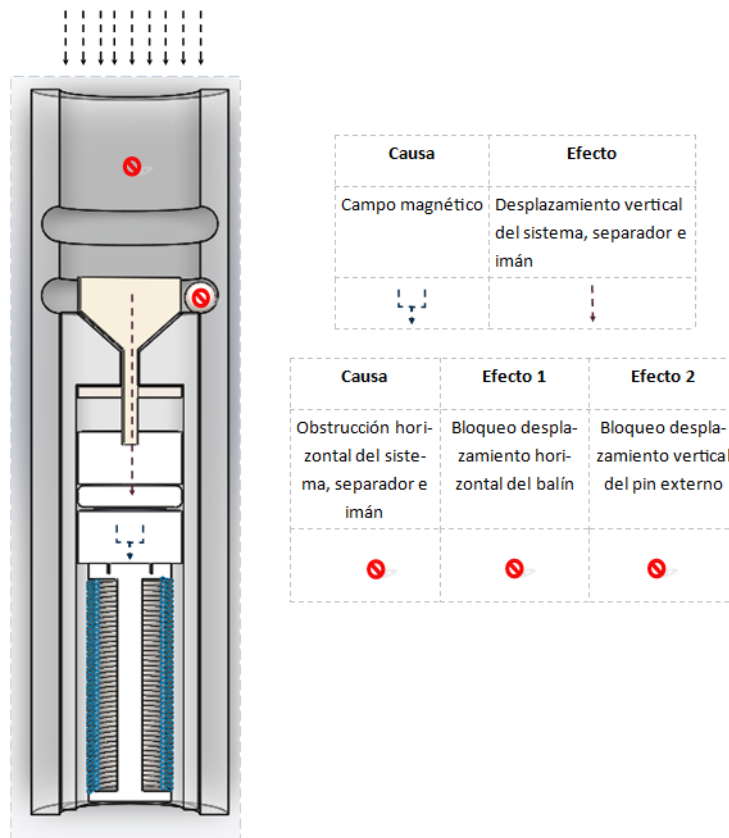




**Figura 4.7:** Derecha: desbloqueo del pin externo, los balines se ubican en el espacio entre el vástago y la abertura cónica, retrayéndose lo suficiente como para desbloquear al pin externo. Izquierda: los balines son desalojados de la abertura cónica y forzados hacia afuera del pin interno, lo suficiente como para bloquear al pin externo. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 4.8:** Funcionamiento de desbloqueo a través de una representación del diagrama causalidad del prototipo A. Fuente: Elaboración Propia.



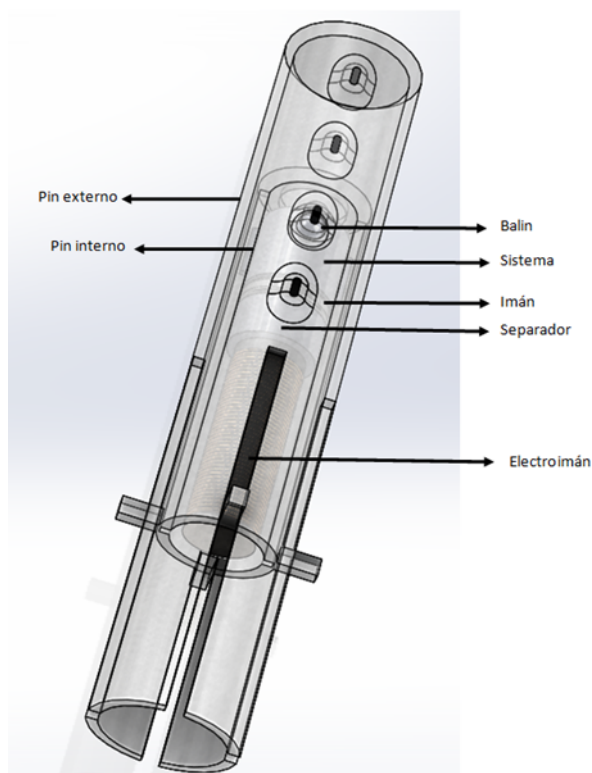
**Figura 4.9:** Funcionamiento de bloqueo a través de una representación del diagrama causalidad del prototipo A. Fuente: Elaboración Propia.

## 4.2.2 Prototipo B

Este prototipo se fundamenta en el prototipo Tipo A, lo que resulta en una similitud en su proceso de bloqueo y desbloqueo. No obstante, presenta diferencias en términos de diseño y mejoras en aspectos generales.

### Ensamble

A continuación se presenta el modelo del mecanismo de bloqueo en la propuesta B. La figura 4.10 muestra los componentes externos del mecanismo. El pin externo tiene forma cilíndrica con orificios laterales y es móvil para poder ser empujado hacia arriba por la plataforma móvil descrita en la sección 4.1, o caer por su propio peso. El pin interno en cambio está fijo y no puede ser movido por la plataforma, su función es contener el mecanismo de frenado el cual bloquea al pin externo cuando unos balines son empujados para calzar en los orificios del pin externo, o liberar al pin externo cuando los balines son retraídos por el mecanismo de actuación. El funcionamiento detallado y las partes constitutivas del mecanismo se presentan en las siguientes subsecciones.



**Figura 4.10:** Modelo del prototipo B con sus partes. Fuente: Elaboración Propia.

La figura 4.11 muestra el ensamble desde una vista frontal, una vista frontal al interior del pin externo, y una vista frontal al interior del pin interno respectivamente.

### Funcionamiento

La figura 4.12 muestra el electroimán y el imán de neodimio. Cuando se hace pasar una corriente por el electroimán, se crea una fuerza magnética con una polaridad que puede provocar a conveniencia, o bien la repulsión del imán de neodimio o bien la atracción del imán de neodimio si se invierte el sentido de la corriente del electroimán. Para evitar



**Figura 4.11:** Ensamble prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.

que el imán se adhiera al metal del electroimán y la fuerza de atracción prevenga el movimiento de repulsión se utiliza la pieza Separador, construido con material plástico no magnético y que va adherido al electroimán, el cual siempre está fijo. En la Figura 4.13 se muestra la función de la pieza Separador.



**Figura 4.12:** Interacción entre imán de neodimio y electroimán. Fuente: Elaboración Propia.

En esta propuesta de actuador se desea que hayan dos posiciones, una de desbloqueo del pin externo, que es la posición de reposo que no requiere corriente aplicada en el electroimán; y una posición de bloqueo del pin externo, en la cual se debe aplicar corriente al electroimán. Para lograr que el mecanismo permanezca en posición de desbloqueo sin acción de corriente, se utiliza la pieza Sistema, una pieza plástica móvil que está adherida al imán. Sin corriente aplicada la pieza Sistema es inmóvil y mantiene al actuador como desbloqueado, como se ilustra en la figura de la derecha en la Figura 4.14. Con corriente



**Figura 4.13:** Función de la pieza separador. Fuente: Elaboración Propia.

aplicada, la fuerza del electroimán repele el imán de neodimio y se produce el movimiento hacia arriba del imán de neodimio como se observa en la figura de la izquierda en la Figura 4.14.

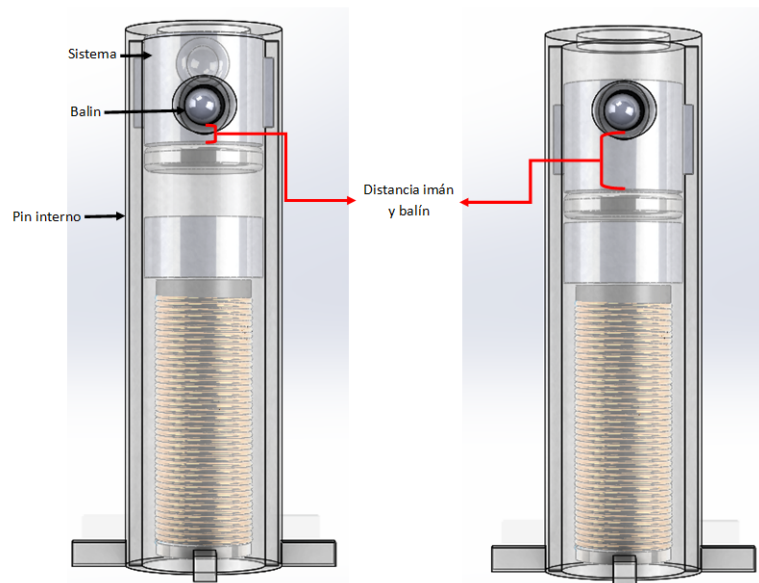


**Figura 4.14:** Descripción de la pieza Sistema. Permite mantener al balón en la posición de reposo (derecha) sin acción eléctrica. Al aplicarse corriente al electroimán, el conjunto imán y sistema expulsa el balón y bloquea el mecanismo (izquierda). Fuente: Elaboración Propia.

Continuando con la descripción del mecanismo de frenado, refiérase a la Figura 4.14.

El pin interno, es una pieza fija que no puede moverse con la plataforma y que contiene a todo el mecanismo de bloqueo. Esta pieza cilíndrica cuenta con una única abertura circular diseñada para que en ella se posicione la pieza denominada Balín, su principal función es proporcionar el espacio necesario para que el balín pueda liberarse y, al mismo tiempo, bloquear el mecanismo.

En la condición de reposo del actuador (sin corriente aplicada al electroimán), el mecanismo permanece inmóvil y el actuador esta desbloqueado, como se ilustra en la parte izquierda de la Figura 4.15 permitiendo que la plataforma mueva libremente el pin externo. Cuando se aplica la polaridad adecuada para que el electroimán repela al imán de neodimio y al sistema, el balín es empujado hacia afuera manteniendo el sistema elevado al reducir la distancia con el imán como se ilustra en la parte derecha de la Figura 4.15.



**Figura 4.15:** Movimiento de la pieza Sistema. Izquierda: posición de bloqueo, pieza Balín fuera de la abertura circular. Derecha: posición de desbloqueo, pieza Sistema ocupando la abertura circular. Fuente: Elaboración Propia.

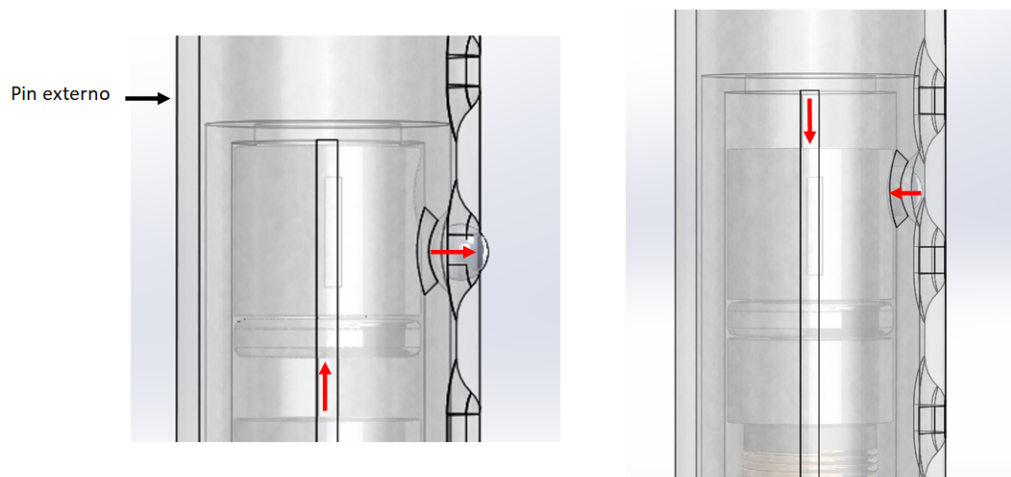
Cuando la pieza Balín sale de la abertura circular del pin interno, provoca el desplazamiento del sistema hacia la parte de arriba. Este balín luego ingresa en la abertura correspondiente del pin exterior, obstaculizando así el movimiento del pin exterior y bloqueando el mecanismo. Al entrar el balín en la abertura circular del pin interno, el balín vuelve a su posición original, como se muestra en la figura 4.16, desbloqueando el mecanismo en ese proceso.

Para ilustrar de mejor manera la secuencia de acciones que ocurren en el bloqueo y desbloqueo del pin externo, la figura 4.17 presenta un diagrama de causalidad para el caso de desbloqueo del pin externo.

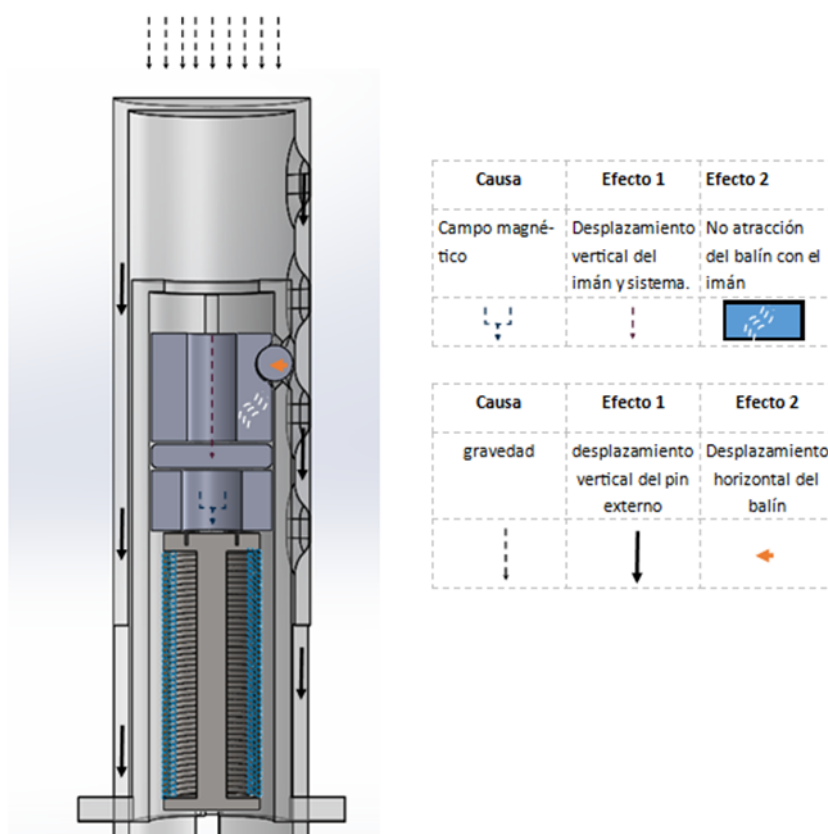
La figura 4.18 presenta un diagrama de causalidad para el caso de bloqueo del pin externo.

### Resumen de componentes

La propuesta de actuador B se compone de un total de 7 piezas: Pin interno, Pin externo, Imán de neodimio, Electroimán, Separador, Sistema, Balín. El detalle del diseño de cada



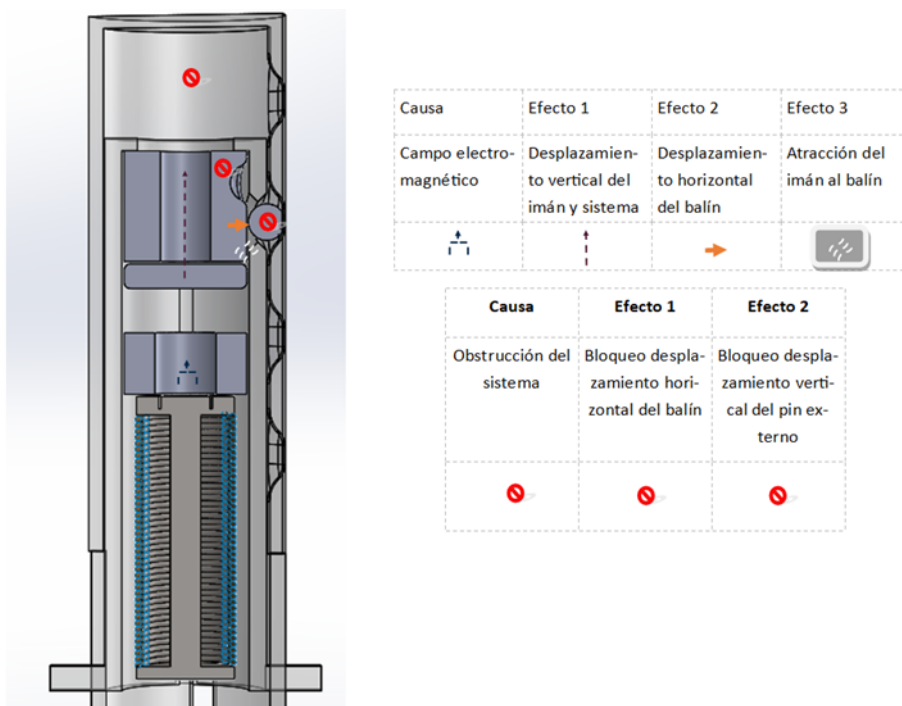
**Figura 4.16:** Funcionamiento del prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 4.17:** Funcionamiento de desbloqueo, a través de una representación del diagrama causalidad del prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.

pieza se puede consultar en el link disponible en la sección 7.





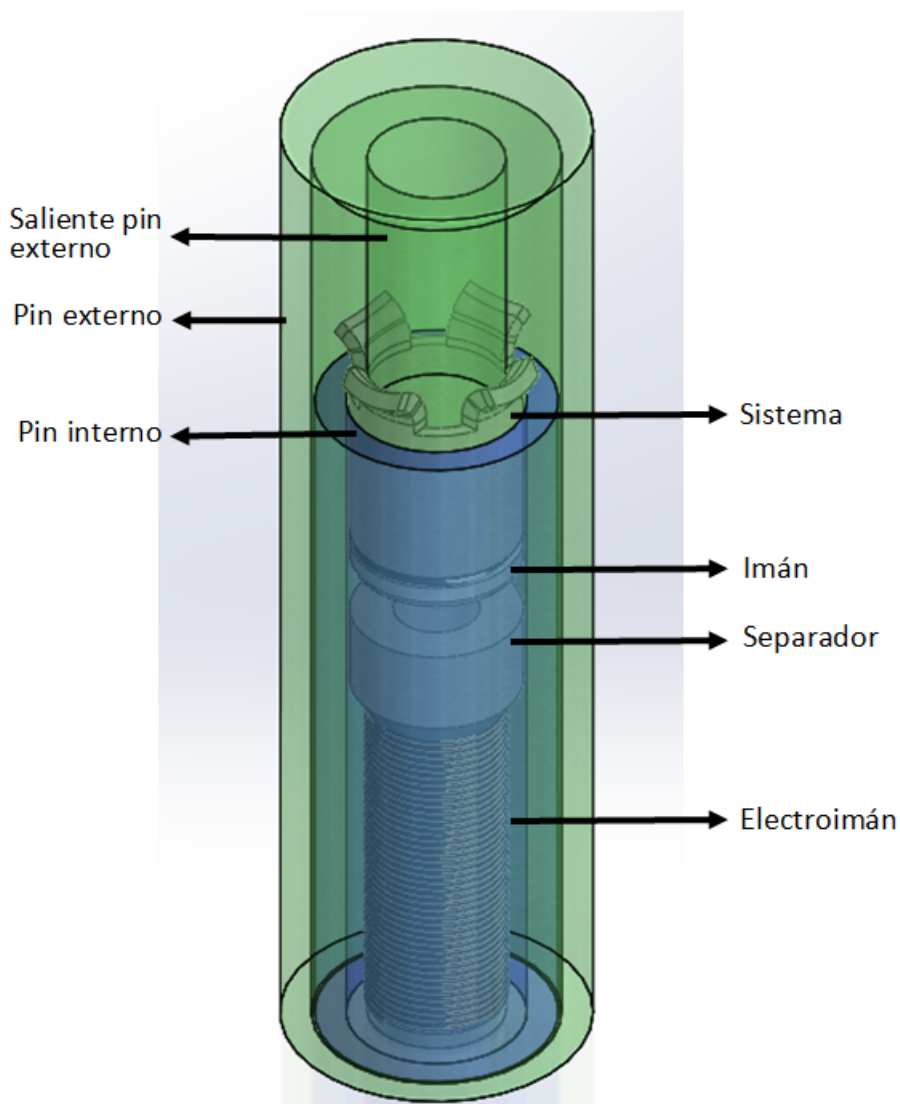
**Figura 4.18:** Funcionamiento de bloqueo, a través de una representación del diagrama causalidad del prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.

### 4.2.3 Prototipo C

Este prototipo se asemeja al comportamiento de un portaminas, donde la "mina" es bloqueada con un mecanismo que la asegura con firmeza. El prototipo C permite el bloqueo de un pin móvil de manera continua a diferencias de los prototipos A y B.

#### Ensamble

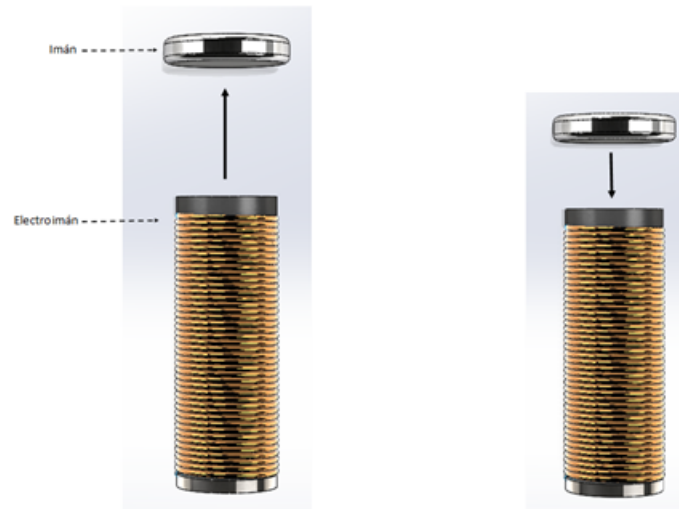
A continuación, se presenta el modelo del mecanismo de bloqueo en la propuesta C. La figura 4.19 muestra los componentes externos del mecanismo. El pin interno tiene forma cilíndrica, y es este el pin empujado hacia arriba por la plataforma móvil descrita en la sección 4.1, o caer por su propio peso. El pin interno en cambio está fijo y no puede ser movido por la plataforma, su función es contener el mecanismo de frenado el cual bloquea al pin externo cuando unos balines son empujados para calzar en los orificios del pin externo, o liberar al pin externo cuando los balines son retraídos por el mecanismo de actuación. El funcionamiento detallado y las partes constitutivas del mecanismo se presentan en las siguientes subsecciones.



**Figura 4.19:** Modelo del prototipo C con sus partes. Fuente: Elaboración Propia.

### Funcionamiento

La figura 4.20 muestra el electroimán y el imán de neodimio. Cuando se hace pasar una corriente por el electroimán, se crea una fuerza magnética con una polaridad que puede provocar, a conveniencia, o bien la repulsión del imán de neodimio o bien la atracción del imán de neodimio si se invierte el sentido de la corriente del electroimán. Para evitar que el imán se adhiera al metal del electroimán y la fuerza de atracción prevenga el movimiento de repulsión se utiliza la pieza Separador, construido con material plástico no magnético y que va adherido al electroimán, el cual siempre está fijo. En la Figura 4.21 se muestra la función de la pieza Separador.

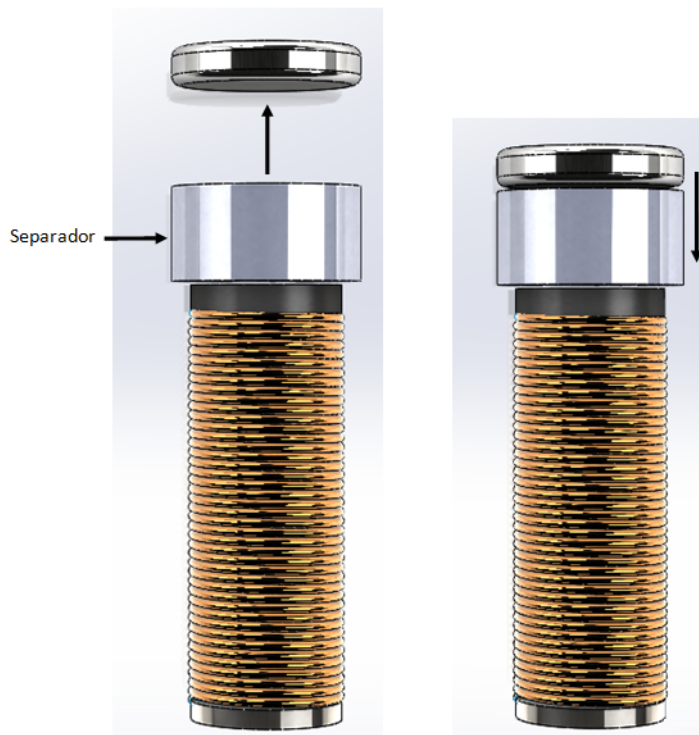


**Figura 4.20:** Interacción entre imán de neodimio y electroimán. Fuente: Elaboración Propia.

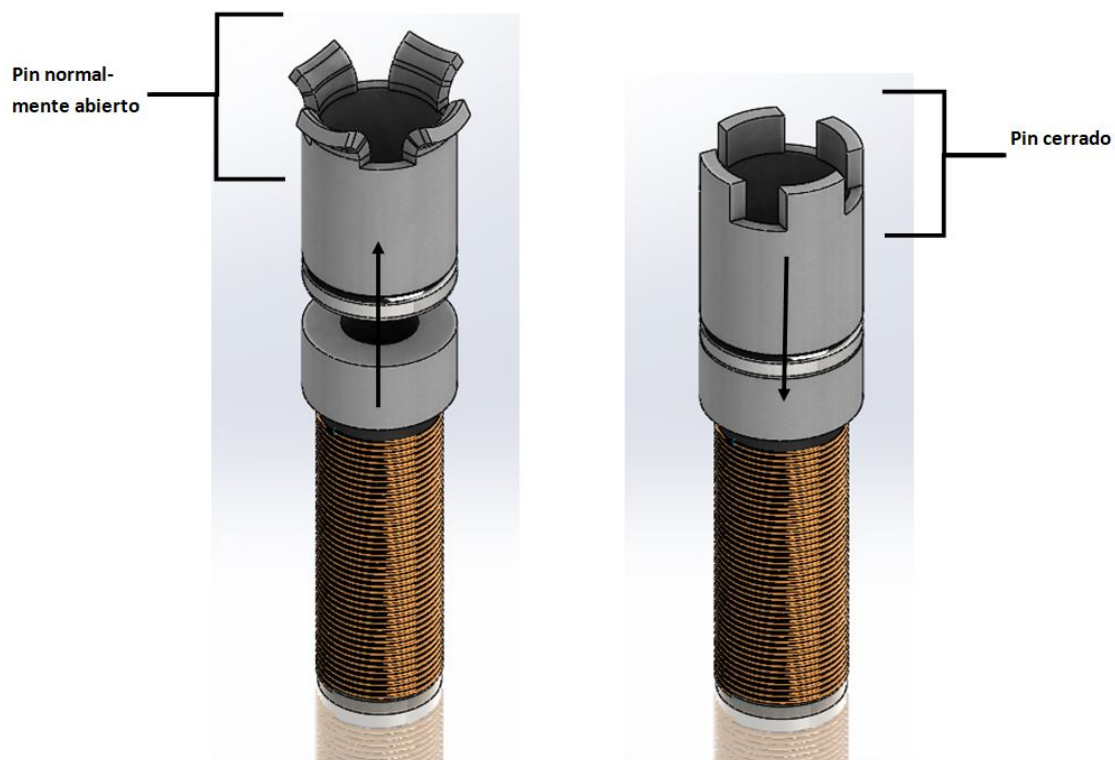
En esta propuesta de actuador se desea que hayan dos posiciones, una de desbloqueo del pin externo, que es la posición de reposo que no requiere corriente aplicada en el electroimán; y una posición de bloqueo del pin externo, en la cual se debe aplicar corriente al electroimán. Para lograr que el mecanismo permanezca en posición de desbloqueo sin acción de corriente, se utiliza la pieza Sistema, una pieza de plástico que está adherida al pin interno y que permanece inmóvil. Sin corriente aplicada la pieza Sistema permanece inmóvil, como se ilustra en la figura de la izquierda en la Figura 4.22. Con corriente aplicada, la fuerza del electroimán atrae el sistema produciendo un movimiento hacia abajo del imán de neodimio como se observa en la figura de la derecha de la Figura 4.22.

Continuando con la descripción del mecanismo de frenado, refiérase a la Figura 4.22. El pin interno, es una pieza fija que no puede moverse con la plataforma y que contiene a todo el mecanismo de bloqueo. Esta pieza cilíndrica en su parte superior posee una Abertura cónica diseñada para que en ella calce la pieza denominada Sistema, una especie de vástago cónico cuya función es forzar a los balines (no ilustrados en la figura pero cuyo funcionamiento se explicará mas adelante) a la posición de desbloqueo en estado de reposo del actuador.

En la condición de reposo del actuador (sin corriente aplicada al electroimán), las aspas del sistema permanecen abiertas. En esta posición, el vástago es empujado hacia afuera por este conjunto de imán de neodimio y separador por la parte inferior del vástago que pasa por el orificio de la arandela metálica, como se ilustra en la parte izquierda de la Figura 4.5, lo que producirá la liberación del bloqueo del pin externo por la caída

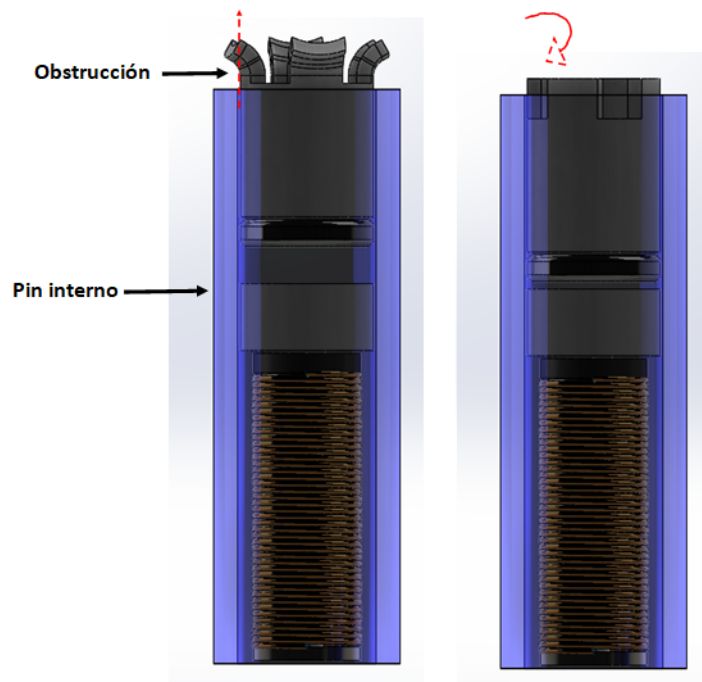


**Figura 4.21:** Función de la pieza separador. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 4.22:** Descripción de la pieza Sistema. Permite mantener al mecanismo en la posición de reposo (izquierda) sin acción eléctrica. Al aplicarse corriente al electroimán, se vence la fuerza estática del sistema (derecha). Fuente: Elaboración Propia.

de los balines, como se explicará en el siguiente párrafo. Cuando se aplica la polaridad adecuada para que el electroimán atraiga al imán de neodimio, el peso del vástago hace que éste caiga hacia la abertura cónica, con lo que los balines serán forzados al bloqueo del pin externo como se describirá en el siguiente párrafo. Esta situación se ilustra en la parte derecha de la Figura 4.5.



**Figura 4.23:** Movimiento de la pieza Sistema. Izquierda: posición de desbloqueo, aspas de la pieza Sistema fuera de la abertura. Derecha: posición de bloqueo, pieza Sistema ocupando la abertura. Fuente: Elaboración Propia.

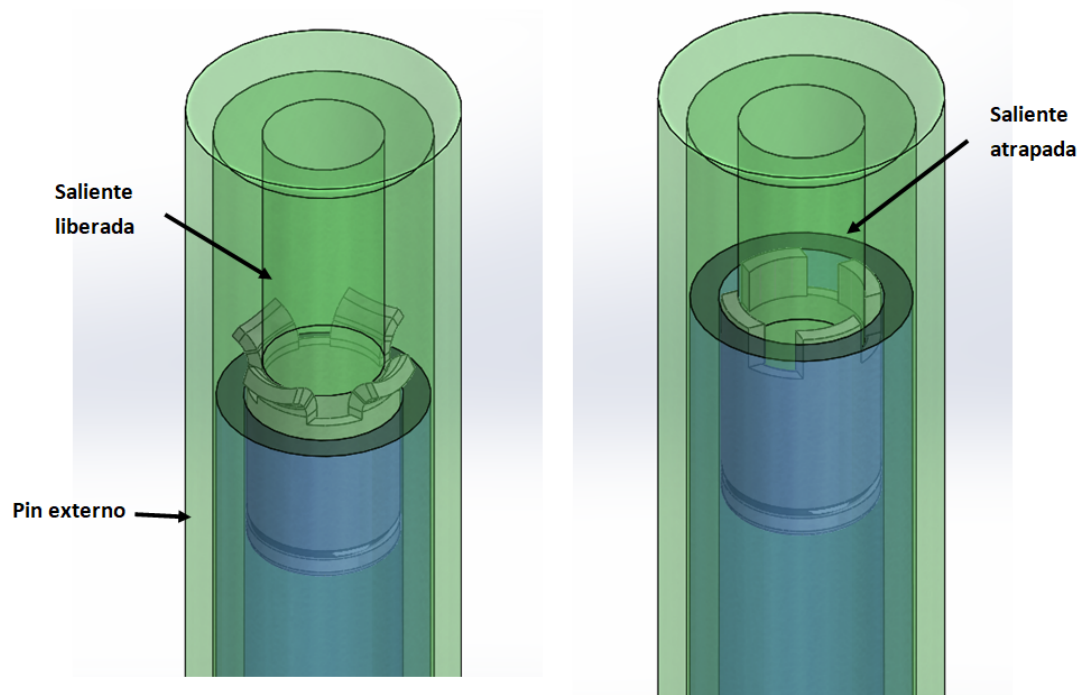
Cuando la pieza Sistema ingresa en la abertura del pin externo, provoca el desplazamiento de sus aspas hacia el interior. Estas aspas obstaculizan el movimiento del pin exterior y bloquean el mecanismo. Al salir el sistema de la abertura del pin externo, el sistema vuelve a su posición original, como se muestra en la figura 4.22, desbloqueando el mecanismo en ese proceso.

Para ilustrar de mejor manera la secuencia de acciones que ocurren en el bloqueo y desbloqueo del pin externo, la figura 4.25 presenta un diagrama de causalidad para el caso de desbloqueo del pin interno.

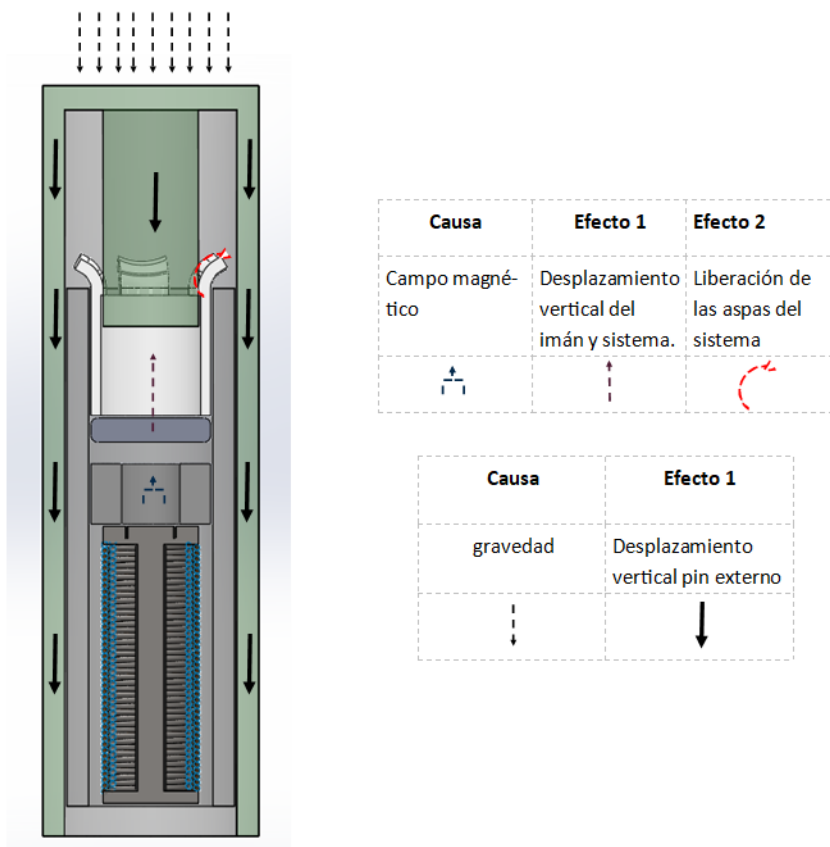
La figura 4.26 presenta un diagrama de causalidad para el caso de bloqueo del pin interno.

### Resumen de componentes

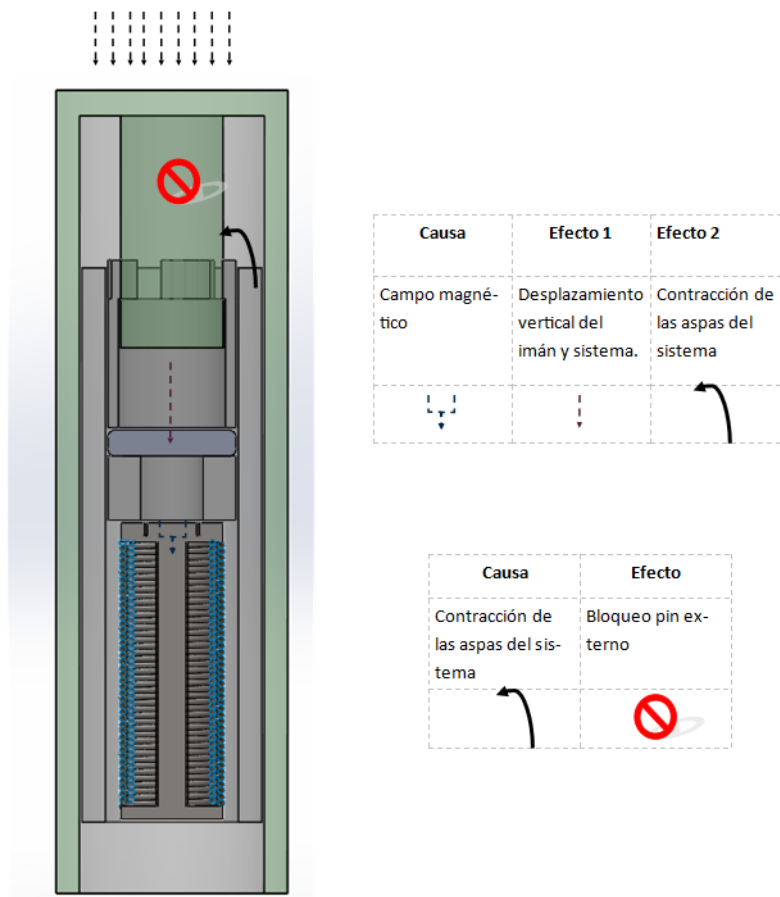
La propuesta de actuador C se compone de un total de 6 piezas: Pin interno, Pin externo, Electroimán, Separador, Sistema, Imán de neodimio. El detalle del diseño de cada pieza se puede consultar en el link disponible en la sección 7.



**Figura 4.24:** Derecha: bloqueo del pin externo, las espigas del sistema se retraen lo suficiente como para bloquear al pin externo. Izquierda: las espigas del sistema son desalojados de la abertura y forzadas hacia afuera del pin interno, lo suficiente como para desbloquear al pin externo. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 4.25:** Funcionamiento de desbloqueo del prototipo C, a través de una representación del diagrama causalidad. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 4.26:** Funcionamiento de bloqueo del prototipo C, a través de una representación del diagrama causalidad. Fuente: Elaboración Propia.

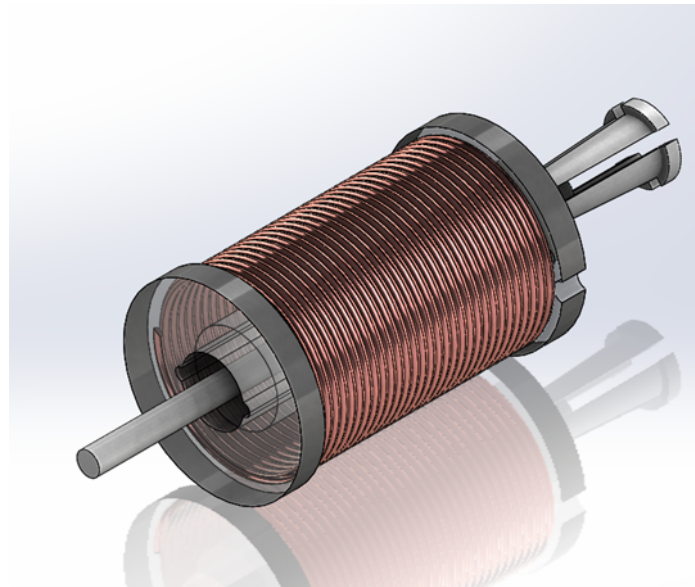


### 4.2.4 Prototipo D

Este prototipo se fundamenta en el prototipo Tipo C, lo que resulta en una similitud en su proceso de bloqueo y desbloqueo. No obstante, presenta diferencias en términos de diseño y mejoras en aspectos generales.

#### Ensamble

A continuación se presenta el modelo del mecanismo de bloqueo en la propuesta D. La figura 4.27 muestra los componentes del actuador. El pin interno puede ser empujado hacia arriba por la plataforma móvil descrita en la sección 4.1, o caer por su propio peso. El electroimán en cambio está fijo y no puede ser movido por la plataforma, su función es contener el mecanismo de frenado el cual bloquea al pin interno cuando el sistema es estrechado, o liberar al pin interno cuando el sistema es ensanchado. El funcionamiento detallado y las partes constitutivas del mecanismo se presentan en las siguientes subsecciones.



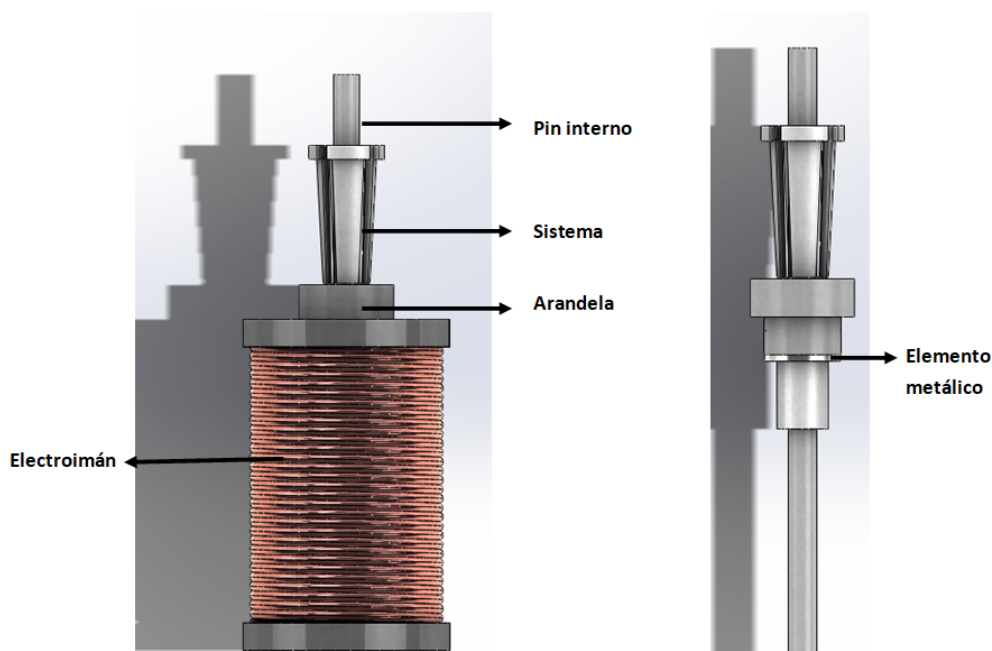
**Figura 4.27:** Modelo prototipo D. Fuente: Elaboración Propia.

La figura 4.28 muestra una vista frontal del actuador y una vista frontal del mecanismo de frenado.

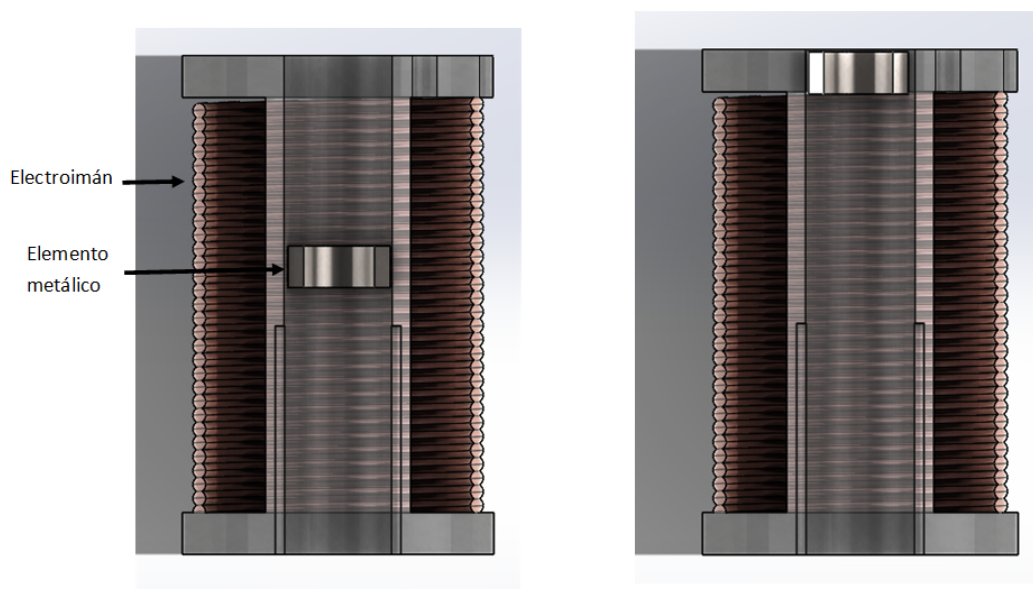
#### Funcionamiento

Su funcionamiento se sustenta en el principio del cañón de Gauss, el cual se fundamenta en la aplicación ordenada de fuerzas magnéticas para impulsar un objeto a lo largo de un conducto o tubo; este principio se ejecuta en el mecanismo de la siguiente manera:

La figura 4.29 muestra el electroimán y el elemento metálico. Cuando se hace pasar una corriente por el electroimán, se crea una fuerza magnética con una polaridad que puede provocar, a conveniencia, o bien la atracción del objeto metálico hacia el centro del electroimán o bien la repulsión del objeto metálico si se invierte el sentido de la corriente del electroimán. El elemento metálico está firmemente adherido al sistema, por lo que estas piezas se moverán en conjunto, como se ilustra en la figura 4.30.

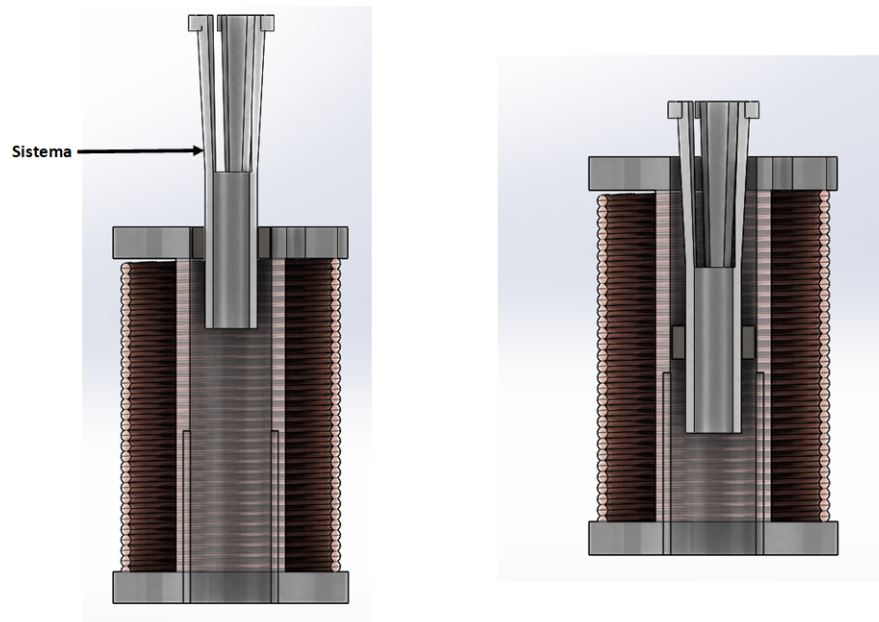


**Figura 4.28:** Mecanismo del prototipo D. Fuente: Elaboración Propia.

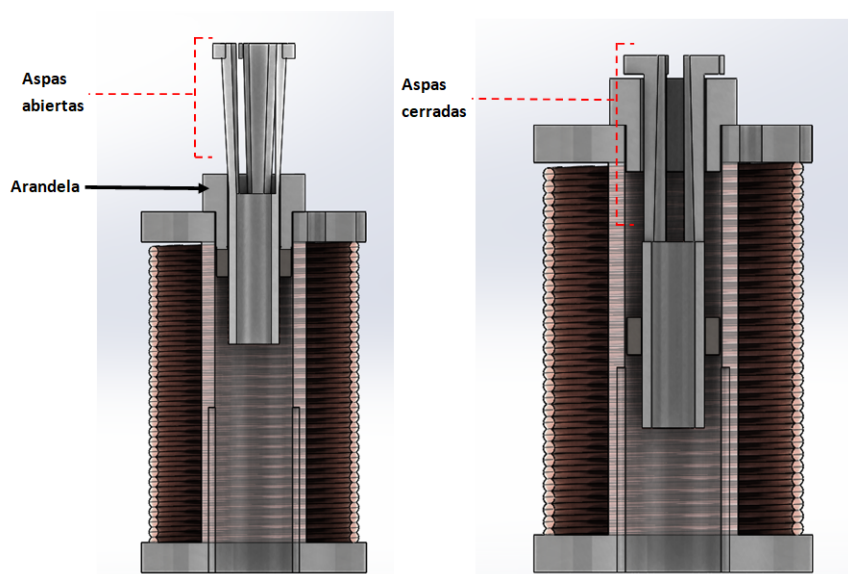


**Figura 4.29:** Interacción entre el elemento metálico y electroimán. Fuente: Elaboración Propia.

En esta propuesta de actuador se desea que el frenado sea continuo, para lograr esto e necesario aplicar una corriente, la cual busca que la fuerza del electroimán atraiga el elemento metálico produciendo que baje junto con el sistema como se observa en la figura de la derecha de la Figura 4.31. El actuador también cuenta con una posición de reposo que no requiere corriente aplicada en el electroimán. Para lograr que el mecanismo permanezca en posición de desbloqueo sin acción de corriente, se utiliza la pieza Arandela, una pieza metálica que impide que el sistema sea bloqueado si no es atraído con una gran fuerza como se ilustra en la figura de la izquierda en la Figura 4.31.



**Figura 4.30:** Función de la pieza sistema. Fuente: Elaboración Propia.

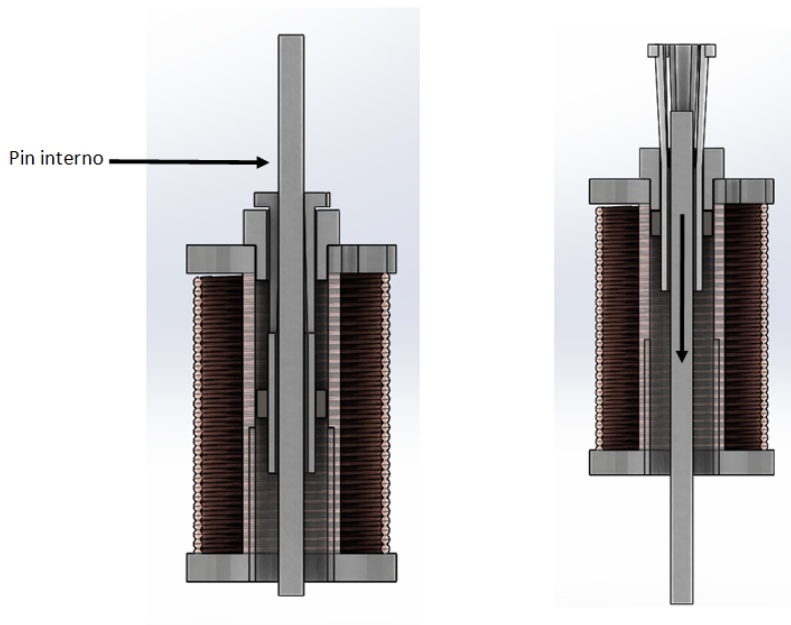


**Figura 4.31:** Mecanismo del prototipo D. Fuente: Elaboración Propia.

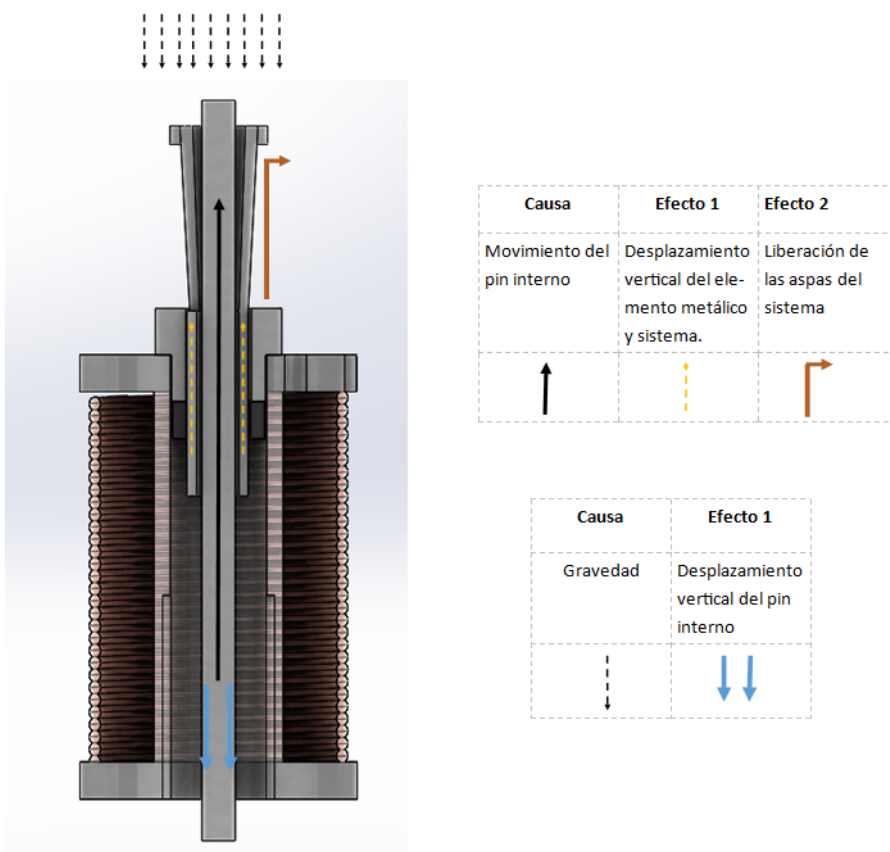
Dentro de todo el mecanismo se encuentra el pin interno, el cual es sujeto o liberado por las aspas del sistema, permitiendo así el bloqueo o desbloqueo según la posición deseada, tal como se representa en la figura 4.32

Para ilustrar de mejor manera la secuencia de acciones que ocurren en el bloqueo y desbloqueo del pin externo, la figura 4.33 presenta un diagrama de causalidad para el caso de desbloqueo del pin interno.

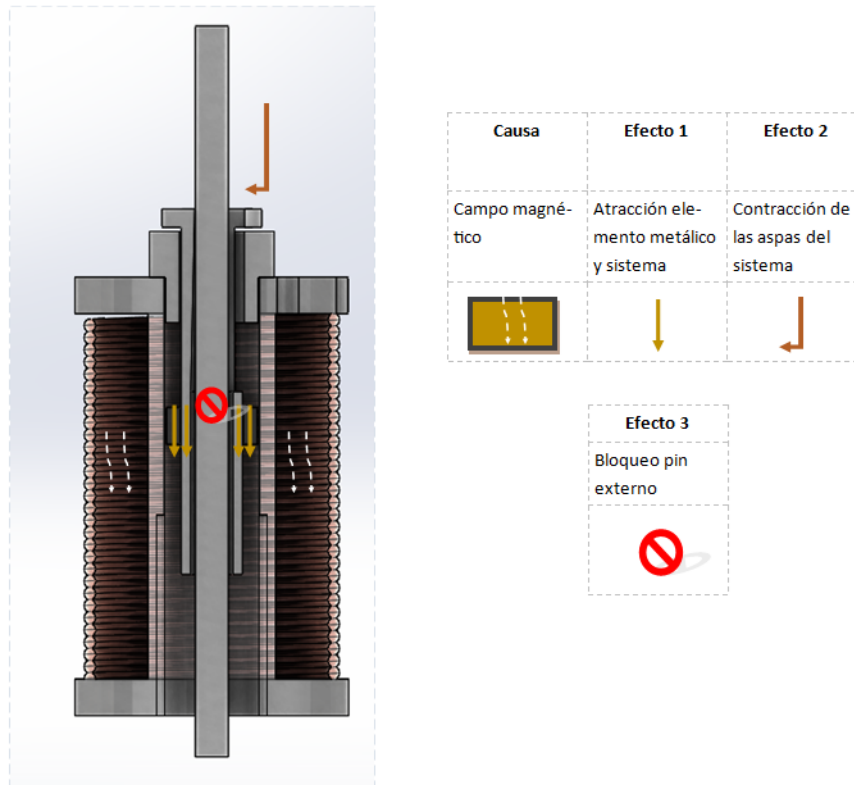
La figura 4.34 presenta un diagrama de causalidad para el caso de bloqueo del pin interno.



**Figura 4.32:** Funcionamiento del pin interno del prototipo D. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 4.33:** Funcionamiento de desbloqueo, a través de una representación del diagrama causalidad del prototipo D. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 4.34:** Funcionamiento de bloqueo, a través de una representación del diagrama causalidad del prototipo D. Fuente: Elaboración Propia.

### Resumen de componentes

La propuesta de actuador D se compone de un total de 5 piezas: Pin interno, Electroimán, Arandela, Sistema, Elemento metálico. El detalle del diseño de cada pieza se puede consultar en el link disponible en la sección 7.

## 4.3 Evaluación funcional de los prototipos propuestos

Para evaluar el diseño del mecanismo a elaborar, se destacan cinco atributos fundamentales:

### 4.3.1 Atributos a evaluar

#### Cantidad de piezas

La consideración de la cantidad de piezas en el diseño de un mecanismo influye en varios aspectos clave de su desempeño y viabilidad. En particular, la adopción de un enfoque con menos componentes presenta múltiples implicaciones que inciden directamente en la operación, mantenimiento y economía del sistema en cuestión.

Algunos aspectos que se favorecen con una menor cantidad de piezas son: capacidad de realizar ajustes y correcciones de manera eficiente, facilidad de mantenimiento y reparación, facilita la resolución de problemas y la implementación de mejoras, influencia en reducción de costos lo que también puede tener un impacto positivo en la viabilidad y la accesibilidad del mecanismo en el mercado.

Sin embargo, es crucial equilibrar la reducción de componentes con las demandas funcionales y la integridad estructural. Aunque menos piezas pueden simplificar la comprensión y el mantenimiento, también podrían impactar en la eficiencia y la capacidad de realizar tareas complejas. Por lo tanto, un enfoque en la optimización de la cantidad de piezas debe estar respaldado por un análisis exhaustivo de las necesidades y objetivos específicos del mecanismo en cuestión.

#### Complejidad de fabricación

La menor complejidad en un mecanismo tiene efecto sobre la operación eficiente, el mantenimiento efectivo, la seguridad y la solución de problemas. Esta consideración se traduce en un mayor control del mecanismo, una menor probabilidad de errores y un uso más seguro y productivo en general. En el análisis y diseño de sistemas mecánicos, la búsqueda de la simplicidad en la complejidad emerge como un factor esencial para garantizar un desempeño óptimo y una experiencia satisfactoria para los usuarios.

#### Peso del mecanismo

El peso de una pieza movida por un electroimán tiene implicaciones significativas en cuanto a capacidad, eficiencia, durabilidad, consumo de energía, precisión y confiabilidad. Es esencial sopesar adecuadamente este factor al diseñar sistemas con electroimanes, considerando tanto las capacidades del electroimán como los requisitos operativos y de seguridad específicos de cada aplicación.

### Tamaño del mecanismo

La disminución del tamaño del mecanismo es una estrategia clave al explorar una matriz de pines mediante percepción háptica con las manos, ya que la densidad de pines, entendida como el número de pines por unidad de volumen, es importante para poder percibir pequeñas variaciones en la superficie del objeto a representar. El diseño orientado hacia la reducción del tamaño del mecanismo emerge como una decisión estratégica con el potencial de enriquecer la eficacia y la eficiencia de la exploración de matrices de pines.

### Tipo de bloqueo

En el diseño y la ingeniería de mecanismos, la elección entre bloqueo continuo y bloqueo discreto es un factor crucial que influye en el funcionamiento, la eficiencia y la versatilidad de una máquina o dispositivo. Cada enfoque tiene sus propias características, ventajas y desventajas.

El bloqueo continuo se define por su capacidad para bloquear un mecanismo en cualquier punto a lo largo de su recorrido. Esta característica proporciona una flexibilidad excepcional en la operación y el control del sistema. Uno de los aspectos más notables del bloqueo continuo es su adaptabilidad en tiempo real. Permite ajustar la posición de bloqueo según las necesidades cambiantes, lo que es especialmente valioso en aplicaciones donde se requiere un control preciso.

El bloqueo discreto, por otro lado, implica que el mecanismo se bloquea únicamente en posiciones específicas y predefinidas a lo largo de su trayectoria. Esta simplicidad en la operación y el diseño es una de las principales ventajas del bloqueo discreto. Requiere menos componentes y es menos propenso al desgaste debido a la menor frecuencia de bloqueo. No obstante, su simplicidad también puede ser su limitación. El bloqueo discreto carece de la flexibilidad y la adaptabilidad en tiempo real del bloqueo continuo. En situaciones donde se requiere un control preciso y cambios rápidos en la posición del bloqueo, el bloqueo discreto puede ser menos adecuado.

### 4.3.2 Ponderación de atributos

Para evaluar la funcionalidad de cada propuesta de actuador mediante un criterio cuantitativo, se debe ponderar cada atributo con un peso numérico. A continuación, se asigna un porcentaje a cada uno de estos atributos en relación con su impacto en la eficiencia operativa del mecanismo, priorizando aquellos que influyen de manera más significativa en su eficacia operativa.

- **Cantidad de Piezas (10%):** Se evalúa en función de la cantidad de piezas presentes, asignando un puntaje interno máximo de 100% a la menor cantidad y el puntaje mínimo (0%) a la mayor cantidad de piezas, con un peso global del 10%.
- **Complejidad (15%):** Se califica en una escala interna de 0% a 100%, donde un valor más bajo refleja mayor simplicidad, teniendo un porcentaje global del 15

- **Peso (30%):** Se valora considerando peso que el electroimán debe manejar. El puntaje interno máximo (100%) se otorga al elemento más liviano, y el puntaje interno mínimo (0%) al más pesado, con un porcentaje global del 30%.
- **Tamaño (magnitud y diámetro) (25%):** Se evalúa mediante la medición de la altura y el diámetro máximo del mecanismo. El puntaje interno máximo (100%) se otorga al mecanismo más compacto, mientras que el puntaje interno mínimo (0%) se asigna al más grande y con mayor diámetro. Sin embargo, dentro de este aspecto, se da un mayor peso al diámetro (80%) que a la altura (20%), lo que resulta en un porcentaje global del 25% para este criterio.
- **Tipo de Bloqueo (20%):** Se evalúa según el tipo de bloqueo que incorpora el mecanismo, otorgando un puntaje interno de 90% al bloqueo continuo y 70% al bloqueo discreto, con un porcentaje global del 20%.

### 4.3.3 Juicios de valor de los atributos

A continuación, se procede a calcular el valor de cada uno de los atributos anteriormente mencionados de los 4 prototipos propuestos.

#### Cantidad de piezas

El cálculo del puntaje se determina mediante la diferencia de los valores máximos y mínimos del número de piezas entre todas las alternativas presentadas. Para el caso, la calificación de este atributo se hace mediante el siguiente cálculo que establece una escala lineal entre 0 y 10, donde 0 aplica al prototipo de mayor número de piezas ( $N_{max}$ ) y 10 para el prototipo con menor número de piezas ( $N_{min}$ ), siendo  $n$  el número de piezas del prototipo a evaluar.

$$Puntaje = round\left(\frac{N_{max} - n}{N_{max} - N_{min}} \times 10\right)$$

La operación  $round(x)$  es la operación redondeo al menor entero más próximo a  $x$ .

La Tabla 4.1 muestra el resultado del juicio por cantidad de piezas obtenido por cada prototipo.

Prototipo	Número de piezas	Puntaje	Porcentaje interno	Porcentaje global (10%)
A	9	0	0%	0%
B	7	5	50%	5%
C	6	8	80%	7%
D	5	10	100%	10%

Tabla 4.1: Porcentaje global cantidad de piezas.

#### Complejidad

El cálculo de la complejidad en la fabricación no está vinculado al número de piezas, ya que este factor no incide directamente en la complejidad del proceso. En cambio, se



asigna un puntaje basado en la percepción subjetiva de los autores, quienes evalúan la complejidad de fabricación en función de su experiencia y conocimiento. Esta evaluación considera diversos aspectos que pueden aumentar la complejidad, como la necesidad de una alta precisión en los componentes o la complejidad en las interacciones entre las partes del mecanismo.

La Tabla 4.2 muestra el puntaje asignado a cada prototipo propuesto.

Prototipo	Número de piezas	Puntaje	Porcentaje interno	Porcentaje global (10%)
A	8	2	20%	2%
B	5	5	50%	5%
C	4	6	60%	6%
D	3	7	70%	7%

**Tabla 4.2:** Porcentaje global complejidad.

### Peso

El cálculo del peso de la pieza se basa en dos consideraciones principales: el material utilizado en su fabricación y, en caso de que la pieza haya sido adquirida, los datos técnicos proporcionados por el fabricante. Esta información es esencial para determinar con precisión el peso de la pieza y su influencia en el funcionamiento del mecanismo.

Para las piezas impresas se calcula su peso en el software SolidWorks ajustando el tipo de material a resina, la cual es el material en el que se fabrican las piezas; para calcular el peso que necesita el sistema de los prototipos C y D para bloquearse se hace el siguiente experimento.

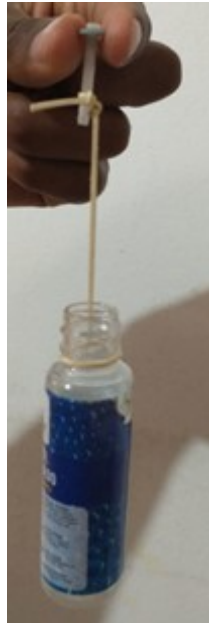
Para determinar una aproximación de la fuerza de atracción requerida por el electroimán y, en última instancia, la masa necesaria para que el sistema se bloquee, se lleva a cabo el siguiente procedimiento. Este proceso implica la utilización de un recipiente de plástico adjunto en la parte inferior del sistema. Dentro de este recipiente se agrega cuidadosamente una cantidad específica de agua hasta que se alcance el punto en el cual el sistema se bloquea. La masa del agua contenida en el recipiente en ese momento se considera la masa necesaria para lograr el bloqueo del sistema como se muestra a continuación.

Después de haber llenado el recipiente con agua hasta que el sistema se bloqueó, se procede a colocar el recipiente en una balanza o pesa. A continuación, se muestra el resultado obtenido en términos de la masa medida.

Para calcular la fuerza (en newtons) ejercida por una masa de 25 gramos debido a la aceleración de la gravedad de  $9.8 \text{ m/s}^2$ , puedes usar la fórmula de la fuerza:  $F = m * g$ , donde  $F$  es la fuerza en [N],  $m$  es la masa en [kg],  $g$  es la aceleración de la gravedad en [ $\text{m/s}^2$ ]. El resultado obtenido para una masa de bloqueo de 25 gramos es  $F = 0.245 \text{ N}$ . Esta es la fuerza necesaria para que el electroimán pueda bloquear el mecanismo.

Se debe considerar que algunas piezas, como el imán, el sistema y el balón, no fueron incluidas en el cálculo, ya que no representan carga para el electroimán.

El cálculo del puntaje para cada prototipo se determina escalando entre 0 y 10 el peso de cada prototipo asignando puntaje 0 al peso máximo ( $P_{max}$ ) y 10 al peso mínimo



**Figura 4.35:** Masa de agua. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 4.36:** Medición masa de agua. Fuente: Elaboración Propia.

( $P_{min}$ ) los cuales son 24.73 y 2.07 gramos respectivamente.

La ecuación de este escalado se define abajo, donde  $P$  es el peso en gramos de bloque de cada prototipo.

$$Puntaje = round\left(\frac{P_{max} - P}{P_{max} - P_{min}} \times 10\right)$$

Donde el operador  $round(x)$  denota el redondeo hacia el entero mas próximo a  $x$ .

A continuación, se presentan la siguiente tabla de equivalencias donde presentan la suma del peso de las piezas que son atraídas y repelidas por el electroimán, junto con su correspondiente porcentaje global.

<b>Prototipo A</b>		
<b>Pieza</b>	<b>Material</b>	<b>Peso(gramos)</b>
Separador superior	Resina	0,57 g
Imán	Neodimio	1,1 g
Sistema	Resina	0,56 g
Balín	Hierro	0,2 g
Peso total		<b>2.43 g</b>
Puntaje		10
Porcentaje interno		100%
Porcentaje global (30%)		<b>30%</b>

**Tabla 4.3:** Piezas atraídas y repelidas prototipo A.

<b>Prototipo B</b>		
<b>Pieza</b>	<b>Material</b>	<b>Peso(gramos)</b>
Imán	Neodimio	1,1 g
Sistema	Resina	0,87 g
Balin	Hierro	0,1 g
Peso total		<b>2,07 g</b>
Puntaje		10
Porcentaje interno		100%
Porcentaje global (30%)		<b>30%</b>

**Tabla 4.4:** Piezas atraídas y repelidas prototipo B.

<b>Prototipo C</b>		
<b>Pieza</b>	<b>Material</b>	<b>Peso(gramos)</b>
Peso de bloqueo	—	25 g
Imán	Neodimio	1,1 g
Sistema	Resina	0,42 g
Peso total		<b>23,48 g</b>
Puntaje		1
Porcentaje interno		10%
Porcentaje global (30%)		<b>3%</b>

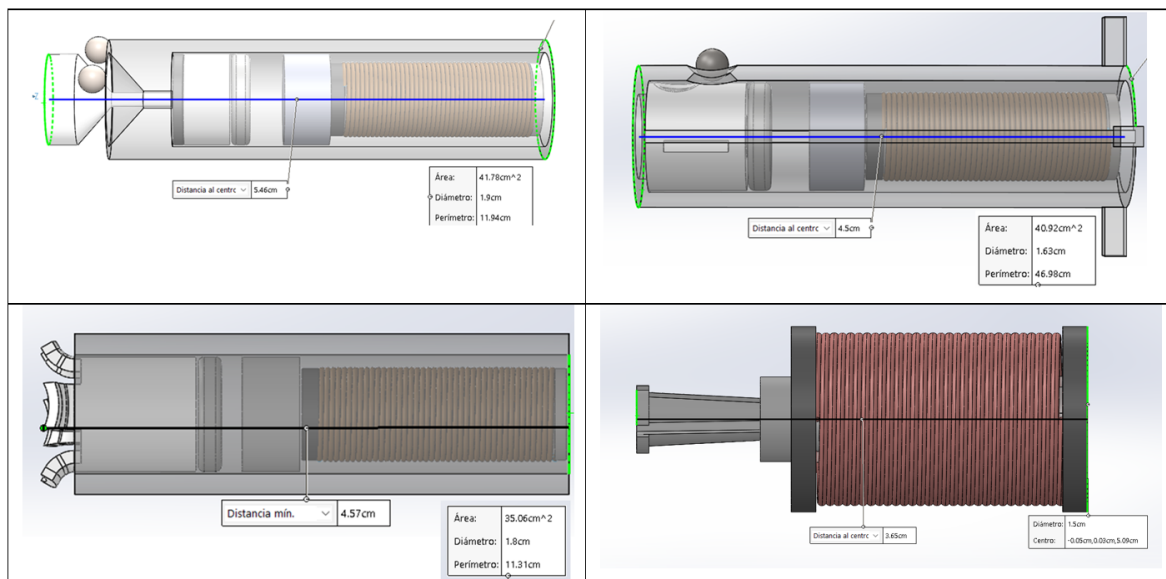
**Tabla 4.5:** Piezas atraídas y repelidas prototipo C.

Prototipo D		
Pieza	Material	Peso(gramos)
Peso de bloqueo	—	25 g
Elemento metalico	Hierro	0,14 g
Sistema	Resina	0,13 g
Peso total		24,73 g
Puntaje		0
Porcentaje interno		0%
Porcentaje global (30%)		0%

**Tabla 4.6:** Piezas atraídas y repelidas prototipo D.

### Tamaño

De acuerdo con el modelo 3D diseñado en SolidWorks, se procede a calcular las dimensiones y longitudes de los diferentes mecanismos de accionamiento de pines. Es importante señalar que, al calcular la magnitud, no se incluye el pin externo en los prototipos A, B y C. Esto se debe a que el tamaño de este pin depende de la cantidad de niveles de relieve requeridos. Sin embargo, al calcular el grosor, se considera la totalidad del mecanismo. En la tabla 4.37 se detallan las medidas proporcionadas por SolidWorks.



**Figura 4.37:** Dimensiones prototipos propuestos. Fuente: Elaboración Propia.

La magnitud se escala para obtener un puntaje lineal en la escala de 0 a 10, asignando 0 a la magnitud máxima ( $M_{max}$ ) y 10 a la magnitud mínima ( $M_{min}$ ) cuyos valores son 5.46 cm y 3.65 cm, respectivamente. Siendo  $m$  la magnitud del dispositivo a evaluar:

$$Puntaje = round\left(\frac{M_{max} - m}{N_{max} - N_{min}} \times 10\right)$$

La operación  $round(x)$  es la operación redondeo al menor entero más próximo a  $x$ .

El diámetro se escala para obtener un puntaje lineal en la escala de 0 a 10, asignando 0 al diámetro máxima ( $D_{max}$ ) y 10 al diámetro mínimo ( $D_{min}$ ) cuyos valores son 1.9 cm y 1.5 cm, respectivamente. Siendo  $d$  el diámetro del dispositivo a evaluar:

$$Puntaje = round\left(\frac{D_{max} - d}{D_{max} - D_{min}} \times 10\right)$$

La operación  $round(x)$  es la operación redondeo al menor entero más próximo a  $x$ .

Las Tablas 4.7 a 4.10 muestran el porcentaje global para el atributo tamaño según la magnitud y diámetro del dispositivo.

Prototipo A			
	Magnitud(cm)	Diámetro(cm)	
Medida	5,46	1,9	
Puntaje	0	0	
Porcentaje interno	0%	0%	
		<b>Total</b>	
Porcentaje total	20%	80%	100%
Total	0%	0%	0%
Porcentaje global	El 0% del 25%		0%

Tabla 4.7: Porcentaje global prototipo A

Prototipo B			
	Magnitud(cm)	Diametro(cm)	
Medida	4,5	1,63	
Puntaje	5	7	
Porcentaje interno	50%	70%	
		<b>Total</b>	
Porcentaje total	20%	80%	100%
Total	10%	56%	66%
Porcentaje global	El 66% del 25%		16,5%

Tabla 4.8: Porcentaje global prototipo B

Prototipo C		
	Magnitud(cm)	Diámetro(cm)
Medida	4,57	1,8
Puntaje	5	2
Porcentaje interno	50%	20%
		<b>Total</b>
Porcentaje total	20%	80%
<b>Total</b>	10%	16%
Porcentaje global	El 26% del 25%	
		<b>6,5%</b>

Tabla 4.9: Porcentaje global prototipo C

Prototipo D		
	Magnitud(cm)	Diametro(cm)
Medida	3,65	1,5
Puntaje	10	10
Porcentaje interno	10%	10%
		<b>Total</b>
Porcentaje total	20%	80%
<b>Total</b>	20%	80%
Porcentaje global	El 100% del 25%	
		<b>25%</b>

Tabla 4.10: Porcentaje global prototipo D

### Tipo de bloqueo

El cálculo del puntaje según el tipo de bloqueo se realiza considerando si se trata de un bloqueo continuo o discreto. Se asigna una puntuación de 9 al bloqueo continuo y 7 al bloqueo discreto, ya que ambos tipos tienen ventajas y desventajas. El bloqueo continuo se considera mejor, aunque no es perfecto. A continuación, se muestra la tabla del porcentaje global

Prototipo	Tipo de bloqueo	Puntaje	Porcentaje interno	Porcentaje global (20%)
A	Discreto	7	70%	14%
B	Discreto	7	70%	14%
C	Continuo	9	90%	18%
D	Continuo	9	90%	18%

Tabla 4.11: Porcentaje global tipo de frenado

### 4.3.4 Juicio global

Para llegar a una conclusión sobre la viabilidad de fabricar los distintos mecanismos, considerando los cinco atributos y basándonos en las tablas anteriores que asignan un puntaje global a cada uno de estos atributos, se presenta la Tabla 4.12. En ella se muestran todos estos porcentajes globales y su suma, lo que proporciona un porcentaje total. Este porcentaje total será un indicador de la idoneidad relativa de cada mecanismo en función de los criterios establecidos.

Prototipo	Cantidad de piezas	Complejidad	Magnitud y diámetro	Peso	Tipo de bloqueo	Total
A	0%	2%	0%	30%	14%	46%
B	5%	5%	16.5%	30%	14%	71%
C	8%	6%	6.5%	3%	18%	41%
D	10%	7%	25%	0%	18%	60%

**Tabla 4.12:** Viabilidad prototipos propuestos

En resumen, los prototipos B y D son los más prometedores según los criterios establecidos, por lo tanto, serán construidos y evaluados para observar su rendimiento.

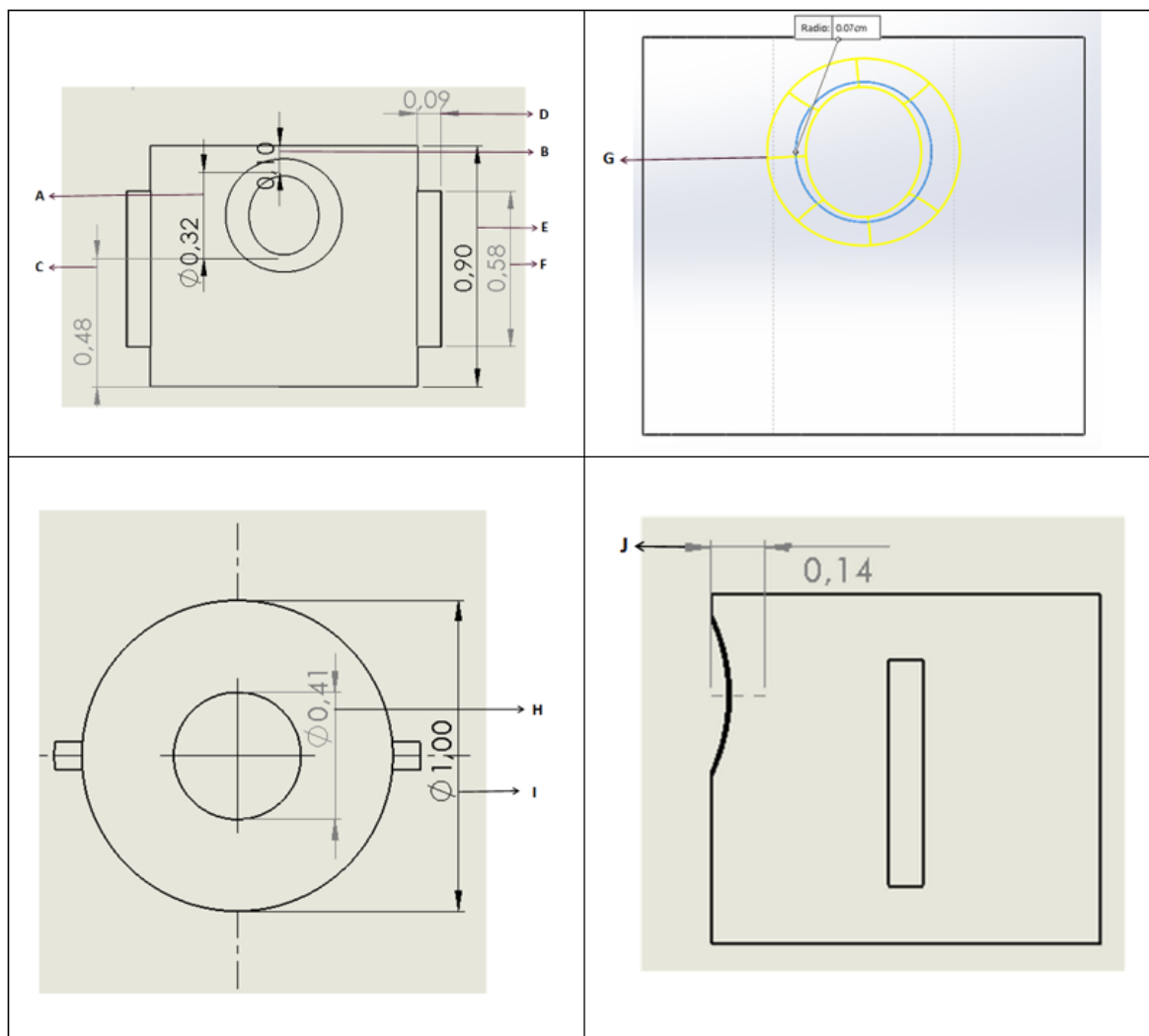
## 4.4 Fabricación del prototipo B

El prototipo B, consta de un total de siete componentes cruciales. La fabricación de cada uno de estos componentes fue llevada a cabo meticulosamente, teniendo en cuenta diversos parámetros que aseguraron la calidad y funcionalidad del prototipo en su conjunto. En esta sección, se presenta un análisis exhaustivo de los procesos de fabricación de cada componente.

### Sistema

La figura 4.38 presenta las medidas del sistema diseñado, donde:

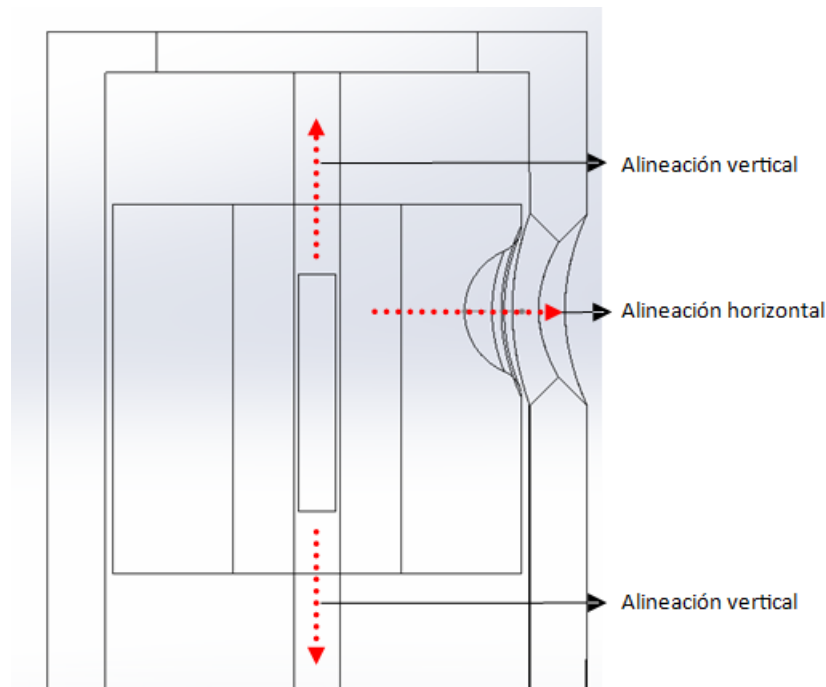
- A: La medida de 0.32 cm es la equivalencia del tamaño del balón, que tiene unas dimensiones de 0.3 cm con un margen de tolerancia de 0.2 cm para que la pieza encaje correctamente.
- B: La medida de 0.1 cm se utiliza para permitir espacio suficiente al aplicar el redondeo en G.
- C: La medida de 0.48 cm se elige para garantizar que el sistema, al ser accionado por el electroimán, se eleve lo suficiente para que el balón sea expulsado y no vuelva hacia el sistema. Esto se logra con la suma de las cotas A y B, que totalizan 0.32 cm. Sin embargo, se agregan 0.06 cm adicionales, que representan el punto preciso para que el imán no atraiga al balón en el estado de desbloqueo, pero sí lo atraiga en el estado de bloqueo, aunque con una fuerza no superior a la fuerza de atracción del electroimán.
- D: La medida de 0.09 cm del grosor se ajusta al espacio que deja el pin interno con el fin que el sistema quede alineado con el pin interno como se muestra en la figura 4.39



**Figura 4.38:** Dimensiones sistema prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.

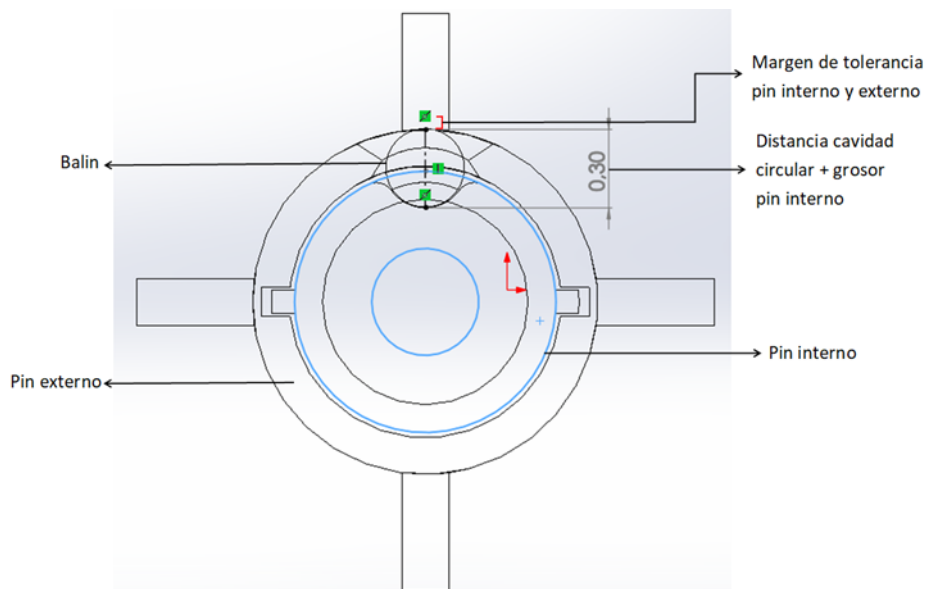
- E: La medida de 0.9 cm corresponde a la altura del sistema.
- F: La medida de 0.58 cm representa la dimensión mínima necesaria para que la saliente vertical cumpla su función de alineamiento, permitiendo un ajuste preciso del sistema en el interior del pin. Esto asegura una alineación adecuada entre la abertura circular del pin interno y el hundimiento circular del sistema, lo que a su vez garantiza un funcionamiento óptimo del mecanismo como se observa en la figura 4.39.
- G: La medida de redondeo de 0.07 cm representa la máxima tolerancia permitida para el redondeo, que es esencial para asegurar una expulsión suave y sin obstrucciones del balón por parte del sistema.
- H: La medida de perímetro de 0.41 cm representa el valor máximo posible para que no afecte el funcionamiento del sistema. Esta medida de la abertura se implementa con el propósito de reducir el peso total del sistema.
- I: La medida del perímetro de 1 cm está determinada por el perímetro del imán.





**Figura 4.39:** Alineación sistema prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.

- J: La medida de la cavidad circular es de 0.14 cm. Esta dimensión se seleccionó debido a que, al sumarla con la cavidad circular del pin interno, obtenemos el espacio necesario para que el balón encaje correctamente, como se ilustra en la figura 4.40.



**Figura 4.40:** Medida cavidad circular sistema prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.

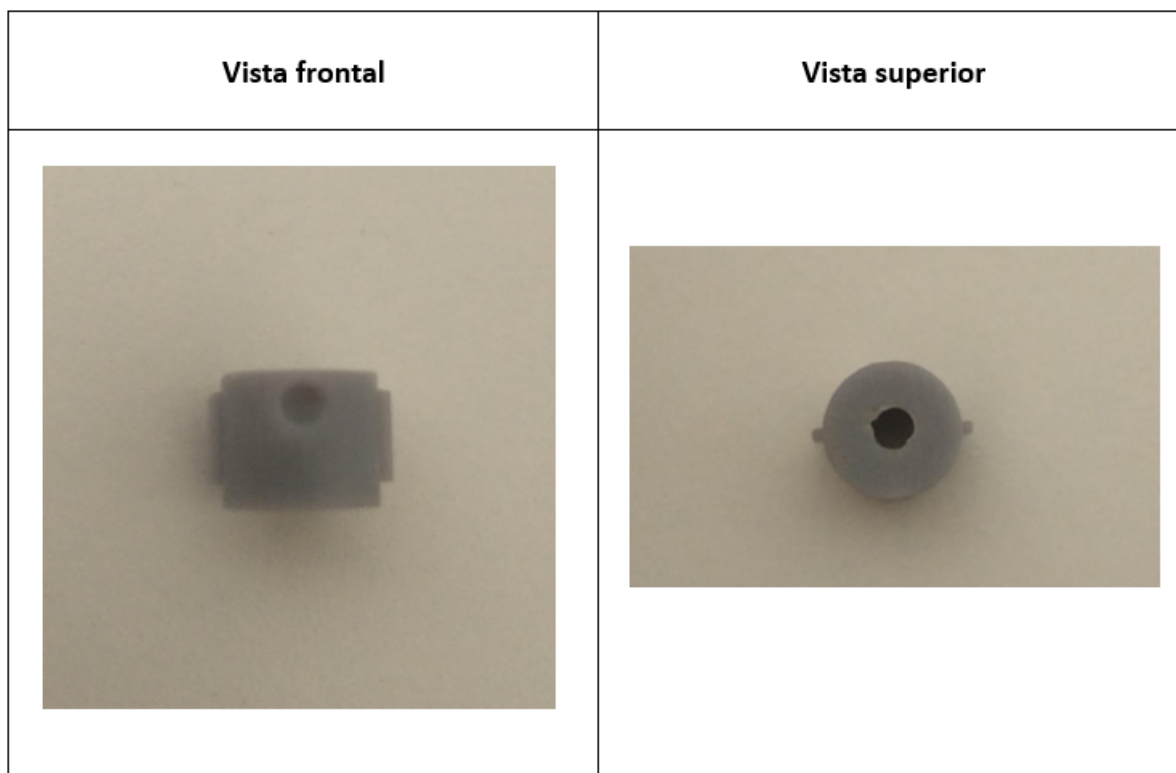
En consecuencia, esta medida se puede expresar mediante la siguiente fórmula, en la cual estas dimensiones en primera instancia dependen de la medida del balón.

$$\text{Cavidad circular} + \text{grosor pin interno} + \text{espacio de tolerancia} = \text{tamaño del balón}$$

$$0.14cm + 0.14cm + 0.02cm = 0.3cm \quad (4.1)$$

Si a este resultado le sumamos el Margen de tolerancia pin interno y el externo se obtienen 0.03 cm más que es la medida exacta 0.33cm para que alcance el balón.

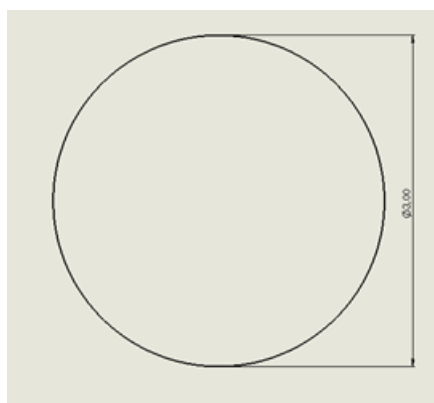
Para fabricar el pin interno, se crea un modelo de la pieza en el software SolidWorks y se imprime con las dimensiones previamente descritas. El resultado de este proceso se muestra en la figura 4.41:



**Figura 4.41:** Sistema impreso prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.

### Balón

La figura 4.42 presenta las medidas del balón usado:



**Figura 4.42:** Dimensiones Balón prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.

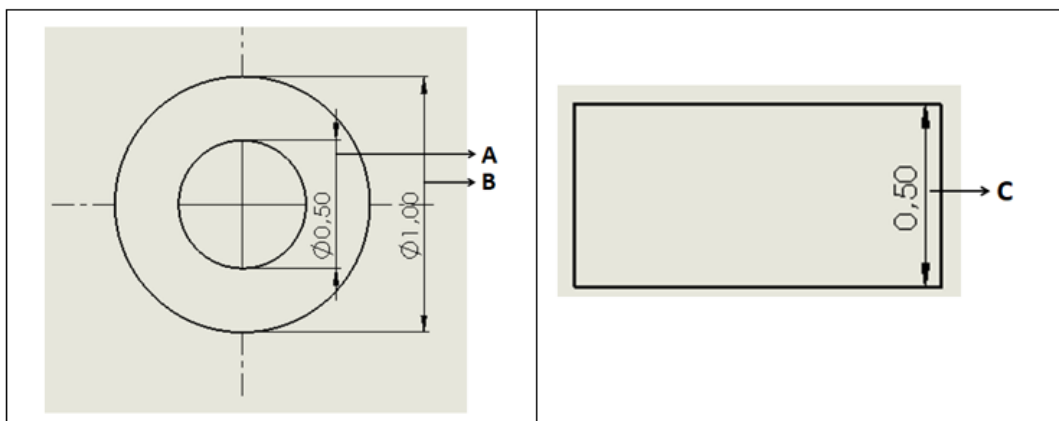
La medida del diámetro es de 0.3 cm, y es la medida mínima que podemos garantizar para un correcto funcionamiento. Una medida más pequeña podría causar dificultades al adaptar otras piezas a las impresiones, ya que la impresora utilizada no tiene una alta resolución. Esta pieza en particular se compro con una dimensión de 0.3 cm:



**Figura 4.43:** Balín prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.

### Separador

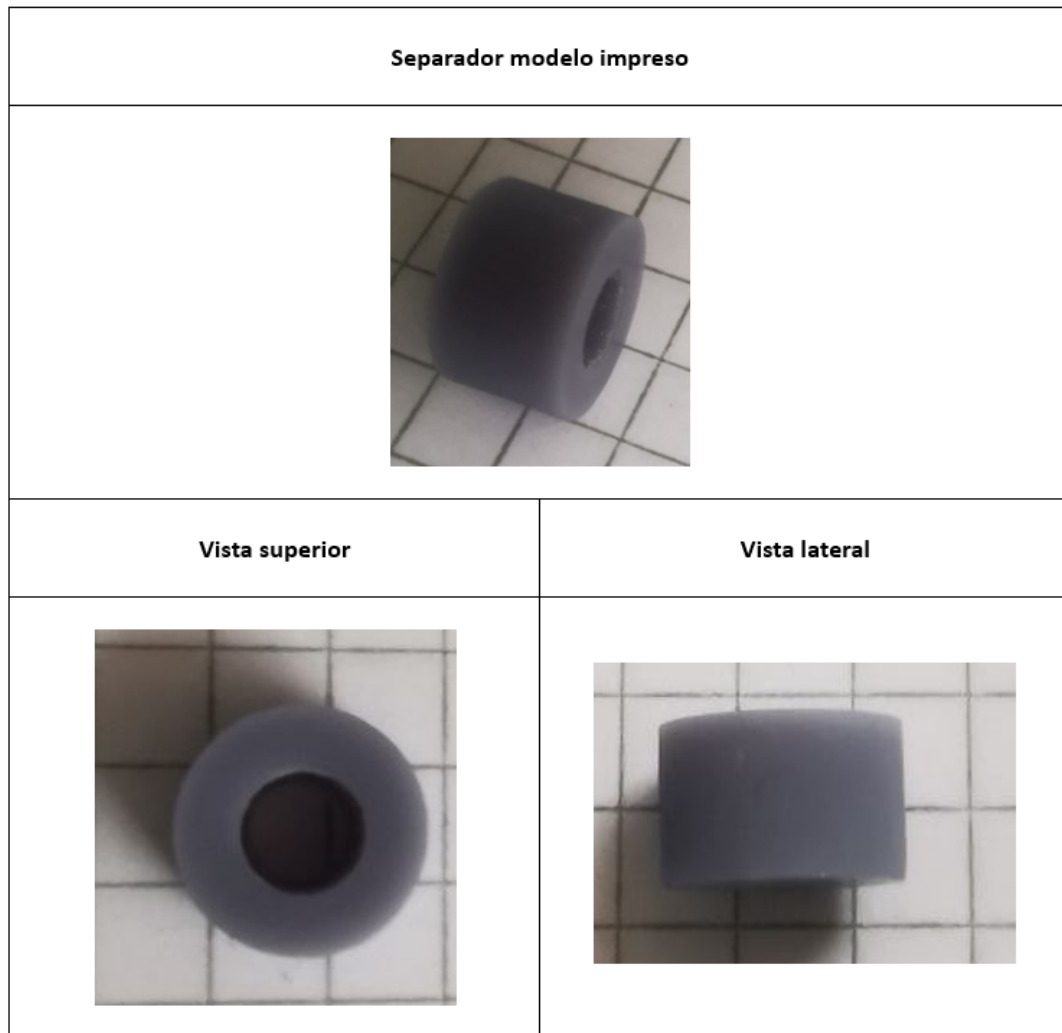
La figura 4.44 presenta las medidas del separador diseñado, donde:



**Figura 4.44:** Dimensiones Separador prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.

- A: La medida del perímetro de 0.5 cm corresponde a una abertura en el separador, ubicada en su mitad, con el propósito de reducir su peso y ahorrar material.
- B: La medida del perímetro de 1 cm está determinada por las dimensiones del imán.
- C: La medida de 0.5 cm es esencial, ya que representa la distancia mínima necesaria para evitar que el imán se adhiera al electroimán. Si esta distancia fuese mayor, se reduciría la fuerza de atracción que ejerce el electroimán sobre el imán, lo que podría afectar negativamente el funcionamiento del mecanismo.

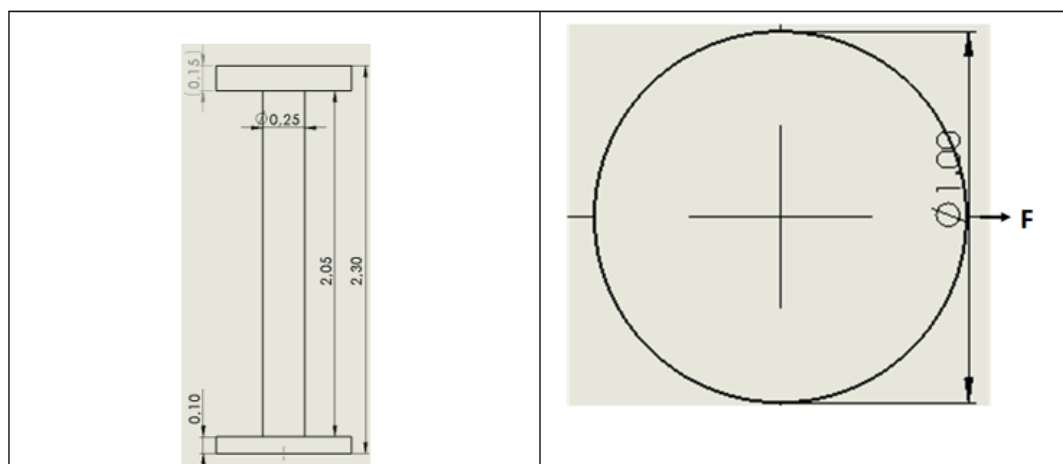
Para fabricar el separador, se crea un modelo de la pieza en el software SolidWorks y se imprime con las dimensiones previamente descritas. El resultado de este proceso se muestra en la figura 4.45:



**Figura 4.45:** Separador impreso prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.

### Electroimán

La figura 4.46 presenta las medidas del electroimán diseñado, donde:



**Figura 4.46:** Dimensiones bobina prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.

- **A:** La medida de 0.25 cm se refiere al perímetro del núcleo del electroimán y se ha seleccionado debido a que coincide con las dimensiones del clavo utilizado en su fabricación.
- **B:** La medida de 2.05 cm se refiere al espacio que ocupará el alambre de cobre en el sistema, siendo esta la medida mínima necesaria para permitir que el alambre tenga el número de vueltas requerido para generar la fuerza necesaria.
- **C:** La medida de 2.3 cm representa la altura mínima del electroimán.
- **D:** La medida de 0.15 cm corresponde al tamaño necesario para contener la cabeza del clavo en el diseño.
- **E:** La medida de 0.1 cm corresponde al tamaño necesario para contener la parte inferior del clavo en el diseño.
- **F:** La medida del perímetro de 1 cm está determinada por las dimensiones del imán.

El proceso de fabricación del electroimán comprende la utilización de piezas impresas y otras que fueron adaptadas y ensambladas. Estos procedimientos se llevaron a cabo a través de una serie de pasos mostrados a continuación:

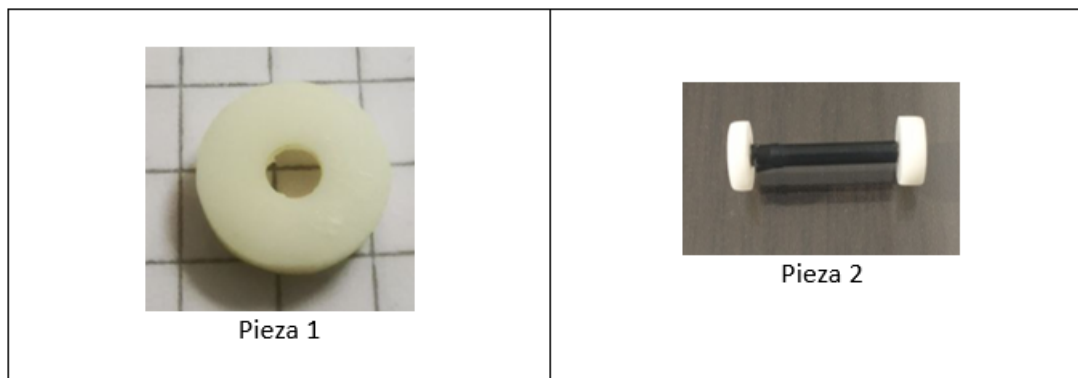
1. El primer paso implica fraccionar un clavo a una altura 2.3 cm, como se muestra en figura 4.47, este elemento representa el núcleo magnético del electroimán.



**Figura 4.47:** Núcleo electroimán prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.

2. El segundo paso implica pegar la pieza 1 de la Figura 4.48 en los dos extremos del clavo y luego envolverlo con cinta aislante, como se observa en la pieza 2 de la figura 4.48.

Para facilitar la elaboración del electroimán, es esencial realizar una serie de preparativos que garantizan un proceso fluido y preciso. Estos preparativos incluyen el uso de los siguientes elementos:



**Figura 4.48:** Construcción Bobina prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.

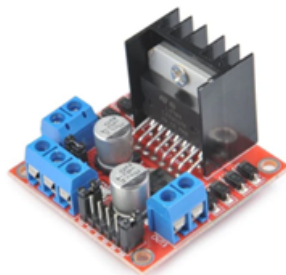
- **Motor:** El motor desempeña un papel fundamental, ya que es responsable de girar la pieza 2 (figura 4.48 que será bobinada. Este motor, asegura un movimiento uniforme y constante durante todo el proceso. Su elección se basa en la capacidad de generar la fuerza y velocidad requeridas.



**Figura 4.49:** Motor con caja reductora.

Tomado: [27].

- **Puente H:** Para ajustar la velocidad de giro del motor de manera precisa y controlada, se utiliza un módulo puente H. Este componente brinda la flexibilidad necesaria para variar la velocidad según las necesidades específicas del embobinado. El control es esencial para lograr una bobina uniforme y bien formada



**Figura 4.50:** Módulo puente H.

Tomado: [28].

- **Sensor de Velocidad:** este dispositivo permite contar las interrupciones generadas por la rueda que acompaña al sensor. Dado que esta rueda tiene 20 interrupciones por vuelta, el sensor se convierte en una herramienta valiosa para medir y registrar con precisión la cantidad de vueltas realizadas durante el embobinado.



**Figura 4.51:** Modulo encoder HC-020K Sensor de Velocidad B83609.  
Tomado: [29].

- **Código en Arduino:** El control preciso del proceso de bobinado se logra mediante un código desarrollado en Arduino. Este código proporciona la capacidad de ajustar la velocidad del motor a través del módulo puente H y, al mismo tiempo, contar las interrupciones detectadas por el sensor de velocidad. Esto no solo simplifica la tarea, sino que también asegura la precisión y repetibilidad del proceso. El código usado se puede consultar en el link disponible en la sección 7.

En conjunto, estos elementos permiten crear una bobina de manera eficiente y con resultados consistentes. La sincronización entre el motor, el control de velocidad, el sensor y el código en Arduino es esencial para obtener bobinas de alta calidad en términos de uniformidad y precisión. Este montaje se presenta en la figura 4.52.

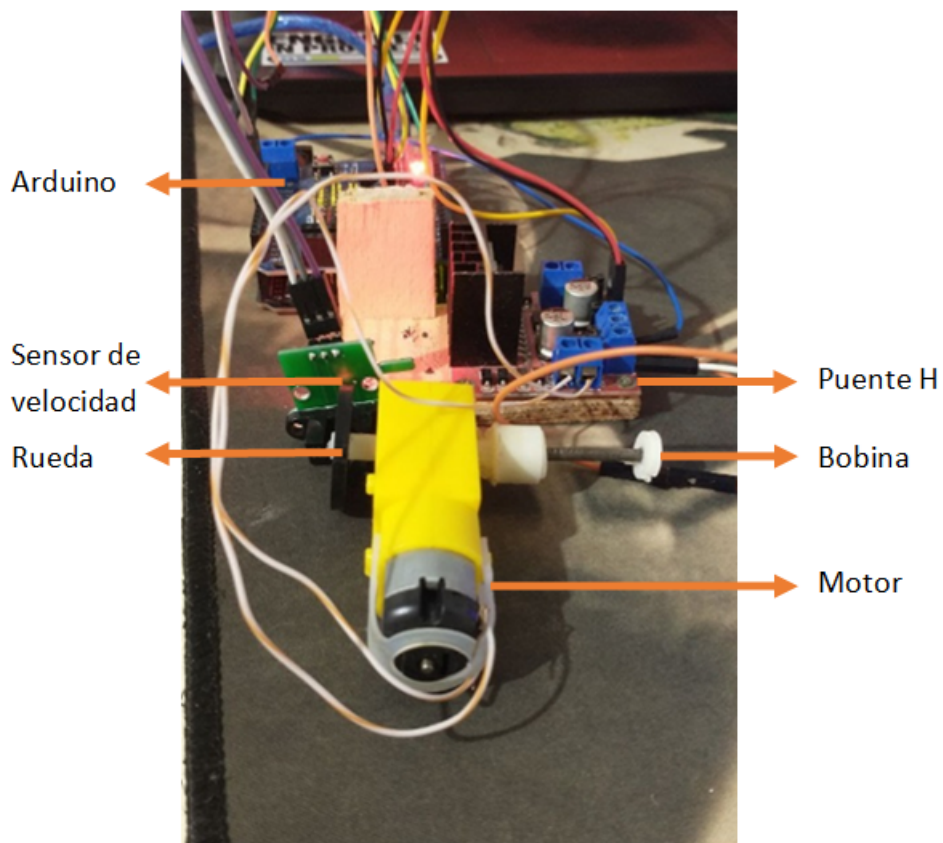
3. Una vez se tiene el montaje anterior se procede a realizar el embobinado con un alambre de cobre de calibre 30.
4. Cuando se termina de enrollar el alambre de cobre se procede a colocar alrededor de la bobina cinta aislante con el fin de mantener la integridad del electroimán.
5. El número de interrupciones es igual a 50.055, como la rueda tenía 20 interrupciones por vuelta se divide este número entre 20 y nos dará el número de vueltas:

$$\frac{50.055}{20} = 2.502.75 \approx 2.503vueltas \quad (4.2)$$

### Pin interno

La figura 4.55 presenta las medidas del pin interno diseñado, donde:

- **A:** La medida de 0.07 cm representa el máximo redondeo posible, diseñado para facilitar la transición del balón al bloquearse o desbloquearse el mecanismo.



**Figura 4.52:** Montaje para la construcción de electroimanes. Fuente: Elaboración Propia.

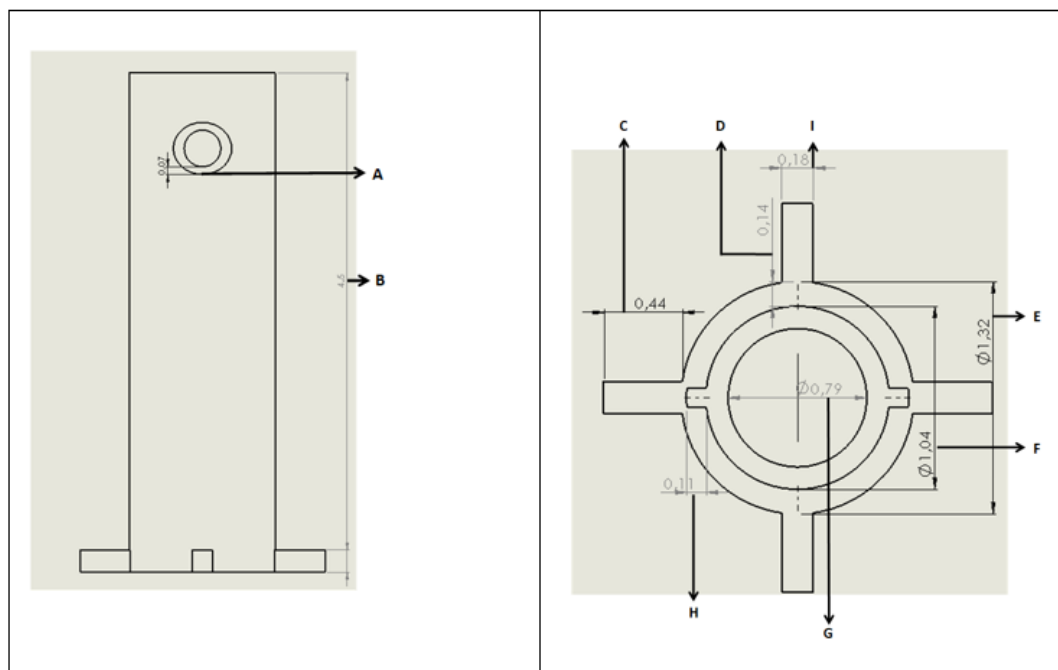


**Figura 4.53:** Resultado embobinado electroimán. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 4.54:** Electroimán construido prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.





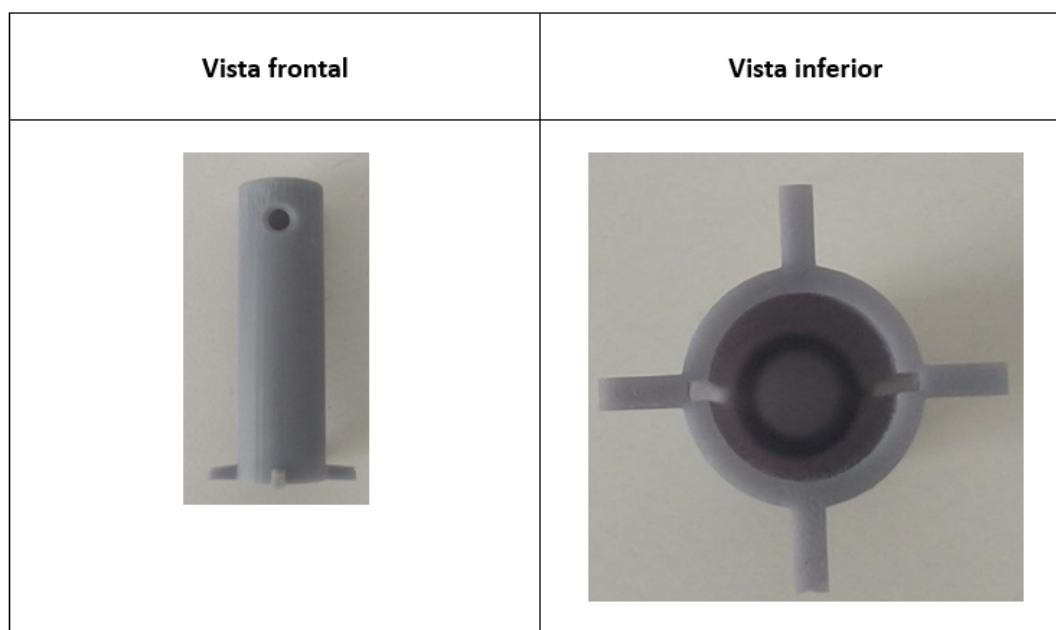
**Figura 4.55:** Dimensiones Pin Interno prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.

- **B:** La medida de 4.5 cm se asigna debido a que representa la suma de todos los componentes ubicados dentro del pin interior. Estos componentes incluyen el sistema, el imán, el electroimán y el espacio necesario para permitir la movilidad fluida del sistema.
- **C:** La medida de 0.44 cm, correspondiente a la saliente que se adhiere a la plataforma y se convierte en un elemento fijo, presenta esta forma específica porque encaja dentro del pin externo y se compone de cuatro salientes para garantizar una mayor estabilidad.
- **D:** La medida del grosor del pin interno es de 0.14 cm. Esta dimensión se seleccionó debido a que, al sumarla con la cavidad circular del sistema, obtenemos el espacio necesario para que el balón encaje correctamente, como se ilustra en la figura 4.40 y la fórmula 4.1.
- **E:** La medida de 1.32 cm corresponde al perímetro del pin interno, el cual se establece en este tamaño para garantizar el adecuado funcionamiento y encaje de los demás componentes.
- **F:** La medida de 1.04 cm corresponde al perímetro interno, que es esencial para que el sistema y todos los componentes que van en su interior encajen adecuadamente. Esta medida se divide en 1 cm correspondiente al espacio necesario y 0.04 cm para la tolerancia entre las piezas.
- **G:** La medida del perímetro del hueco en la parte superior del pin es de 0.79 cm, esta medida se ha seleccionado para permitir una mejor observación del funcionamiento del pin y facilitar la corrección en caso de que ocurra algún error.
- **H:** La medida de 0.11 cm correspondiente al corte rectangular se ajusta al espacio necesario para que las salientes del sistema encajen adecuadamente y queden

alineadas, como se muestra en la figura 4.39.

- **I:** La medida de 0.18 cm representa el grosor de las patas del pin interno. Estas medidas se han seleccionado para garantizar que las patas no ocupen demasiado espacio y, al mismo tiempo, sean lo suficientemente resistentes para soportar el peso que se ejercerá sobre ellas.

Para fabricar el pin interno, se crea un modelo de la pieza en el software SolidWorks y se imprime con las dimensiones previamente descritas. El resultado de este proceso se muestra en la figura 4.56:

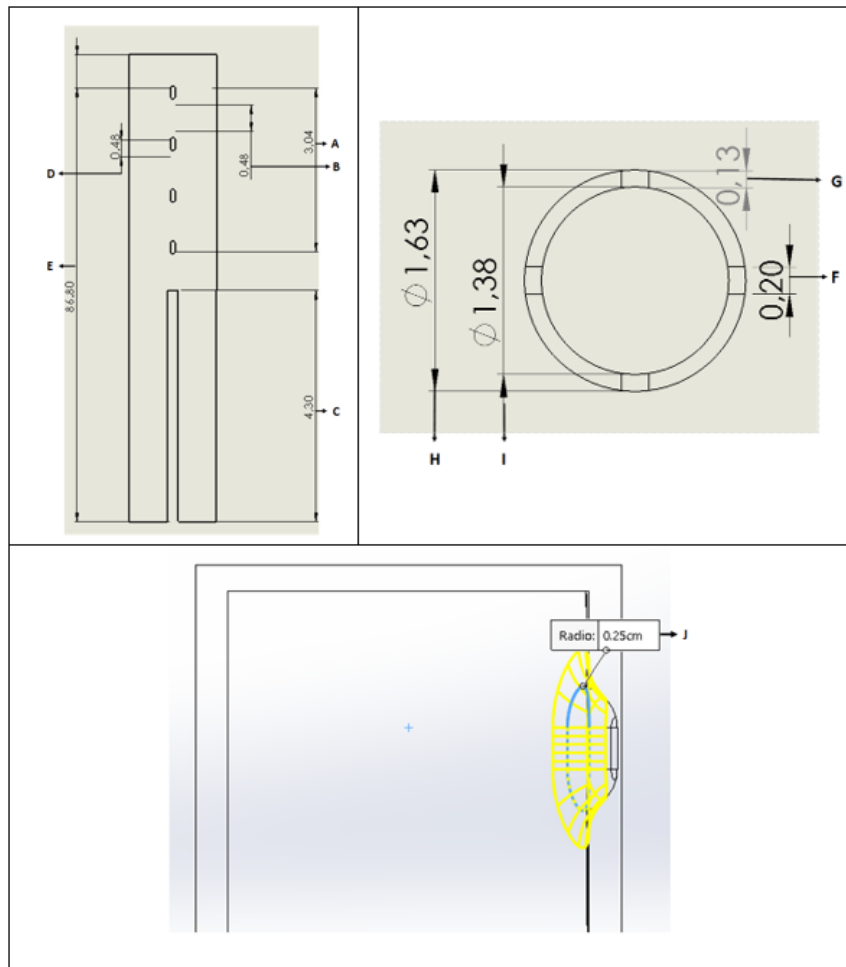


**Figura 4.56:** Pin Interno impreso prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.

### Pin externo

Presenta las siguientes medidas:

- **A:** La medida de 3.04 cm representa la zona de bloqueo del mecanismo, la cual se divide en 4 niveles.
- **B:** La medida de 0.48 cm representa el espacio entre los niveles de bloqueo, y existe la posibilidad de reducir este espacio para mejorar la resolución del mecanismo.
- **C:** La medida de 4.30 cm indica el espacio vertical en el que el pin externo puede desplazarse para ser bloqueado. Este espacio es suficiente para permitir que el pin interno alcance las 4 posiciones de bloqueo.
- **D:** La medida de 0.48 cm corresponde al diámetro de la cavidad circular en el pin externo. Esta medida se calcula en base al 0.3 del tamaño del balón y un margen de tolerancia de 0.18 para prevenir tanto errores de nivelación como errores de bloqueo.

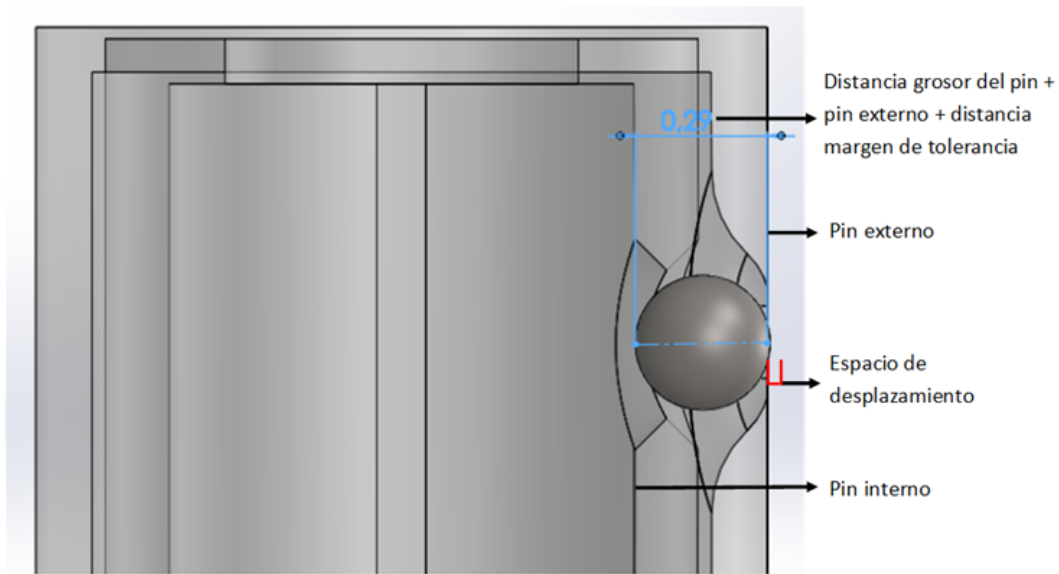


**Figura 4.57:** Dimensiones Pin externo prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.

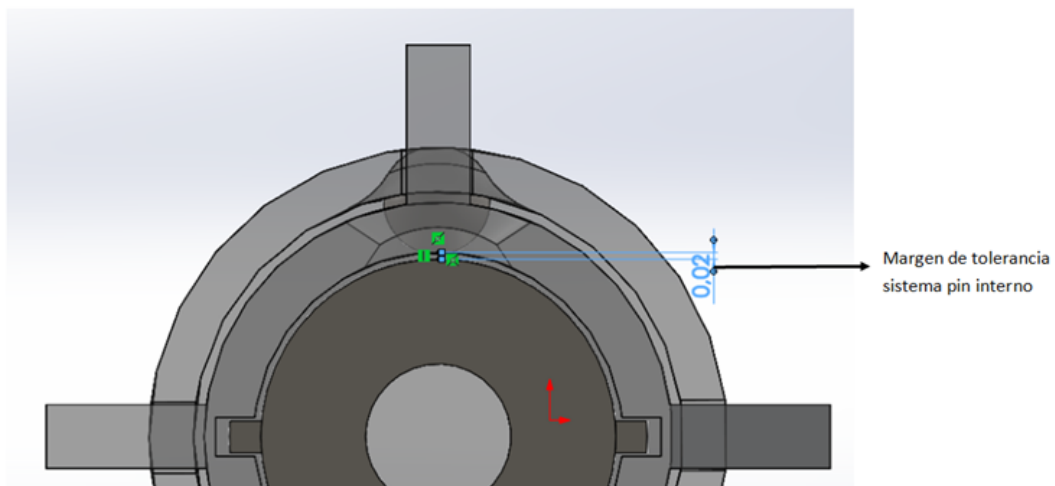
- **E:** La medida de 86.80 cm corresponde a la altura total del pin externo, que a su vez es la altura total del mecanismo de bloqueo. Esta medida resulta de la suma de todas las piezas y componentes necesarios para que el mecanismo funcione de manera adecuada.
- **F:** La medida de la abertura de 0.2 cm es esencial para permitir que las patas del pin interno alcancen dentro de ella, con un margen de tolerancia de 0.02 cm para garantizar un ajuste preciso.
- **G:** La medida del grosor del pin externo es de 0.13 cm. Esta dimensión cuenta con 0.01 cm por el cual se puede desplazar después del grosor del pin externo esto se hace con el fin que el balón puede ser observado para la calibración de la altura del bloqueo. Esta dimensión de 0.14 es debido a que, al sumar el grosor del pin interno, el espacio de tolerancia entre las piezas el grosor del pin externo, obtenemos el espacio necesario para que el balón encaje correctamente, como se muestra en las figura 4.58 y 4.59.

En consecuencia, esta medida se puede expresar mediante la siguiente fórmula, en la cual estas dimensiones en primera instancia dependen de la medida del balón.

Pin externo + espacio de desplazamiento + grosor pin interno + espacio de



**Figura 4.58:** Medidas para el desplazamiento Pin externo prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 4.59:** Margen de error pin externo prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.

tolerancia = tamaño del balón

$$0.13cm + 0.01cm + 0.14cm + 0.03cm = 0.31cm \quad (4.3)$$

Si a este resultado le sumamos el Margen de tolerancia del sistema y pin interno se obtienen 0.02 cm que es la medida necesaria para que alcance el balón de 0.33cm

- **H:** La medida total del grosor del mecanismo es de 1.63 cm, la cual se obtiene al sumar las dimensiones de todas las piezas que lo componen.
- **I:** La medida de 1.38 cm de diámetro corresponde al tamaño del pin interno, que en este caso equivale a su grosor, y al espacio de margen de tolerancia necesario para que encaje correctamente.

- **J:** El radio de 0.25 cm se selecciona con el objetivo de mejorar la eficiencia en la transición del pin y evitar que el mecanismo requiera un esfuerzo excesivo.

Para fabricar el pin externo, se crea un modelo de la pieza en el software SolidWorks y se imprime con las dimensiones previamente descritas. El resultado de este proceso es el siguiente:



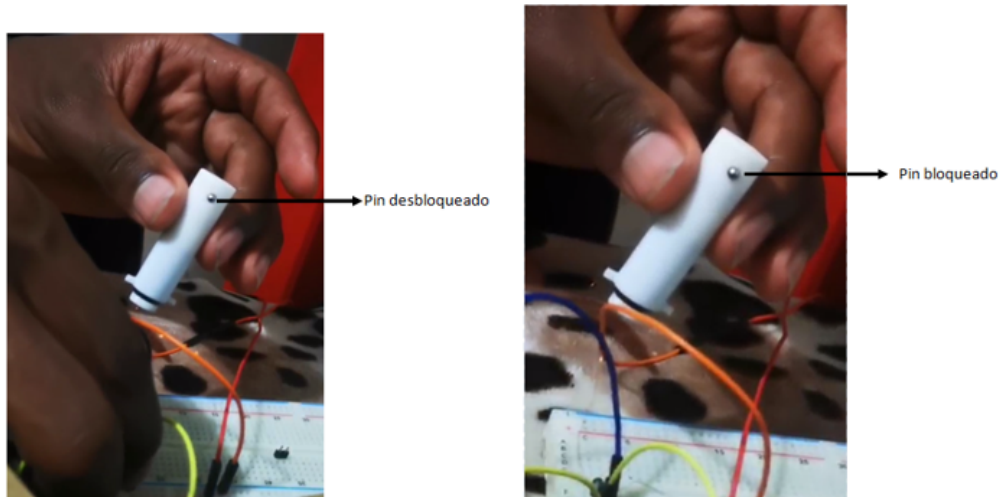
**Figura 4.60:** Pin externo impreso prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.

Por último, se procede a ensamblar todas las piezas y se llevan a cabo pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de su bloqueo y desbloqueo, tal como se ilustra en la siguiente figura 4.61.

En resumen, el mecanismo B funciona de manera deseada. Esto se debe a que la fuerza generada por el electroimán, utilizando un alambre de cobre de calibre 30 con 2503 vueltas, supera los 0.0203 Newtons necesarios para que el prototipo funcione correctamente.

## 4.5 Fabricación del prototipo D

Esta sección se enfoca en el desarrollo del prototipo D, el cual se identificó como una de las opciones más viables para la implementación. La elección de este prototipo se basó en su reducido número de piezas, que consta de tan solo 5 piezas, así como en su sencillo proceso de ensamblaje, entre otros factores determinantes. A excepción del alambre de cobre esmaltado y el componente metálico, todas las piezas utilizadas fueron fabricadas



**Figura 4.61:** Demostración Bloqueo y Desbloqueo del mecanismo prototipo B. Fuente: Elaboración Propia.

mediante impresión 3D.

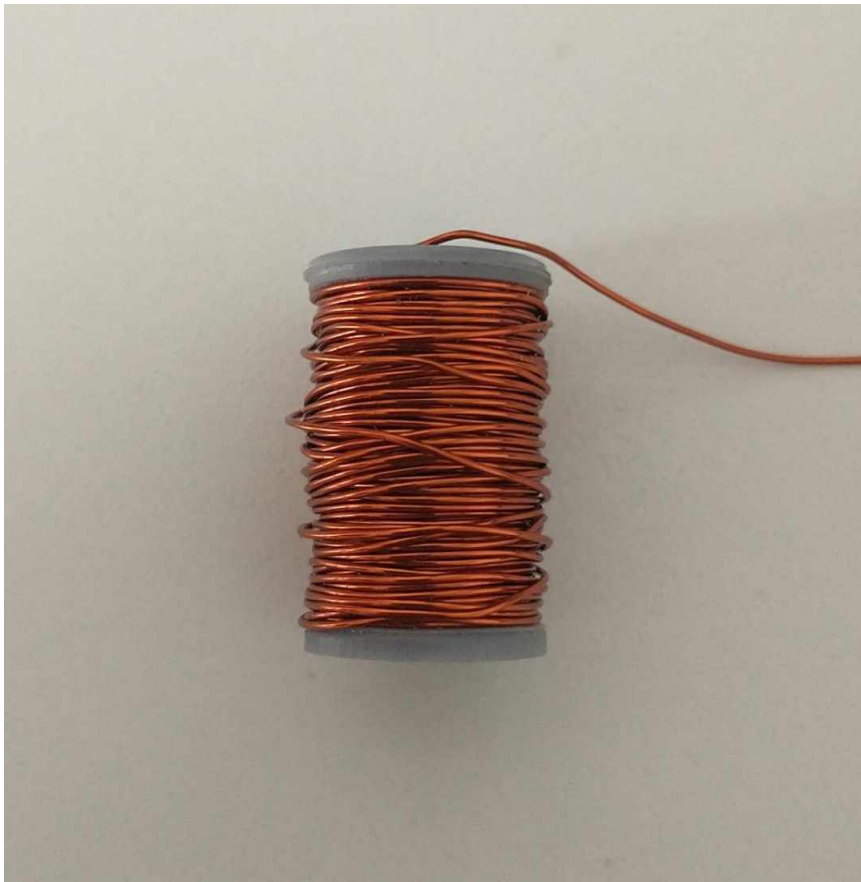
La figura 4.62 la bobina impresa en 3D, diseñada con la finalidad de servir como soporte para enrollar el hilo de cobre esmaltado y así construir el electroimán.



**Figura 4.62:** Bobina impresa en 3D. Fuente: Elaboración Propia.

La figura 4.63 muestra el electroimán construido, el cual tiene un total de 380 vueltas de hilo de cobre esmaltado de calibre 25. Es importante destacar que esta bobina carece

de un núcleo de material ferroso y que su construcción fue de manera manual.



**Figura 4.63:** Electroimán construido prototipo D. Fuente: Elaboración Propia.

La figura 4.64 muestra el objeto metálico empleado; debido a la dificultad de encontrar un cilindro metálico de 3 mm de diámetro, se optó por utilizar las mitades de un alfiler como sustituto ya que cumple con la misma función.

La figura 4.68 muestra el ensamble del sistema (figura 4.66), la arandela (figura 4.65) y el elemento metálico (figura 4.64) del prototipo D.

El ensamble mostrado en la figura 4.68 debe ir dentro del electroimán (figura 4.63). La figura 4.69 ilustra el ensamble del prototipo D en estado de desbloqueo.

La figura 4.70 muestra el ensamble del prototipo D en estado de bloqueo, este bloqueo se consigue aplicando una corriente eléctrica al electroimán, como se mostró anteriormente en la figura 4.34.

El electroimán (figura 4.63) es alimentado por una corriente eléctrica generando un campo magnético, este campo magnético ejerce una fuerza de atracción sobre el elemento metálico ferromagnético que se encuentra unido al sistema (figura 4.68) lo que resulta en una contracción del sistema y en el frenado del pin interno (figura 4.67), tal como se muestra en la figura 4.71. Al combinar varios de estos mecanismos y controlar las posiciones de frenado de los pines, tenemos la capacidad de generar un despliegue táctil 2.5D.

El prototipo D construido no pudo generar un campo magnético lo suficientemente fuerte como para atraer un elemento ferromagnético con una fuerza de 0.245 N, que era necesaria para bloquear el sistema. Las razones detrás del mal funcionamiento del prototipo D incluyeron:



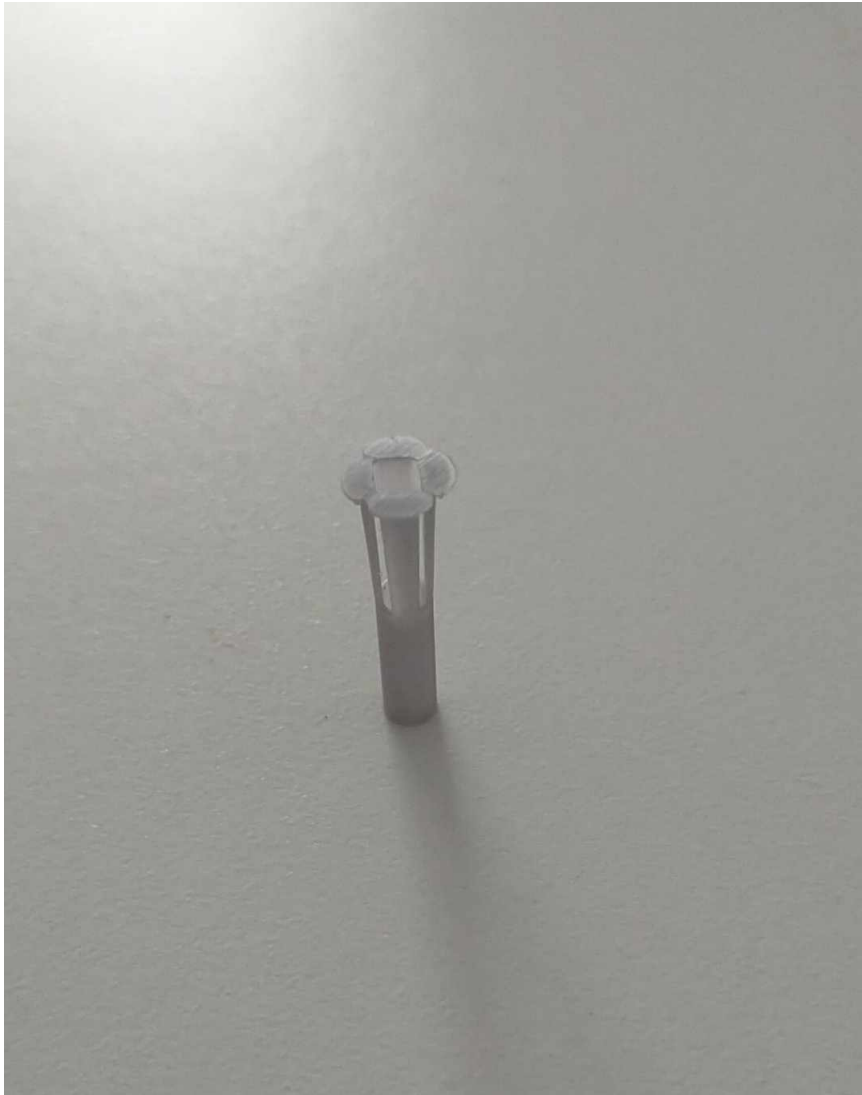
**Figura 4.64:** Elemento metálico prototipo D. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 4.65:** Arandela prototipo D. Fuente: Elaboración Propia.

- **Tamaño y forma del elemento metálico:** este elemento ferromagnético debía cubrir el sistema (figura 4.66), y en lo posible tener una forma alargada y cilíndrica, ya que así es más probable de que se alinee con la dirección del campo magnético y sea atraído hacia el centro del electroimán, debido al tamaño (3mm) no fue posible conseguir un elemento con las características mencionadas.
- **Intensidad del Campo Magnético:** La fuerza del campo magnético del electroimán juega un papel fundamental en la atracción. Cuanto más fuerte sea el campo magnético, mayor será la atracción, esta atracción se puede mejorar: 1) aumentando la corriente eléctrica, 2) agregando mas vueltas de alambre a la bobina, 3) usando un núcleo ferromagnético. Las opciones 1) y 2) aumentan el consumo de energía y el tamaño del actuador respectivamente, estas características no son óptimas para el desarrollo de pantallas gráficas táctiles. En cuanto a la opción 3)





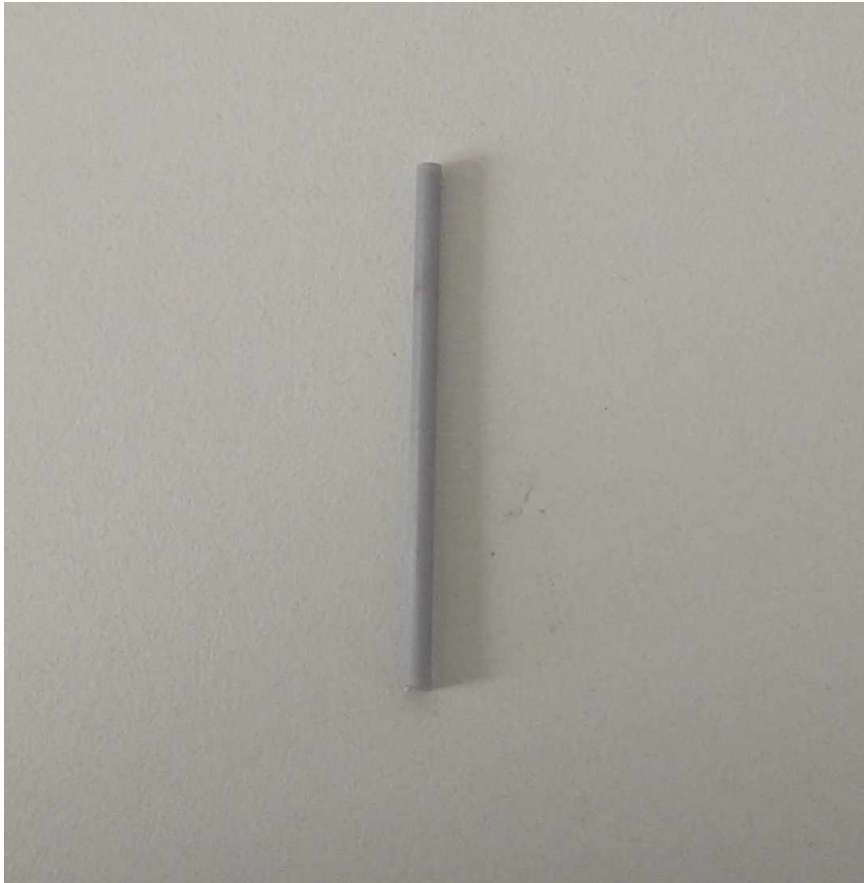
**Figura 4.66:** Sistema prototipo D. Fuente: Elaboración Propia.

tener un núcleo requeriría un elemento ferromagnético con forma de tubo y un diámetro de 4mm, ya que el pin interno se desplaza a través de la bobina.

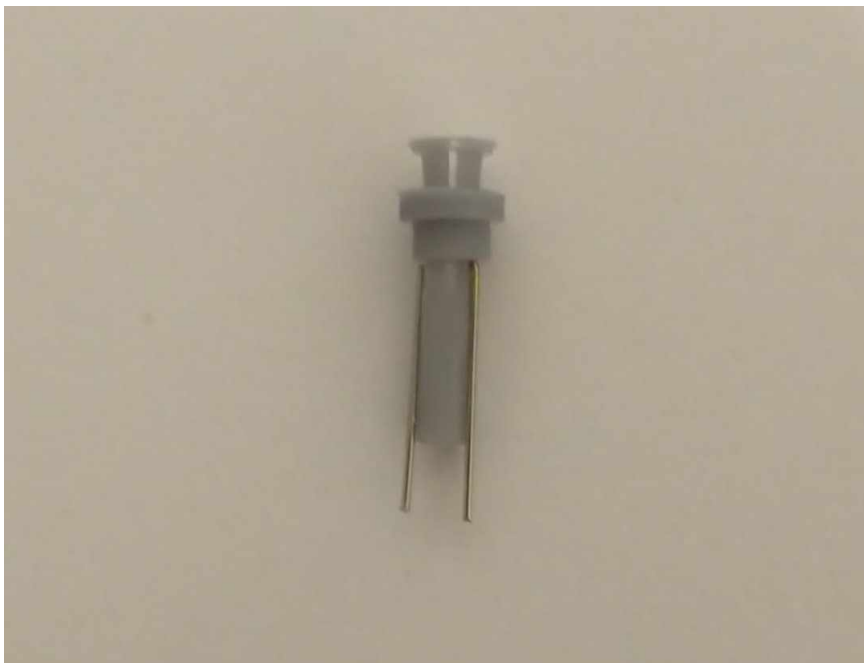
#### 4.5.1 Diseño de la plataforma

La plataforma para la manipulación de pines se ha diseñado conforme a las dimensiones del prototipo B, seleccionado por sus cualidades funcionales. La plataforma se Esta plataforma está compuesta por los siguientes elementos:

- **Actuador lineal:** El actuador lineal desempeña un papel fundamental en el sistema al ser responsable de elevar y descender la bandeja de soporte. Para garantizar su estabilidad y verticalidad, se ha diseñado una base que asegura su correcta posición, como se ilustra en la figura 4.72.
- **Mesa de soporte:** La mesa de soporte ha sido diseñada con el propósito de nivelar la matriz de pines cuadrada de 3x3 y proporcionar un espacio adecuado para el desplazamiento del actuador. La presencia de una abertura central en la

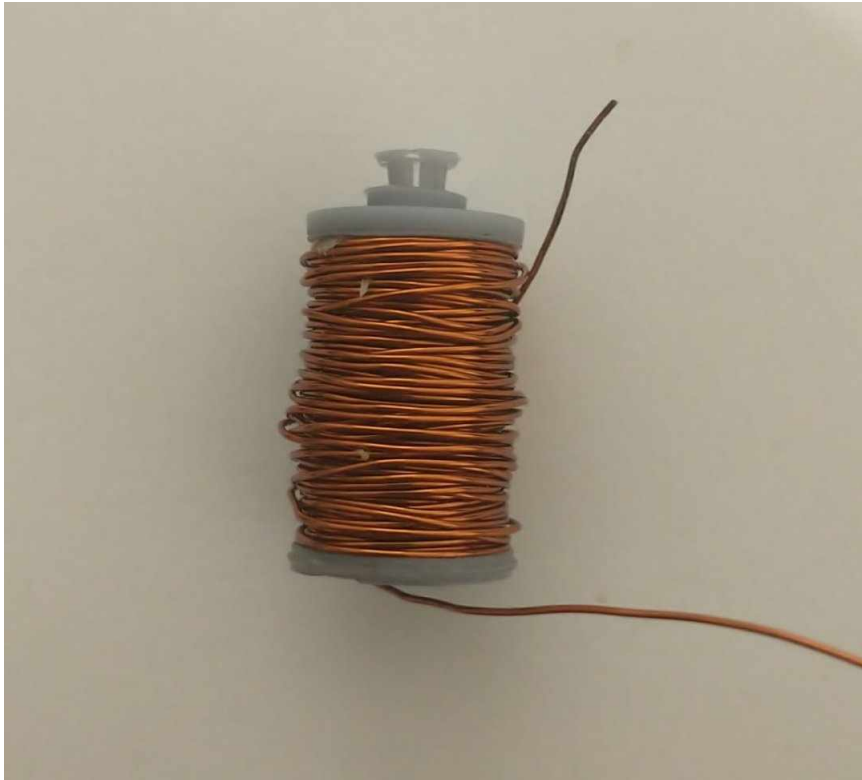


**Figura 4.67:** Pin interno prototipo D. Fuente: Elaboración Propia.

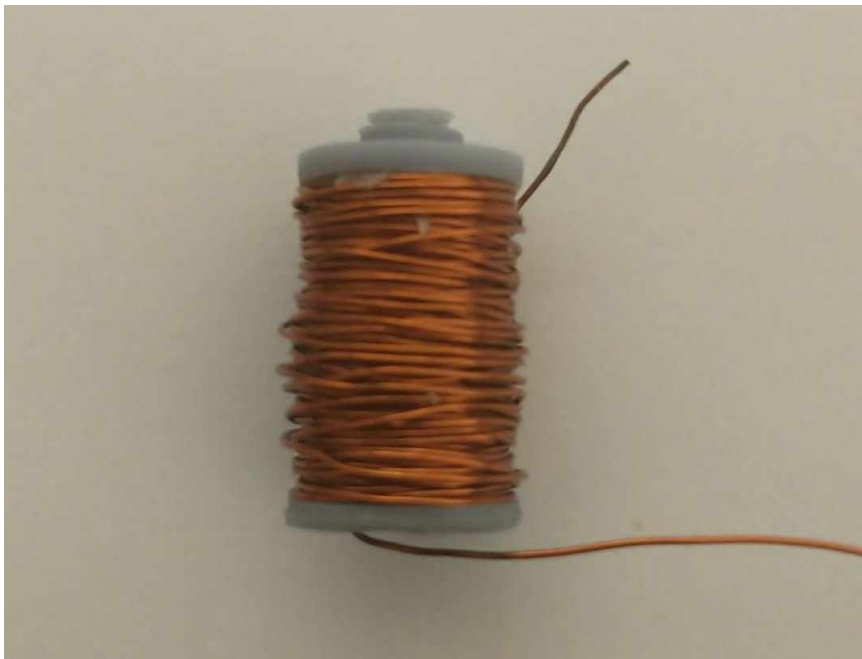


**Figura 4.68:** Ensamble inicial prototipo D. Fuente: Elaboración Propia.

mesa facilita la interacción del actuador con la bandeja de soporte, permitiendo así el control de los pines. La figura 4.73 muestra el diseño de la mesa de soporte.



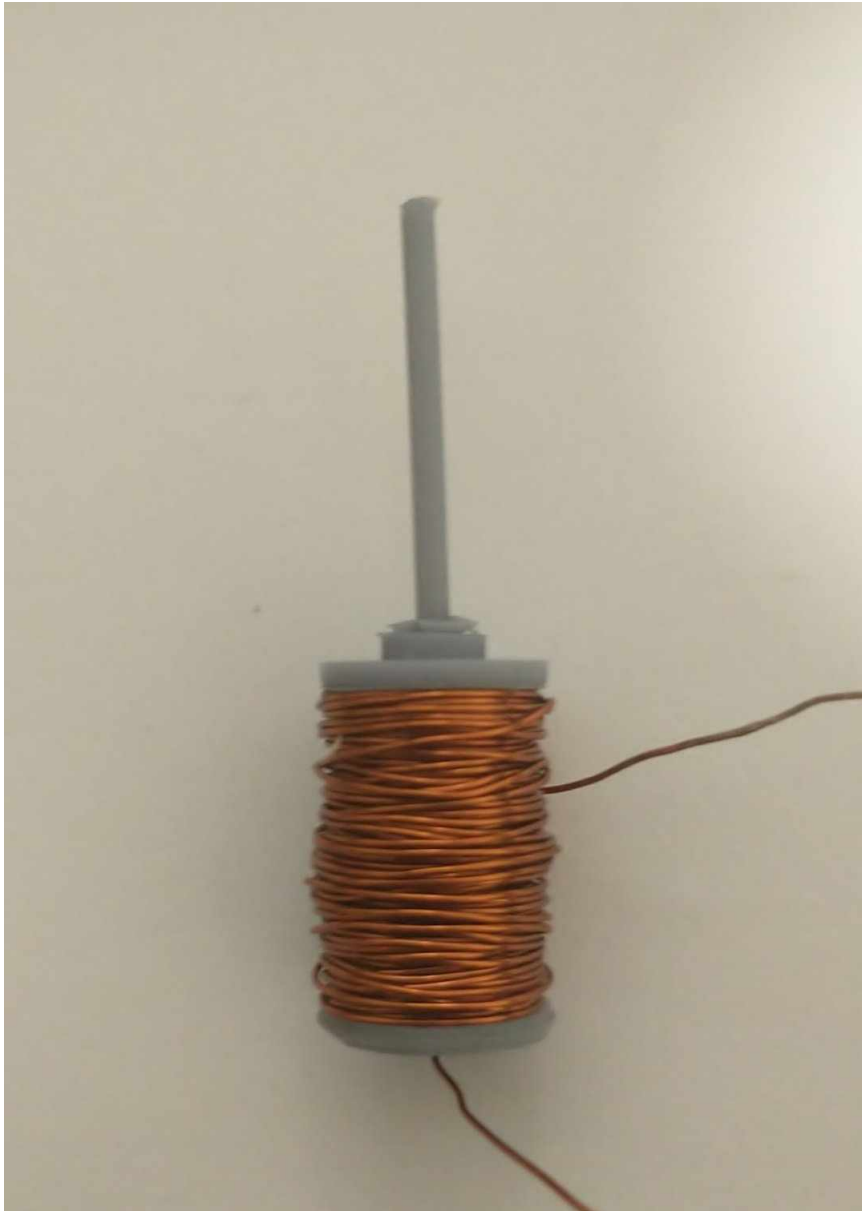
**Figura 4.69:** Ensamble prototipo D desbloqueado. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 4.70:** Ensamble prototipo D bloqueado. Fuente: Elaboración Propia.

- **Bandeja de soporte:** La bandeja de soporte actúa como la superficie base sobre la cual los pines se elevan y descienden. Presenta un saliente estratégicamente diseñado para permitir que el actuador lineal sostenga la bandeja de manera segura, como se observa en la figura 4.74.

A continuación, se procede a ensamblar el modelo

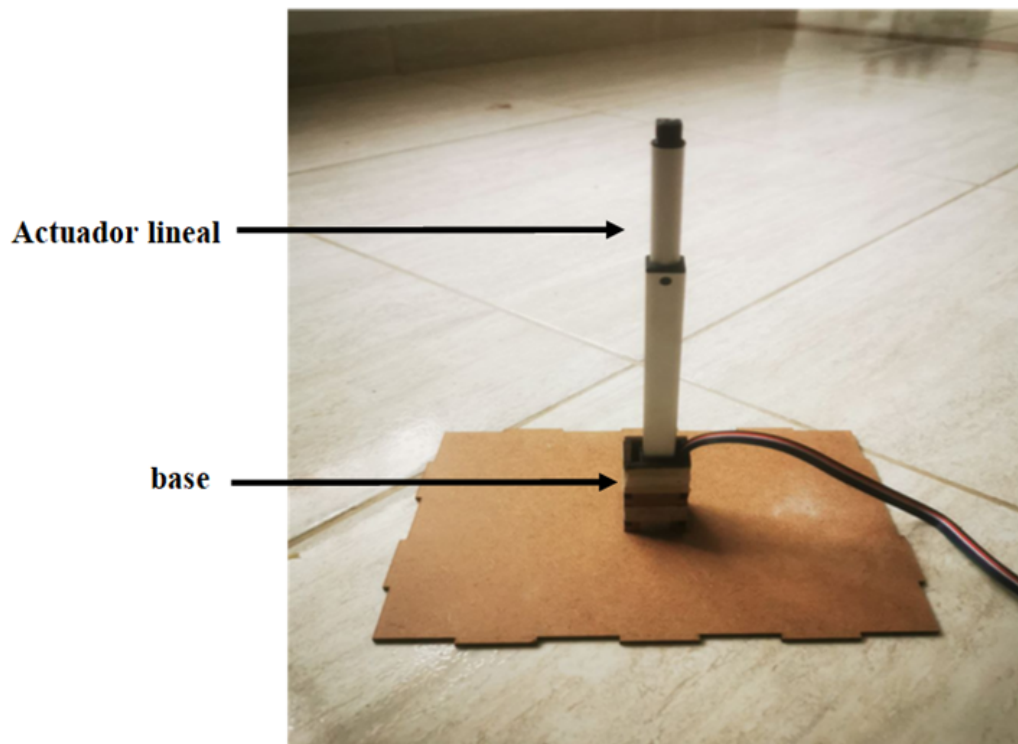


**Figura 4.71:** Prototipo D bloqueado. Fuente: Elaboración Propia.

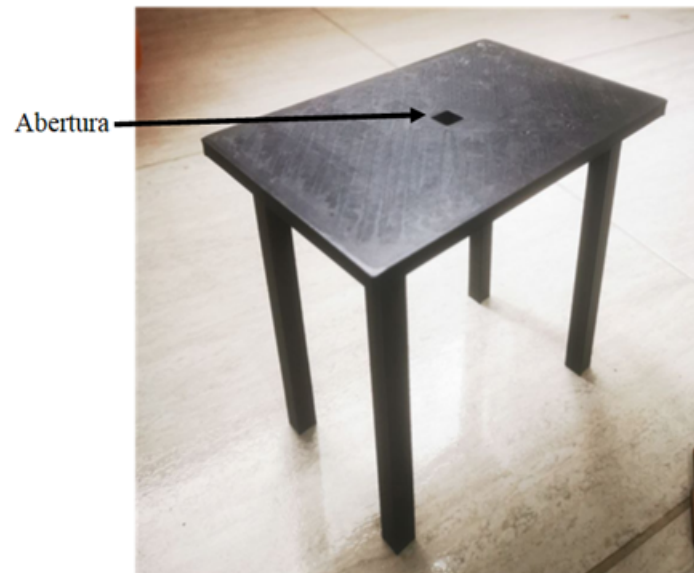
### Matriz de Pines

La figura 4.76 presenta las medidas de la base diseñada encargada de sujetar los pines internos del mecanismo (Arriba: vista superior, abajo: vista lateral); donde:

- **A:** Se elige la medida de 0.19 cm para asegurar un ajuste adecuado de las patas del pin interno, dado que este tiene un tamaño de 0.18 cm, evitando así la necesidad de deslizamiento.
- **B:** La medida de 7.22 cm es necesaria para garantizar que la matriz tenga suficiente espacio para acomodar los 9 pines.
- **C:** Con un tamaño de 1.8 cm, se permite que el pin externo pueda moverse hacia arriba y abajo, ya que su tamaño es de 1.32 cm, proporcionando un margen de



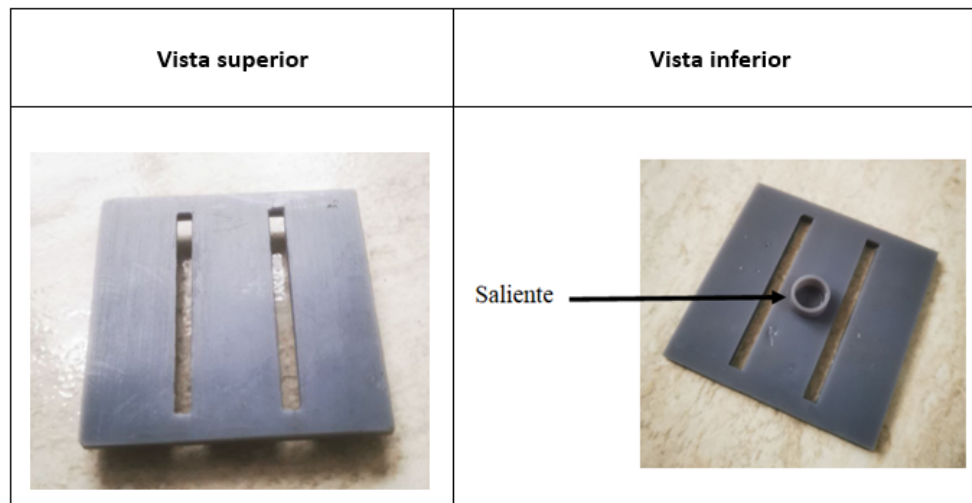
**Figura 4.72:** Actuador lineal. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 4.73:** Mesa de soporte. Fuente: Elaboración Propia.

tolerancia de 0.48 cm. Este margen es el más amplio en todo el mecanismo debido a las aberturas del pin externo, que tienden a separarse.

- **D:** La medida de 7.22 cm es esencial para que la matriz disponga del espacio suficiente para acomodar los 9 pines.

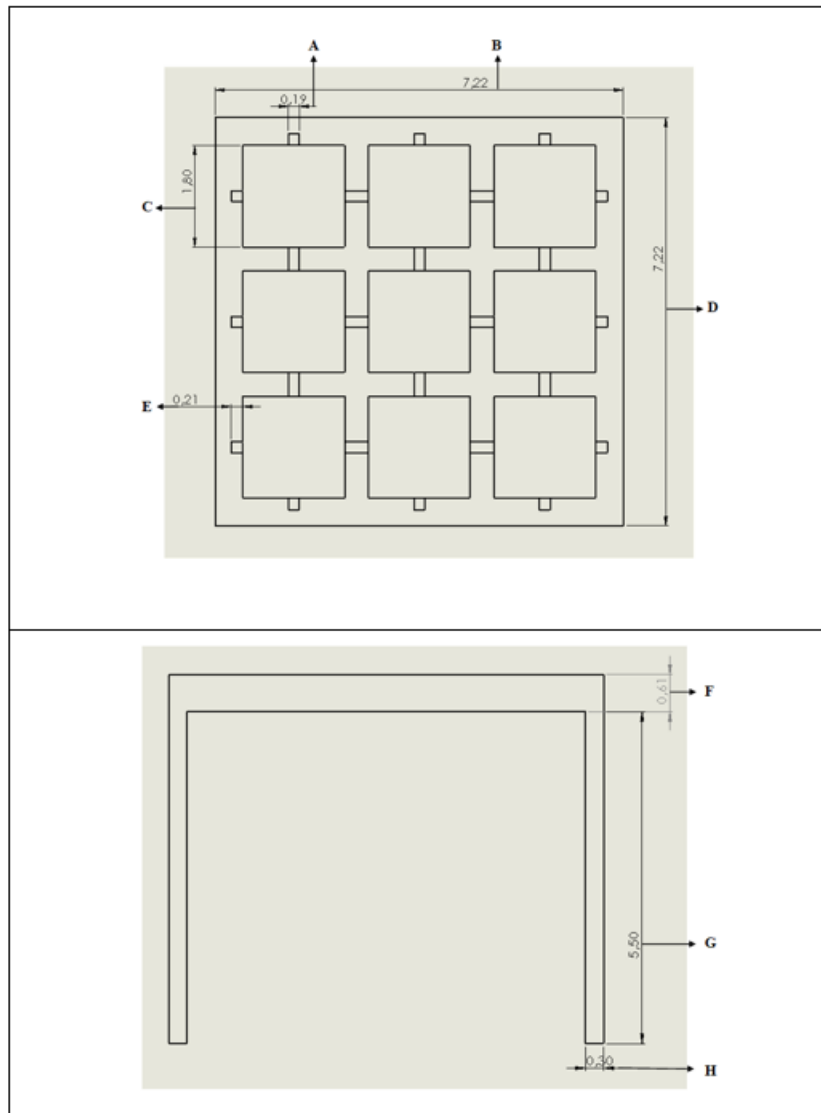


**Figura 4.74:** Bandeja de soporte. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 4.75:** Plataforma ensamblada. Fuente: Elaboración Propia.

- **E:** La medida de 0.21 cm se elige para garantizar un encaje correcto de las patas del pin interno en la base de la matriz.
- **F:** El grosor de la base de la matriz es de 0.61 cm para soportar las patas del pin interno, que funcionan como soportes de todo el pin.
- **G:** La medida de 5.5 cm es la medida de suficiente para que el dispositivo pueda bloquearse en las 4 posiciones.
- **H:** La medida de 0.3 cm es el grosor del patas el cual es suficiente para aguantar el peso de los pines como también el peso cuando este es manipulado.



**Figura 4.76:** Dimensiones base para los pines. Fuente: Elaboración Propia.

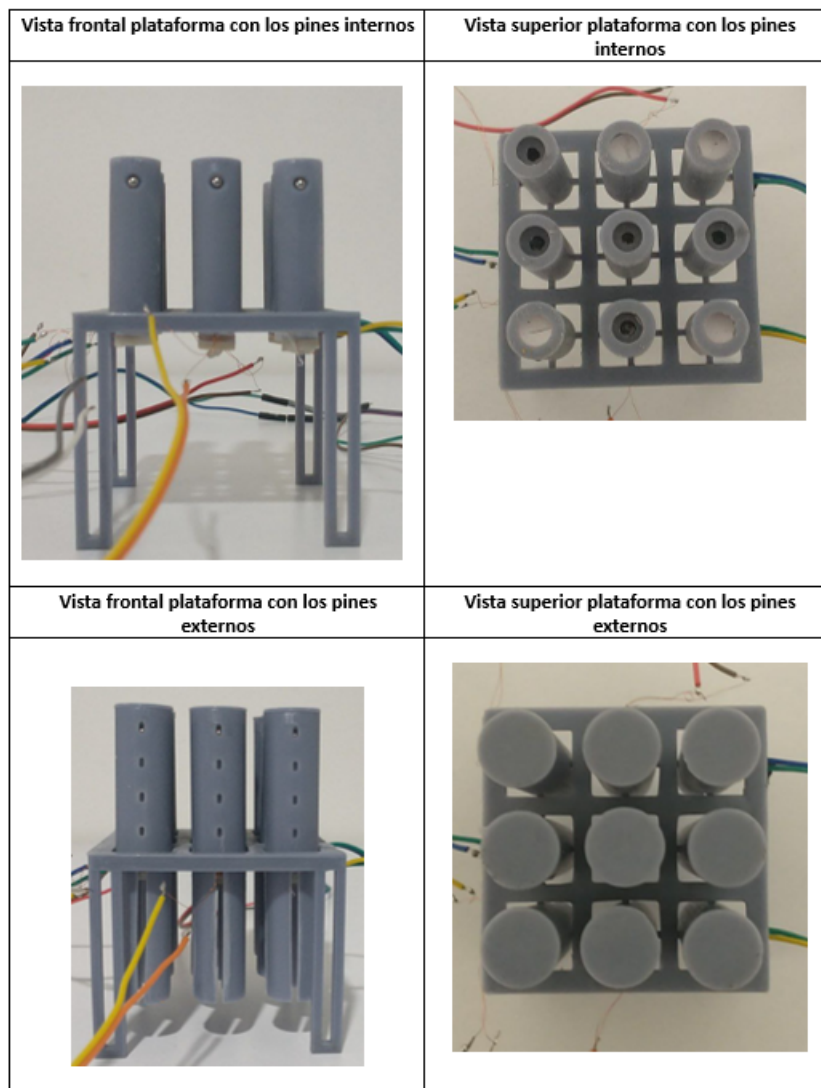
La figura 4.77 muestra la matriz de pines vista desde varias posiciones:

### Ensamblaje Final

Luego de diseñar todas las piezas mencionadas en las secciones 4.4 y 4.5.1 , el siguiente paso consiste en ensamblar el prototipo final, el cual se muestra en la figura 4.78.

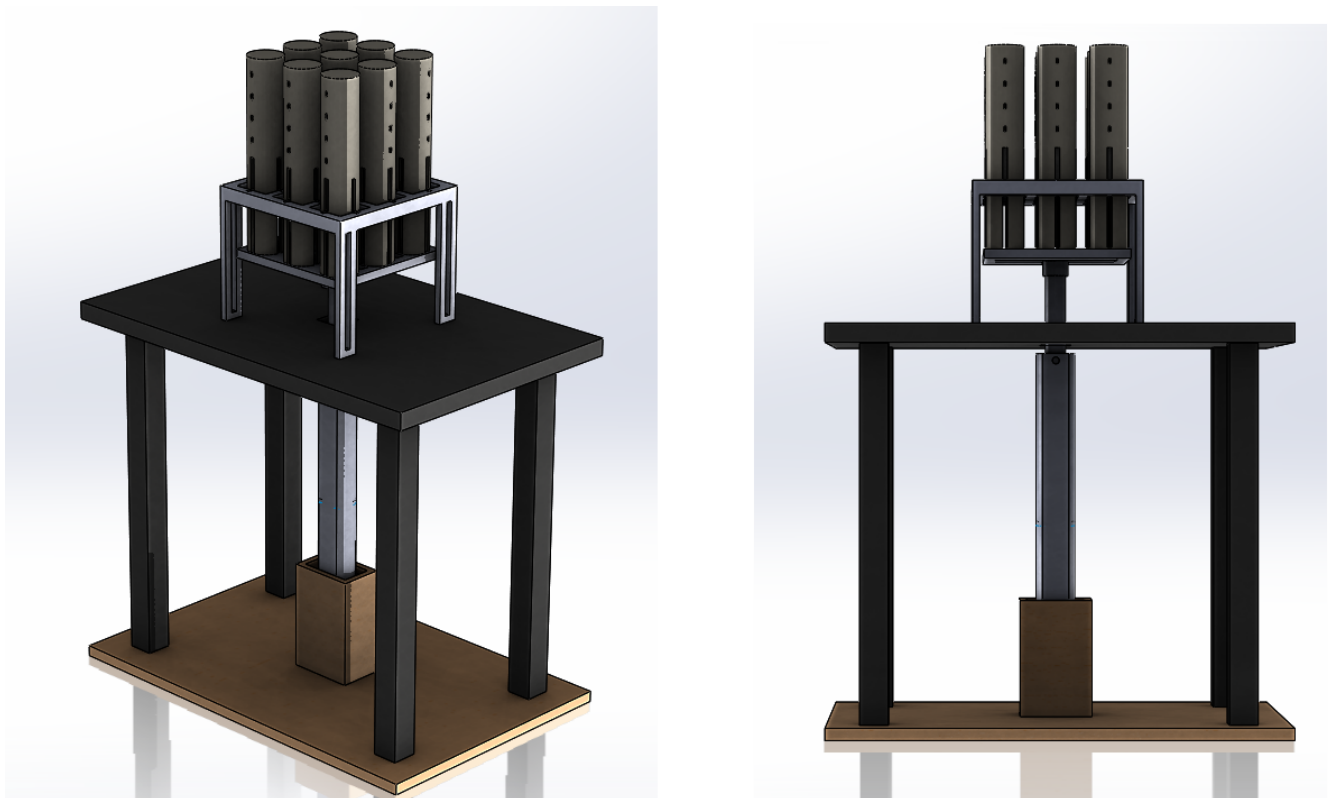
Los modelos 3D y el ensamble hecho se puede consultar en el link disponible en la sección 7.

La figura 4.79 muestra el prototipo construido.

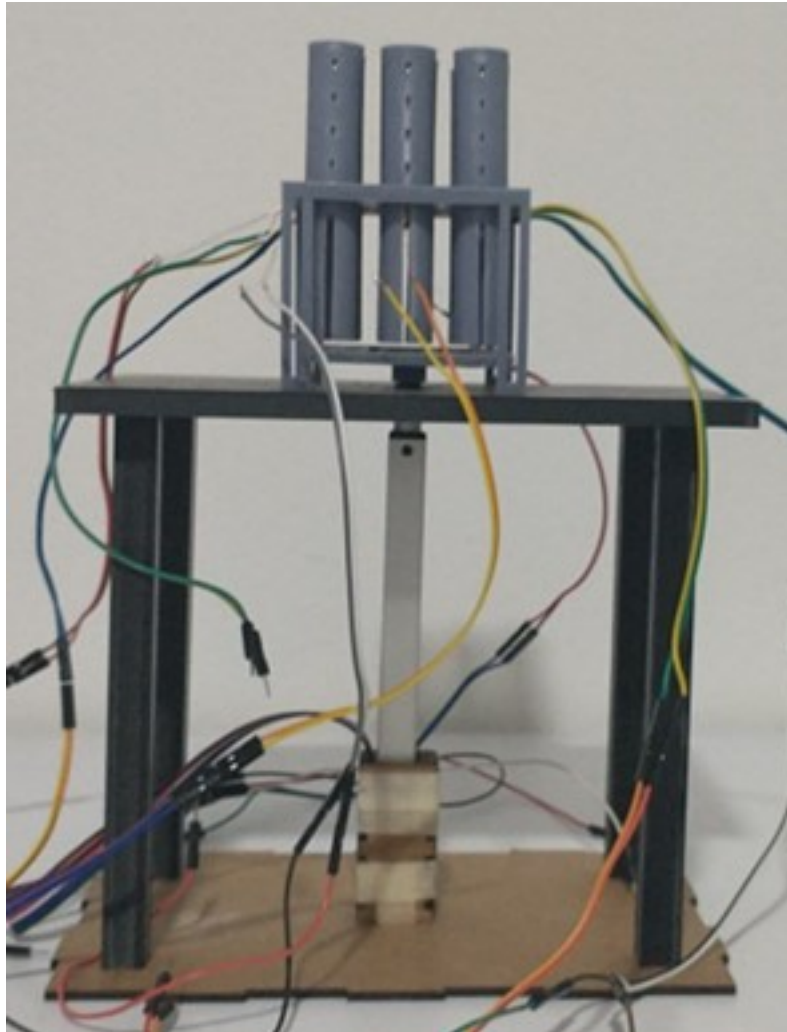


**Figura 4.77:** Matriz de pines construida. Fuente: Elaboración Propia.





**Figura 4.78:** Modelo Prototipo Final 3D ensamblado. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 4.79:** Prototipo Matriz de Pines. Fuente: Elaboración Propia.

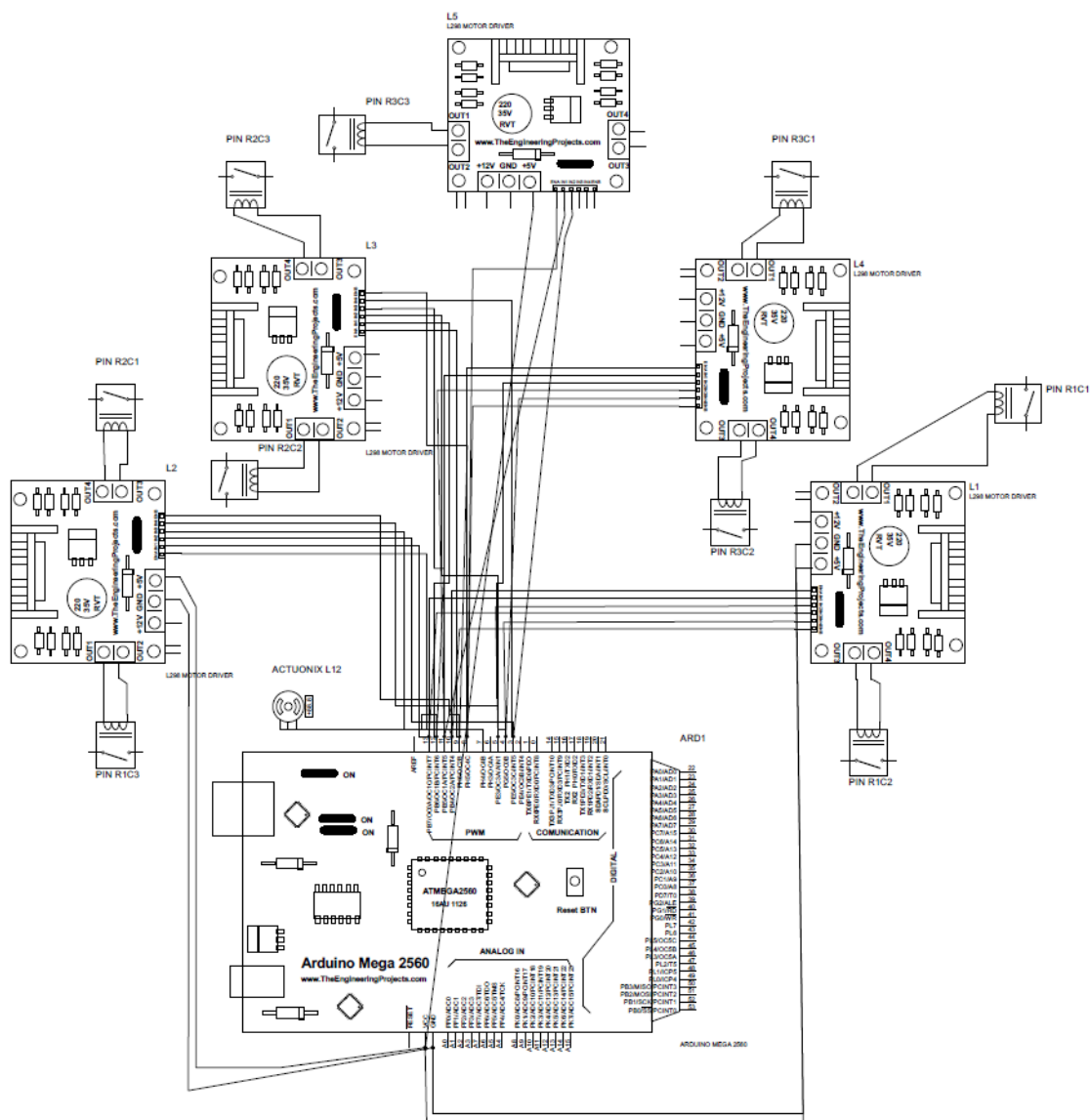
## 4.6 Circuito para el control del despliegue táctil

La manera en que cada pin es bloqueado es a través del envío de una señal escalón con una duración de 1 segundo. Esta señal energiza el electroimán correspondiente a cada pin, el cual, al recibir corriente, repele el mecanismo y expulsa el balín, evitando así el movimiento del pin. Por otro lado, el desbloqueo de cada pin se logra también mediante una señal escalón de igual duración, solo que esta requiere tener la polaridad inversa a la señal de bloqueo, esto provoca que, al suministrar corriente, el electroimán atraiga el mecanismo, devolviéndolo a su posición original y permitiendo que el pin se deslice libremente o sea movido por la plataforma móvil.

Con las anteriores consideraciones, se diseñó el circuito para el control de la matriz táctil, este consta de una placa Arduino MEGA 2560, una protoboard y 5 módulos L298N o puentes H, los cuales normalmente son usados para controlar la velocidad y la dirección de motores de corriente continua, este control de dirección se logra cambiando la polaridad de la corriente, razón por la cual este módulo es ideal para nuestro circuito. Cada módulo L298N permite el control de 2 electroimanes, es decir 2 pines, como tenemos 9 electroimanes son necesarios 5 módulos L298N. El actuador lineal usado para impulsar la plataforma móvil es el Actuonix L12, el cual está conectado al Arduino MEGA 2560. Cada electroimán opera con una alimentación de 12 voltios, debido al bajo consumo de corriente una fuente comercial puede alimentar el circuito enteramente, aunque para el desarrollo del prototipo se hizo uso de la fuente de voltaje regulada PYI-1502DD.

Todo el sistema de control está programado y controlado por un programa Arduino en la computadora. El programa de Arduino define una matriz la cual se actualiza con datos recibidos a través de la entrada serial (interfaz de usuario), y un temporizador se utiliza para controlar el barrido de los pines en la matriz. El programa usa las librerías `binary.h` la cual define constantes binarias para trabajar con valores binarios, y `TimerOne.h` una librería para configurar un temporizador que se utiliza en el barrido de los pines. Los pines de habilitación de filas se establecen en bajo (LOW) para inhabilitar los drivers. La Rutina de interrupción del temporizador `sweep_pins` maneja el barrido de los pines en la matriz, habilitando y deshabilitando las filas y las columnas de la matriz para controlar cuáles pines se activan en un momento dado. El código recorre las filas y columnas, activando los pines correspondientes para activar los actuadores. Esta activación de los pines corresponde a la señal escalón, la cual fluye a través del módulo L298N hacia los pines.

La figura 4.80 muestra las conexiones entre los elementos usados en el circuito de control, en la sección de anexos se encuentra el diseño electrónico realizado en el software Proteus y el código de Arduino anteriormente descrito.



**Figura 4.80:** Conexiones de los elementos usados en el circuito. Fuente: Elaboración Propia.

## 4.7 Aplicación para verificación de la interfaz

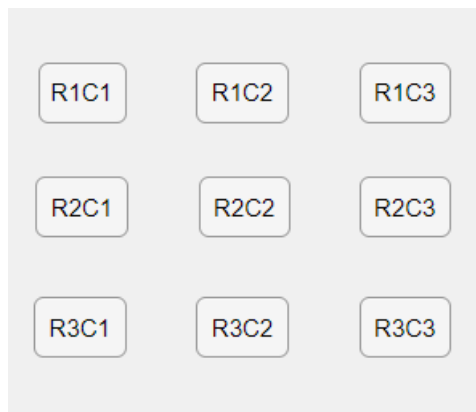
### 4.7.1 Interfaz de Usuario

La interacción entre los usuarios y la herramienta es un factor importante, por esa razón la interfaz se creó usando App Designer, el cual es un entorno de desarrollo interactivo que posee un gran conjunto de componentes para interfaz de usuario; la aplicación únicamente consta de una escena o pantalla que presenta de forma sencilla y concreta la información relevante para el despliegue de pines. App Designer permite distribuir apps empaquetándolas en los archivos del instalador, o creando una aplicación web o de escritorio independiente (se requiere MATLAB Compiler™).

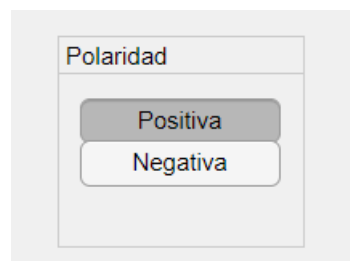


**Figura 4.81:** Interfaz aplicación. Fuente: Elaboración Propia.

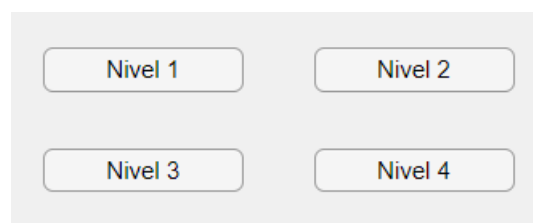
La aplicación se puede dividir en 4 partes, selección de pines a bloquear (figura 4.82), selección de polaridad (figura 4.83), selección del nivel (figura 4.84), y acciones (figura 4.85). En la selección de pines a bloquear tenemos 9 botones distribuidos de forma matricial correspondiente al tamaño de la matriz, cada botón representa la posición de un pin, R1C1 hace referencia al pin de la fila 1, columna 1, R2C3 a la fila 2, columna 3 y así sucesivamente.



**Figura 4.82:** Selección de pines a bloquear. Fuente: Elaboración Propia.



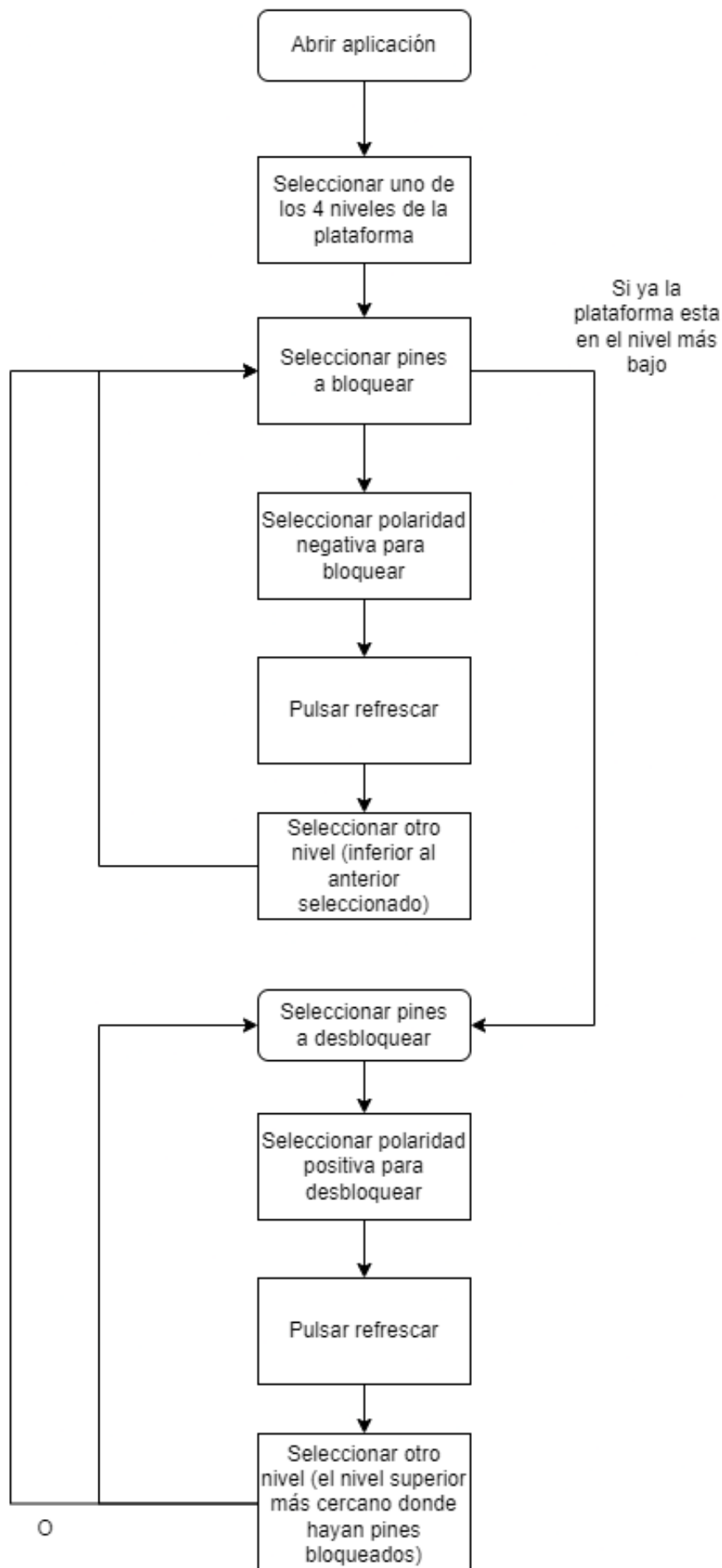
**Figura 4.83:** Selección de polaridad. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 4.84:** Selección de nivel. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 4.85:** Acciones de la aplicación. Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 4.86:** Diagrama de flujo del uso de la aplicación. Fuente: Elaboración Propia.

# Capitulo 5

## Resultados.

### 5.1 Consumo de Potencia

Para suministrar energía a cada electroimán, es esencial enviar una señal escalón con una duración de 1 segundo. Cada electroimán opera con una alimentación de 12 voltios, y tanto el consumo de corriente como el de potencia pueden calcularse teóricamente mediante la aplicación de la ley de Ohm. Esto se facilita al conocer la resistencia específica de cada electroimán, una medida que puede obtenerse mediante un multímetro. La tabla 5.1 presenta el cálculo teórico del consumo de potencia de cada electroimán.

Pin	Alimentación (VDC)	Resistencia (Ohms)	Corriente consumida (A)	Consumo Potencia (W)
R1C1	12	86	0.1395	1.6744
R1C2	12	89	0.1348	1.6179
R1C3	12	81	0.1481	1.7777
R2C1	12	86	0.1395	1.6744
R2C2	12	83	0.1445	1.7349
R2C3	12	100	0.12	1.44
R3C1	12	100	0.12	1.44
R3C2	12	100	0.12	1.44
R3C3	12	69	0.1739	2.0868

**Tabla 5.1:** Calculo teórico de potencia consumida de cada electroimán usado por pin.  
Fuente: Elaboración Propia.

La tabla 5.2 muestra el consumo de potencia de todos los elementos, cuando estos se encuentran en reposo (Consumo de potencia) y cuando son activados (Potencia máxima). En consecuencia, el consumo de potencia estará condicionado por la configuración elegida. El mayor consumo de potencia se encuentra cuando todos los pines se fijan en una misma posición, que sería 15.5364 Watts.



Elemento	Alimentación (VDC)	Corriente consumida (A)	Corriente máxima (A)	Consumo Potencia (W)	Potencia máxima (W)
Motor Actuonix	5	0.02	0.06	0.1	0.3
5 Puentes H	5	0.07	0.07	0.35	0.35
12 Electro- imanes	12	0	1.2608	0	14.8864

**Tabla 5.2:** Consumo de potencia de los elementos del actuador.  
Fuente: Elaboración Propia.

En la sección anexos se encuentran vídeos mostrando el consumo de corriente de cada elemento presente en el prototipo y los distintos consumos de potencia ante distintas configuraciones de la matriz.

## 5.2 Velocidad de refresco

La velocidad de refresco se ve limitada principalmente por el motor usado para la elevación de la plataforma, la tabla 5.3 muestra el tiempo que le toma entre niveles, el motor usado para la elevación de la plataforma es variable, el usado en este prototipo es Actuonix L12-I Linear Actuator, el cual según el fabricante [30] tiene una velocidad de 25mm/s y una fuerza de 30 N.

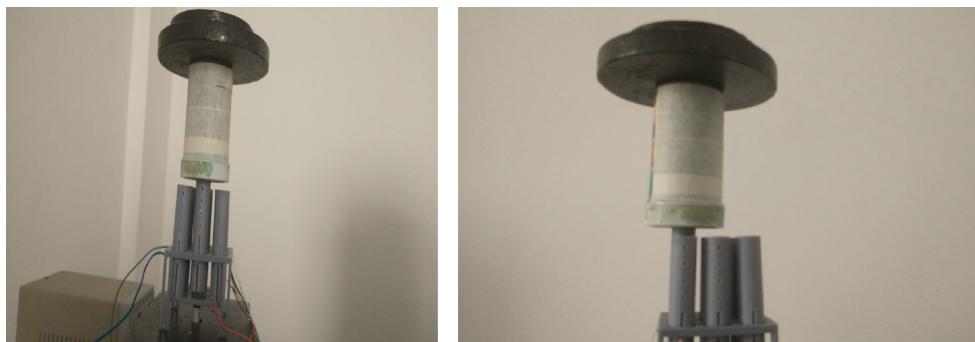
Cambio de nivel	Tiempo de cambio (segundos)
1-2	2.81
2-3	2.54
3-4	2.84
4-3	2.38
3-2	2.20
2-1	2.25
1-4	5.67
4-1	3.96
2-4	3.97
4-2	3.65
1-3	3.87
3-1	3.55

**Tabla 5.3:** Velocidad de refresco de la plataforma.  
Fuente: Elaboración Propia.

Durante el cambio entre niveles, es necesario tener en cuenta el tiempo dedicado al bloqueo o desbloqueo de los pines, establecido en 3 segundos mediante programación en Arduino. En consecuencia, la velocidad de actualización estará condicionada por la configuración elegida. La opción que requiere más tiempo es aquella en la que la plataforma se eleva al nivel más alto, activa los pines necesarios y luego desciende hasta el nivel más bajo, con un tiempo total de 12.63 segundos.

### 5.3 Fuerza de frenado lograda.

Dado que nuestro método de frenado se asemeja al funcionamiento de un cerrojo, evaluamos la fuerza de frenado alcanzada operando la masa que cada pin es capaz de soportar por la aceleración sufrida usando la segunda ley de Newton.



**Figura 5.1:** Masa soportada por un pin.  
Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5.2:** Medición de la masa soportada por un pin.  
Fuente: Elaboración Propia.

La masa que soporta cada pin es 1963 gramos o 1.963 kilogramos, y la aceleración corresponde a la aceleración gravitatoria es de  $9.8 \text{ m/s}^2$ , con esos datos podemos calcular la fuerza:

$$F = m * a \quad (5.1)$$

$$F = 1.963 \text{ kg} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (5.2)$$

$$F = 19.2374N \quad (5.3)$$

Aunque cabe resaltar que nuestra fuerza de frenado lograda no es un aspecto esencial ya que los usuarios invidentes que hacen uso de estas matrices buscan palpar el objeto para identificar una forma, por lo que se hace de manera curiosa y delicada.

En la sección anexos se encuentra evidencia de la fuerza de frenado lograda por cada pin.

## 5.4 Comparación con otras interfaces táctiles

La Tabla 5.4 presenta una comparación entre el prototipo desarrollado y otras interfaces táctiles propuestas en los artículos investigados. Es importante señalar que realizar una comparación directa con otro dispositivo resulta imposible debido a las variaciones en los mecanismos de actuación, el tamaño, el número de pines y la funcionalidad para la cual fueron diseñados, dado que todos estos aspectos difieren al tratarse de prototipos.

Dispositivo	Tipo de interfaz	Voltaje de operación	Velocidad de actualización	Fuerza táctil	Desplazamiento del pin
Prototipo desarrollado	2.5D	12 V	3 s	19 N	4.8 mm
[31]	2.5D	No menciona	No menciona	0.5 N	2.5 mm
[16]	2.5D	322 V	37.5 ms	0.0763 N	1.7 mm
[32]	2.5D	10 V	83.3 ms	0.005 N	2.5 mm
[33]	2.5D	No menciona	1 s	No menciona	3 mm
[34]	2.5D	No menciona	20 min	88 N	1 mm
[35]	2.5D	9 V	14 s	3 N	2 mm
[36]	Braille	9 V	6.25 ms	No menciona	1 mm
[22]	Braille	5 V	5 ms	0.3 N	0.6 mm
[37]	2.5D	No menciona	No menciona	0.02 N	3 mm
[38]	2.5D	20 V	5 s	0.4 N	4 mm
[39]	2.5D	No menciona	20 ms	No menciona	8 mm
[40]	2.5D	No menciona	1 s	No menciona	4.8 mm

**Tabla 5.4:** Comparación con otras interfaces táctiles propuestas en la literatura.  
Fuente: Elaboración Propia.

### Voltaje de operación

Aunque nuestro voltaje de operación no figura como el más bajo en la comparación con otros prototipos, es importante destacar que se trata de un voltaje relativamente reducido. Esta observación es aún más significativa al considerar que nuestro consumo máximo de

potencia es ligeramente superior a 15 vatios y puede ser fácilmente suministrados por fuentes de voltaje comerciales.

### **Velocidad de actualización**

Aunque la velocidad de refresco no constituye nuestra mayor fortaleza, es un aspecto fácilmente optimizable. Nuestra metodología actual de frenado implica el escaneo de todos los pines, incluso si solo se desea activar uno. Esta eficiencia puede mejorarse mediante la implementación de un frenado dedicado exclusivamente a los pines deseados, lo que podría reducir el tiempo de respuesta a tan solo 1 segundo.

### **Fuerza táctil**

Sin duda es un aspecto a destacar la fuerza táctil lograda, aunque tal cantidad de fuerza es más que suficiente puesto que nuestro prototipo de matriz 2.5D esta pensada para el reconocimiento de figuras a través del tacto por usuarios invidentes. En este contexto, el usuario se dedicará a explorar el dispositivo de manera delicada para identificar una figura, lo que requiere cierto nivel de fuerza. No obstante, es crucial destacar que la fuerza no debería ser el atributo más importante en este contexto; otros aspectos también deben ser considerados igualmente importantes en este ejercicio.

### **Desplazamiento del pin**

Esta característica es crucial para la resolución de las figuras generadas, ya que un desplazamiento más reducido posibilitaría una mayor resolución en nuestra matriz. Para mejorar la resolución en nuestro dispositivo, contamos con opciones como incrementar el número de niveles de la plataforma o reducir el desplazamiento de nuestros pines.

# Capítulo 6

## Conclusiones y trabajos futuros

### 6.1 Conclusiones.

- Se presentaron cuatro actuadores electromagnéticos como opciones para un despliegue táctil 2.5D. Tras una ardua evaluación que abarcó la cantidad de piezas, la complejidad, el peso, el tamaño y el tipo de bloqueo, se seleccionaron y construyeron dos de ellos. Sin embargo, únicamente uno de los dos actuadores funcionó conforme a lo esperado. A partir de este prototipo seleccionado y funcional, se procedió a desarrollar una plataforma equipada con un motor destinado a la elevación de los pines.
- Se logró la fabricación de un prototipo de pantalla gráfica táctil mediante la creación de un actuador electromagnético desde cero. Los resultados obtenidos fueron destacables en cuanto a la fuerza de frenado y el consumo de potencia, comparándolos favorablemente con otros prototipos propuestos en la literatura, sin embargo es necesaria una mejora en la velocidad de actualización de los pines. Es relevante destacar que el prototipo se diseñó prescindiendo de parámetros específicos, dado que la literatura muestra la falta de una definición clara en cuanto al diseño de pantallas gráficas táctiles.
- En este trabajo se abordó el principio de frenado electromagnético como propuesta para la creación de interfaces táctiles 2.5D para la representación de información para personas con discapacidad visual. Dentro de las ventajas de usar este enfoque está el poco ruido de la interfaz, la posibilidad de gobernar una matriz de muchos pines con pocos puertos de procesador gracias al principio de barrido por filas de los pines, el bajo consumo de potencia gracias a que el mismo principio de refresco por filas permite la actuación de solo una fila de pines a la vez, el empleo de actuadores cuyo costo es reducido al compararse con el empleo de un motor por pin. La principal desventaja del prototipo funcional logrado es su actuación de frenado en posiciones discretas del pin.
- La tecnología de fabricación 3D disponible no permite el acabado fino de piezas, habiendo tenido que recurrir a material de resina para evitar fricción entre piezas móviles, lo que hace que los pines no sean robustos y su peso ligero hace que la actuación del frenado no sea confiable. Trabajos futuros deberían contemplar la disponibilidad de fabricación digital de pines en otros materiales, posiblemente metálicos, que favorezcan la reducción de fricciones o bloqueos de piezas.

## 6.2 Trabajos futuros.

- Se investigará una alternativa para desbloquear los pines que no implique el suministro de corriente con polaridad inversa a la usada para la activación. Esto se hace con el propósito de evitar la necesidad de utilizar un elemento como el módulo L298N, ya que su inclusión ocupa un espacio físico y cableado considerable y complicaría la escalabilidad del número de pines en la matriz propuesta.
- Aunque el diseño del actuador cumplió con su función, se reconoce que su eficiencia no fue la óptima. Además, la calidad del acabado en las piezas fabricadas no fue la deseada, pues la impresión presentaba problemas cuando las dimensiones eran menores a 1 mm. Por esta razón, se explorará una nueva forma de fabricación para que las piezas consigan un acabado más refinado. Además, se buscará desarrollar un mecanismo de bloqueo más eficiente bajo el mismo principio.
- Buscaremos la miniaturización de tanto el actuador lineal como el actuador electromagnético, incluyendo los pines. Asimismo, nos enfocaremos en mejorar la resolución espacial del prototipo actual, ya que una mayor resolución facilita la visualización de información más compleja y detallada, lo cual constituye el objetivo central de este proyecto.

# Capitulo 7

## Anexos

A continuación se adjunta una url y un código QR, en donde se encuentra la información relacionada al proyecto de forma digital:

- Códigos: se encuentran los códigos realizados en Arduino usados para la fabricación de electroimanes y para el funcionamiento de la matriz de pines 2.5D.
- Diseños CAD: seccionada en 4 carpetas se encuentran los modelos 3D de cada prototipo con su respectivo ensamble, y un documento explicando la descripción de cada pieza.
- Vídeos: en esta carpeta se encuentran los vídeos mostrando el funcionamiento de los pines del prototipo de matriz 2.5D en varias posiciones.
- Prototipo construido: en esta carpeta se encuentra evidencia relacionada a las pruebas realizadas usando el prototipo.
- Artículo: en esta carpeta se encuentra el artículo realizado en formato IEEE destinado para una publicación.

# Bibliografía

- [1] A. C. G. Saucedo, F. J. G. Heredia, and R. R. Martínez, “Discapacidad visual,” *Cultura Científica y Tecnológica*, no. 51, 2016.
- [2] B. Preim, R. Raidou, N. Smit, and K. Lawonn, “Chapter 12 - introduction to virtual reality,” in *Visualization, Visual Analytics and Virtual Reality in Medicine*, ser. The MICCAI Society Book Series, B. Preim, R. Raidou, N. Smit, and K. Lawonn, Eds. Academic Press, 2023, pp. 355–401. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128229620000225>
- [3] N. R. Council, *Virtual Reality: Scientific and Technological Challenges*, N. I. Durlach and A. S. Mavor, Eds. Washington, DC: The National Academies Press, 1995. [Online]. Available: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/4761/virtual-reality-scientific-and-technological-challenges>
- [4] M. Motaharifar, A. Norouzzadeh, P. Abdi, A. Iranfar, F. Lotfi, B. Moshiri, A. Lashay, S. F. Mohammadi, and H. D. Taghirad, “Applications of haptic technology, virtual reality, and artificial intelligence in medical training during the covid-19 pandemic,” *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 8, p. 612949, 2021.
- [5] M. Sreelakshmi and T. Subash, “Haptic technology: A comprehensive review on its applications and future prospects,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2, pp. 4182–4187, 2017.
- [6] L.-m. Liu, W. Li, and J.-j. Dai, “Haptic technology and its application in education and learning,” in *2017 10th International Conference on Ubi-media Computing and Workshops (Ubi-Media)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [7] C. Bermejo and P. Hui, “A survey on haptic technologies for mobile augmented reality,” *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 54, no. 9, pp. 1–35, 2021.
- [8] M. Mukhiddinov and S.-Y. Kim, “A systematic literature review on the automatic creation of tactile graphics for the blind and visually impaired,” *Processes*, vol. 9, no. 10, p. 1726, 2021.
- [9] Apr 2022. [Online]. Available: <https://wyss.harvard.edu/technology/low-cost-tactile-displays-for-the-blind-and-visually-impaired/>
- [10] W. Yang, J. Huang, R. Wang, W. Zhang, H. Liu, and J. Xiao, “A survey on tactile displays for visually impaired people,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 14, no. 4, pp. 712–721, 2021.



- [11] F. Vidal-Verdú and M. Hafez, “Graphical tactile displays for visually-impaired people,” *IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 119–130, 2007.
- [12] A. Russomanno, R. B. Gillespie, S. O’Modhrain, and M. Burns, “The design of pressure-controlled valves for a refreshable tactile display,” in *2015 IEEE World Haptics Conference (WHC)*. IEEE, 2015, pp. 177–182.
- [13] L. Matheson, “Current developments in refreshable braille display technology,” in *Resna Annual Conference*, 2009.
- [14] D. S. Raj, S. Himanshu, R. Sudhir, A. Sajid, and H. Darshan, “Refreshable braille display for the visually impaired,” in *14th IEEE India Council International Conference (INDICON)*. IEEE, Roorke, 2017.
- [15] A. Russomanno, S. O’Modhrain, R. B. Gillespie, and M. W. Rodger, “Refreshing refreshable braille displays,” *IEEE transactions on haptics*, vol. 8, no. 3, pp. 287–297, 2015.
- [16] K. Zhang and S. Follmer, “Electrostatic adhesive brakes for high spatial resolution refreshable 2.5 d tactile shape displays,” in *2018 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*. IEEE, 2018, pp. 319–326.
- [17] S. Biswas and Y. Visell, “Emerging material technologies for haptics,” *Advanced Materials Technologies*, vol. 4, no. 4, p. 1900042, 2019.
- [18] G. C. Bettelani, G. Averta, M. G. Catalano, B. Leporini, and M. Bianchi, “Design and validation of the readable device: a single-cell electromagnetic refreshable braille display,” *IEEE transactions on haptics*, vol. 13, no. 1, pp. 239–245, 2020.
- [19] U. Guler, T. B. Tufan, A. Chakravarti, Y. Jin, and M. Ghovanloo, “Implantable and wearable sensors for assistive technologies,” 2023.
- [20] H.-C. Cho, B.-S. Kim, J.-J. Park, and J.-B. Song, “Development of a braille display using piezoelectric linear motors,” in *2006 SICE-ICASE International Joint Conference*. IEEE, 2006, pp. 1917–1921.
- [21] P. Sekhar and V. Uwizeye, “Review of sensor and actuator mechanisms for biomems,” in *MEMS for Biomedical Applications*. Elsevier, 2012, pp. 46–77.
- [22] J. Kim, B.-K. Han, D. Pyo, S. Ryu, H. Kim, and D.-S. Kwon, “Braille display for portable device using flip-latch structured electromagnetic actuator,” *IEEE transactions on haptics*, vol. 13, no. 1, pp. 59–65, 2020.
- [23] L. Petit, A. Hassine, J. Terrien, F. Lamarque, and C. Prelle, “Development of a control module for a digital electromagnetic actuators array,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 9, pp. 4788–4796, 2013.
- [24] H. Chen, W. Tao, C. Liu, Q. Shen, Y. Wu, L. Ruan, and W. Yang, “A novel refreshable braille display based on the layered electromagnetic driving mechanism of braille dots,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 16, no. 1, pp. 96–105, 2023.

- [25] F. Pece, J. J. Zarate, V. Vechev, N. Besse, O. Gudozhnik, H. Shea, and O. Hilliges, “Magtics: Flexible and thin form factor magnetic actuators for dynamic and wearable haptic feedback,” in *Proceedings of the 30th annual ACM symposium on User interface software and technology*, 2017, pp. 143–154.
- [26] C. Wagner, S. Lederman, and R. Howe, “A tactile shape display using rc servomotors,” in *Proceedings 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. HAPTICS 2002*, 2002, pp. 354–355.
- [27] [Online]. Available: <https://ferretronica.com/products/motorreductor-amarillo-plastico-1-kg-cm-5v>
- [28] Sep 2023. [Online]. Available: <https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-585631403-modulo-l298n-control-de-motor-puente-h>
- [29] [Online]. Available: <https://ferretronica.com/products/modulo-encoder-hc-020k-sensor-de-velocidad-b83609>
- [30] [Online]. Available: <https://www.actuonix.com/112-50-50-6-i>
- [31] K.-U. Kyung, J. M. Lim, Y.-A. Lim, S. Park, S. K. Park, I. Hwang, S. Choi, J. Seo, S.-Y. Kim, T.-H. Yang *et al.*, “Taxel: Initial progress toward self-morphing visio-haptic interface,” in *2011 IEEE World Haptics Conference*. IEEE, 2011, pp. 37–42.
- [32] S. Jang, L. H. Kim, K. Tanner, H. Ishii, and S. Follmer, “Haptic edge display for mobile tactile interaction,” in *Proceedings of the 2016 CHI conference on human factors in computing systems*, 2016, pp. 3706–3716.
- [33] H. Zhu and W. J. Book, “Practical structure design and control for digital clay,” in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, vol. 47063, 2004, pp. 1051–1058.
- [34] B. J. Peters, “Design and fabrication of a digitally reconfigurable surface,” Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2011.
- [35] D. Leonardis, C. Loconsole, and A. Frisoli, “A passive and scalable magnetic mechanism for braille cursor, an innovative refreshable braille display,” *Meccanica*, vol. 55, pp. 1639–1653, 2020.
- [36] D. Leonardis and C. Loconsole, “Braille cursor: An innovative and affordable refreshable braille display designed for inclusion,” in *Advances in Design for Inclusion: Proceedings of the AHFE 2018 International Conference on Design for Inclusion, July 21-25, 2018, Loews Sapphire Falls Resort at Universal Studios, Orlando, Florida, USA 9*. Springer, 2019, pp. 302–311.
- [37] M. Karpelson, R. Peña, and R. J. Wood, “Low-cost electromechanical actuator arrays for tactile display applications,” in *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2018, pp. 471–476.
- [38] N. Besse, S. Rosset, J. J. Zarate, E. Ferrari, L. Brayda, and H. Shea, “Understanding graphics on a scalable latching assistive haptic display using a shape memory polymer membrane,” *IEEE transactions on haptics*, vol. 11, no. 1, pp. 30–38, 2017.

- [39] L. Brayda, F. Leo, C. Baccelliere, E. Ferrari, and C. Vigni, “Updated tactile feedback with a pin array matrix helps blind people to reduce self-location errors,” *Micromachines*, vol. 9, no. 7, p. 351, 2018.
- [40] A. F. Siu, S. Kim, J. A. Miele, and S. Follmer, “shapecad: An accessible 3d modelling workflow for the blind and visually-impaired via 2.5 d shape displays,” in *Proceedings of the 21st International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, 2019, pp. 342–354.